MANUFACTURA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

QUINTA EDICIÓN





S. Kalpakjian • S. R. Schmid

PEARSON
Prentice Hall

LISTA DE TABLAS EN EL LIBRO

Introducción General

I.1 Número de partes en algunos productos 2
I.2 Desarrollo histórico de materiales y procesos de manufactura 5
I.3 Características generales de manufactura de diversas aleaciones 17
I.4 Compensación por hora aproximada relativa para trabajadores manufactureros, 2003. Estados Unidos = 100. Los costos de compensación varían dependiendo de los beneficios y las prestaciones 40

Part I Fundamentos de materiales: Comportamiento y propiedades de manufactura

1.1 Tamaños de grano 55
1.2 Rangos de temperatura homóloga para diferentes procesos 60
2.1 Propiedades mecánicas relativas de diversos metales a temperatura ambiente, en orden decreciente. Los metales se encuentran en forma de aleación 65
2.2 Propiedades mecánicas de diversos materiales a temperatura ambiente 67
2.3 Valores característicos para K y n a temperatura ambiente 72
2.4 Rangos característicos de deformación y de velocidad de deformación en procesos de manufactura 75
3.1 Propiedades físicas de diversos materiales a temperatura ambiente 103
3.2 Propiedades físicas de materiales, en orden descendente 104
3.3 Relación de esfuerzo máximo a la fluencia con respecto a la densidad de algunos metales 104
4.1 Descripción de los procesos de tratamiento térmico para endurecimiento superficial 138
5.1 Selección típica de aceros al carbono y aleados para diversas aplicaciones 156
5.2 Propiedades mecánicas características de aceros al carbono y aleados seleccionados, en condiciones de laminado en caliente, normalizado y recocido 159
5.3 Denominación AISI para hoja de acero de alta resistencia 160
5.4 Propiedades mecánicas a temperatura ambiente y aplicaciones típicas de aceros inoxidables recocidos seleccionados 162
5.5 Tipos básicos de aceros para matrices y herramentales 163
5.6 Características de procesamiento y de servicio de aceros comunes para matrices y herramentales 164
5.7 Materiales típicos para matrices y herramental para trabajo de los metales 165
6.1 Costo aproximado por unidad de volumen para metales forjables y plásticos, en relación con el costo del acero al carbono 170
6.2 Características generales de los metales y aleaciones no ferrosas 170
6.3 Propiedades de aleaciones seleccionadas de aluminio a temperatura ambiente 171
6.4 Propiedades de manufactura y aplicaciones típicas de aleaciones forjables de aluminio seleccionadas 172
6.5 Propiedades y formas típicas de aleaciones forjables de magnesio seleccionadas 176
6.6 Propiedades y aplicaciones típicas de aleaciones forjables de cobre y latones seleccionadas 177
6.7 Propiedades y aplicaciones típicas de bronces forjables seleccionadas 178
6.8 Propiedades y aplicaciones típicas de aleaciones de níquel seleccionadas (todos son nombres comerciales) 179
6.9 Propiedades y aplicaciones típicas de superaleaciones base níquel seleccionadas a 870 °C (1600 °F) (todos son nombres comerciales) 180
6.10 Propiedades y aplicaciones típicas de aleaciones de titanio seleccionadas a diferentes temperaturas 181
7.1 Gama de propiedades mecánicas para diversos plásticos de ingeniería a temperatura ambiente 192
7.2 Temperaturas de transición vítrea y de fusión de algunos polímeros 201
7.3 Recomendaciones generales para productos plásticos 209
7.4 Nombres comerciales de polímeros termoplásticos 209
8.1 Tipos y características generales de los cerámicos 222
8.2 Propiedades de diversos cerámicos a temperatura ambiente 225
8.3 Propiedades de diferentes vidrios 230
9.1 Tipos y características generales de los materiales compósitos 240
9.2 Propiedades características de las fibras de refuerzo 242
9.3 Materiales y aplicaciones de compósitos de matriz metálica 252
9.4 Resumen de propiedades de fibras y materiales para un caliper automotor de frenos 253

Parte II Procesos y equipo para la fundición de metales

10.1 Contracción o dilatación volumétrica por solidificación para diversos metales fundidos 275
11.1 Resumen de procesos de fundición 286
11.2 Características generales de los procesos de fundición 288
11.3 Propiedades y aplicaciones características de algunas aleaciones comunes de fundición a presión en matriz 308
12.1 Tolerancia normal a la contracción para algunos metales fundidos en moldes de arena 326
12.2 Aplicaciones comunes de las fundiciones y características de fundición 334
12.3 Propiedades y aplicaciones comunes de los hierros fundidos 334
12.4 Propiedades mecánicas de los hierros fundidos grises 335
12.5 Propiedades y aplicaciones comunes de las aleaciones no ferrosas fundidas 335
12.6 Características generales de los costos de los procesos de fundición 337

Parte III Procesos y equipo de formado y moldeado

III.1 Características generales de los procesos de formado y moldeado 346
14.1 Características generales de los procesos de forjado 373
14.2 Intervalo de valores de k para la ecuación 14.2 378
14.3 Clasificación de metales en orden decreciente de forjabilidad 386
14.4 Intervalos característicos de velocidades del equipo de forjado 390
14.5 Comparación de diseños de soportes de suspensión del automóvil Lotus Elise 395
15.1 Intervalos característicos de temperaturas de extrusión para diversos metales y aleaciones 406
16.1 Características generales de los procesos de formado de hojas metálicas (en orden alfabético) 426
16.2 Características importantes de los metales en las operaciones de formado de hojas (láminas) 436
16.3 Radio mínimo de doblado para diversos metales a temperatura ambiente 442
16.4 Intervalos característicos de anisotropía normal promedio, R_{prom} para diferentes hojas (láminas) metálicas 454
17.1 Presiones de compactado para diversos polvos 493
17.2 Temperatura y tiempo de sinterización para diversos metales 499
17.3 Propiedades mecánicas de materiales seleccionados de P/M 501
17.4 Comparación de propiedades mecánicas de algunos metales forjados y de P/M equivalentes (sólo sinterizados) 502
17.5 Comparación de propiedades mecánicas de la aleación de titanio Ti-6AL-4V 502
17.6 Partes de titanio forjadas y de P/M y ahorro en los costos 509
18.1 Características generales del procesamiento de cerámicos 514

FACTOR DE CONVERSIÓN PARA UNIDADES SI

PROPIEDAD	PARA CONVERTIR DE	A	MULTIPLICAR POR
Aceleración	pie/s^2	m/s^2	3.048×10^{-1}
Ángulo	grado	rad	1.745×10^{-2}
	minuto	rad	2.909×10^{-4}
	segundo	rad	4.848×10^{-6}
Área	$pulg^2$	m^2	6.452×10^{-4}
	pie^2	m^2	9.290×10^{-2}
	$pulg^2$	mm^2	6.452×10^{2}
	pie^2	mm^2	9.290×10^{4}
Densidad	$lb/pulg^3$	kg/m^3	2.768×10^{4}
Energía	pie · lb	J	1.356
	Btu	J	1.054×10^{3}
	caloría	J	4.184
	watt · h	J	3.600×10^{3}
Fuerza	kgf	N	9.807
	lb	N	4.448
Longitud	pulg	m	2.540×10^{-2}
	pie	m	3.048×10^{-1}
Masa	lb	kg	4.536×10^{-1}
	tonelada (métrica)	kg	1.000×10^{3}
	tonelada (corta)	kg	9.072×10^{2}
Potencia	hp	W	7.457×10^{2}
	Btu/min	W	1.757×10
	pie · lb/min	W	2.260×10^{-2}
Presión, esfuerzo	$lb/pulg^2$	Pa	6.895×10^{3}
	bar	Pa	1.000×10^{5}
	atmósfera	Pa	1.013×10^{5}
Térmica	Btu/h · pie · °F	W/m · K	1.730
	cal/s.cm · °C	W/m · K	4.184×10^{2}
	Btu/lb · °F	J/kg · K	4.184×10^{3}
Torque	lb · pulg	N · m	1.130×10^{-1}
	lb · pie	N · m	1.356
Velocidad	pie/min	m/s	5.080×10^{-3}
	rpm	rad/s	1.047×10^{-1}
Volumen	$pulg^3$	m^3	1.639×10^{-5}
	pie^3	m^3	2.832×10^{-2}
	$pulg^3$	mm^3	1.639×10^{4}
	pie^3	mm^3	2.832×10^{7}
	galón (EUA)	litro	3.785
OTRAS CONVERSIONES	$lb/pulg^2$	kgf/mm^2	7.030×10^{-4}
	$lb/pulg^3$	g/cm^3	2.768×10
	kg/mm^2	MPa	9.807
	Btu/h · pie · °F	cal/s · cm · °C	4.134×10^{-3}
	onza	g	2.835×10
	micropulgada	micra	2.540×10^{-2}
	angstrom	m	10^{-10}
	tonelada métrica	kg	10^{3}
	tonelada corta	lb	2.240×10^{3}

19.1 Características generales de los procesos de formado y moldeo para plásticos y materiales compósitos 535
19.2 Comparativo de características de producción de diversos métodos de moldeo 574
20.1 Características de las tecnologías de producción aditiva de prototipos rápidos 582
20.2 Propiedades mecánicas de materiales seleccionados para producción de prototipos rápidos 582

Parte IV Procesos de maquinado y máquinas herramienta

21.1 Factores que influyen en las operaciones de maquinado 610
21.2 Intervalo aproximado de requerimientos de energía en las operaciones de corte por lo que se refiere al motor de accionamiento de la máquina herramienta (multiplicar por 1.25 para herramientas desafiladas) 622
21.3 Intervalos de valores de *n* para la ecuación de Taylor (21.20a) en diversos materiales para herramientas 628
21.4 Profundidad de desgaste permisible promedio (ver *VB* en la fig. 21.15c) para herramientas de corte en diversas operaciones de maquinado 631
22.1 Propiedades generales de los materiales para herramientas 649
22.2 Características generales de los materiales para herramientas de corte (estos materiales para herramientas tienen una amplia variedad de composiciones y propiedades. En muchas categorías de materiales para herramientas existen traslapes) 650
22.3 Características generales de operación de los materiales para herramientas de corte 651
22.4 Clasificación ISO de las herramientas de corte de carburos de acuerdo con su uso 656
22.5 Clasificación de los carburos de tungsteno de acuerdo con sus aplicaciones de maquinado 657
23.1 Características generales de los procesos de maquinado y tolerancias dimensionales características 676
23.2 Recomendaciones generales de ángulos de herramientas en torneado 678
23.3 Resumen de parámetros y fórmulas de torneado 680
23.4 Recomendaciones generales para operaciones de torneado 682
23.5 Recomendaciones generales de fluidos de corte para maquinado (ver también capítulo 33) 685
23.6 Capacidades típicas y máximas dimensiones de piezas de trabajo para máquinas herramienta 688
23.7 Datos para el ejemplo 23.3 696
23.8 Velocidades normales de producción para diversas operaciones de maquinado 696
23.9 Guía general de resolución de problemas para operaciones de torneado 699
23.10 Capacidades generales de las operaciones de taladrado y mandrinado 706
23.11 Recomendaciones generales de velocidades y avances en taladrado 711
23.12 Guía general de resolución de problemas para operaciones de taladrado 712
24.1 Resumen de parámetros y fórmulas del fresado periférico 727
24.2 Recomendaciones generales para operaciones de fresado 736
24.3 Guía general de resolución de problemas para operaciones de fresado 737
25.1 Comparación de condiciones de maquinado convencional contra maquinado de media luna roja 780
26.1 Intervalos de dureza Knoop para diversos materiales y abrasivos 792
26.2 Requerimientos aproximados de energía específica para rectificado de superficies 801
26.3 Intervalos característicos de velocidades y avances para procesos abrasivos 808
26.4 Características generales de los procesos y máquinas para el maquinado abrasivo 809
26.5 Recomendaciones generales para fluidos para rectificado 817
27.1 Características generales de los procesos de maquinado avanzado 837
27.2 Aplicaciones generales de los rayos láser en la manufactura 851

Parte V Fabricación de dispositivos microelectrónicos y micromanufactura

28.1 Características generales de las técnicas de litografía 879
28.2 Características generales de las operaciones de ataque (grabado) de silicio 885
28.3 Comparación de velocidades de ataque 886
29.1 Comparación de técnicas de manufactura de micromoldes 923
29.2 Comparación de propiedades de materiales de imanes permanentes 924

Parte VI Procesos y equipo para unión

VI.1 Comparación de diversos métodos de unión 939
30.1 Características generales de los procesos de soldadura por fusión 941
30.2 Designación de electrodos de acero dulce recubiertos 955
32.1 Metales de aporte comunes para la soldadura fuerte de diversos metales y aleaciones 1006
32.2 Tipos de aleaciones de soldadura blanda y sus aplicaciones 1010
32.3 Propiedades y características comunes de los adhesivos estructurales químicamente reactivos 1015
32.4 Características generales de los adhesivos 1016

Parte VII Tecnología de superficies

34.1 Recubrimientos cerámicos para aplicaciones de alta temperatura 1076

Parte VIII Aspectos comunes de la manufactura

36.1 Expectativa de vida de algunos productos 1112
36.2 Los 14 puntos de Deming 1114
36.3 Constantes para las tablas de control 1126
36.4 Datos para el ejemplo 36.3 1129

Parte IX Manufactura en un ambiente competitivo

37.1 Desarrollo en la historia de la automatización de los procesos de manufactura 1146
37.2 Cantidad aproximada de producción anual 1149
39.1 Comparación de características generales de líneas de transferencia y sistemas flexibles de manufactura 1222
40.1 Referencias a diferentes temas en este libro 1240
40.2 Costo relativo de reparación en diferentes etapas de desarrollo y venta del producto 1244
40.3 Expectativa de vida promedio para diferentes productos. Ver también tabla 36.1 1244
40.4 Formas de materiales disponibles comercialmente 1247
40.5 Costo aproximado por unidad de volumen para metales forjables y polímeros, en relación con el costo del acero al carbono 1249
40.6 Intervalos aproximados de desperdicio generado en diferentes procesos de manufactura 1250
40.7 Cambios de materiales del avión militar de carga C-5A al C-5B 1252
40.8 Características generales de los procesos de manufactura para diferentes metales y aleaciones 1258
40.9 Costos relativos para maquinaria y equipo (los costos varían mucho, dependiendo del tamaño, capacidad, opciones y nivel de automatización y de control por computadora. Ver también las secciones de economía en diferentes capítulos) 1263
40.10 Aspectos de diseño para contenedores de solución intravenosa 1268

Manufactura, ingeniería y tecnología

QUINTA EDICIÓN

Serope Kalpakjian
Illinois Institute of Technology

Steven R. Schmid
The University of Notre Dame

TRADUCCIÓN
Jaime Espinosa Limón
Ingeniero mecánico

REVISIÓN TÉCNICA
Francisco Javier Sandoval Palafox
Ulises Figueroa López
Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey
Campus Estado de México

Roberto Hernández Cárdenas
Departamentos de Ingeniería Mecatrónica e Ingeniería Industrial
Tecnológico de Estudios Superiores de Jilotepec

PEARSON Educación®

México • Argentina • Brasil • Colombia • Costa Rica • Chile • Ecuador
España • Guatemala • Panamá • Perú • Puerto Rico • Uruguay • Venezuela

Datos de catalogación bibliográfica

KALPAKJIAN, SEROPE

Manufactura, ingeniería y tecnología. Quinta edición

PEARSON EDUCACIÓN, México, 2008

ISBN: 978-970-26-1026-7
Área: Ingeniería

Formato: 21 × 27 cm Páginas: 1328

Authorized translation from the English language edition, entitled *Manufacturing engineering and technology, 5th edition* by *Serope Kalpakjian and Steven Schmid,* published by Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, Copyright © 2006. All rights reserved.

ISBN 0-13-148965-8

Traducción autorizada de la edición en idioma inglés, *Manufacturing engineering and technology, 5a edición* por *Serope Kalpakjian* y *Steven Schmid*, publicada por Pearson Education, Inc., publicada como Prentice Hall, Copyright © 2006. Todos los derechos reservados.

Esta edición en español es la única autorizada.

Edición en español

Editor: Luis Miguel Cruz Castillo
e-mail: luis.cruz@pearsoned.com
Editora de desarrollo: Claudia Celia Martínez Amigón
Supervisor de producción: José D. Hernández Garduño

Edición en inglés

Vice President and Editorial Director, ECS: *Marcia J. Horton*
Executive Editor: *Eric Svendsen*
Associate Editor: *Dee Bernhard*
Executive Managing Editor: *Vince O'Brien*
Managing Editor: *David A. George*
Production Editor: *Rose Kernan*
Director of Creative Services: *Paul Belfanti*
Creative Director: *Heather Scott*
Cover Designer: *John Christiana*
Art Editor: *Xiaohong Zhu*
Manufacturing Manager: *Alexis Heydt-Long*
Manufacturing Buyer: *Lisa McDowell*
Senior Marketing Manager: *Holly Stark*

QUINTA EDICIÓN 2008

D.R. © 2008 por Pearson Educación de México, S.A. de C.V.
Atlacomulco 500, 5° piso
Col. Industrial Atoto
53519 Naucalpan de Juárez, Edo. de México
E-mail: editorial.universidades@pearsoned.com

Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana. Reg. Núm. 1031.

Prentice Hall es una marca registrada de Pearson Educación de México, S.A. de C.V.

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de esta publicación pueden reproducirse, registrarse o transmitirse, por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea electrónico, mecánico, fotoquímico, magnético o electroóptico, por fotocopia, grabación o cualquier otro, sin permiso previo por escrito del editor.

El préstamo, alquiler o cualquier otra forma de cesión de uso de este ejemplar requerirá también la autorización del editor o de sus representantes.



ISBN 10: 970-26-1026-5
ISBN 13: 978-970-26-1026-7

Impreso en México. *Printed in Mexico.*

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 - 11 10 09 08

a una hermana especial

Mari Yegiyayan

con gratitud

y a

una maravillosa hija

Carly Petronis Schmid

CONTENIDO

Prefacio xxiii

Acerca de los autores xxvii

Introducción general 1

I.1 ¿Qué es la manufactura? 1
I.2 El proceso de diseño del producto y la ingeniería concurrente 11
I.3 Diseño para manufactura, ensamble, desensamble y servicio 14
I.4 Selección de materiales 16
I.5 Selección de procesos de manufactura 19
I.6 Diseño y manufactura consciente del medio ambiente 32
I.7 Manufactura integrada por computadora 33
I.8 Producción esbelta y manufactura ágil 37
I.9 Aseguramiento de la calidad y administración de la calidad total 38
I.10 Competitividad global y costos de manufactura 39
I.11 Tendencias generales en la manufactura 41

Parte I: Fundamentos de materiales: comportamiento y propiedades de manufactura 43

1 La estructura de los metales 46

1.1 Introducción 46
1.2 Estructura cristalina de los metales 47
1.3 Deformación y resistencia de los monocristales 50
1.4 Granos y límites de granos 54
1.5 Deformación plástica de los metales policristalinos 57
1.6 Recuperación, recristalización y crecimiento de grano 58
1.7 Trabajado en frío, a temperatura media y en caliente 60

Resumen 61 *Términos clave* 61 *Bibliografía* 62
Preguntas de repaso 62 *Problemas cualitativos* 62
Problemas cuantitativos 63 *Síntesis, diseño y proyectos* 63

2 Comportamiento mecánico, ensayos y propiedades de manufactura de los materiales 64

2.1 Introducción 64
2.2 Tensión 65
2.3 Compresión 76

2.4 Torsión 78
2.5 Flexión 78
2.6 Dureza 79
2.7 Fatiga 83
2.8 Termofluencia 86
2.9 Impacto 87
2.10 Falla y fractura de los materiales en la manufactura y servicio 87
2.11 Esfuerzos residuales 94
2.12 Trabajo, calor y temperatura 96
Resumen 97 Términos clave 98 Bibliografía 98
Preguntas de repaso 98 Problemas cualitativos 99
Problemas cuantitativos 99 Síntesis, diseño y proyectos 101

3 Propiedades físicas de los materiales 102

3.1 Introducción 102
3.2 Densidad 103
3.3 Punto de fusión 106
3.4 Calor específico 106
3.5 Conductividad térmica 107
3.6 Dilatación térmica 107
3.7 Propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas 108
3.8 Resistencia a la corrosión 109
Resumen 111 Términos clave 111 Bibliografía 112
Preguntas de repaso 112 Problemas cualitativos 112
Problemas cuantitativos 112 Síntesis, diseño y proyectos 113

4 Aleaciones metálicas: estructura y reforzamiento mediante tratamiento térmico 114

4.1 Introducción 114
4.2 Estructura de las aleaciones 115
4.3 Diagramas de fase 118
4.4 El sistema hierro-carbono 121
4.5 Diagrama de fases hierro-carburo de hierro y el desarrollo de microestructuras en los aceros 123
4.6 Hierros fundidos 125
4.7 Tratamiento térmico de las aleaciones ferrosas 127
4.8 Templabilidad de las aleaciones ferrosas 132
4.9 Tratamiento térmico de las aleaciones no ferrosas y los aceros inoxidables 134
4.10 Endurecimiento superficial 136
4.11 Recocido 137
4.12 Hornos y equipo para tratamiento térmico 142
4.13 Consideraciones de diseño para el tratamiento térmico 144
Resumen 145 Términos clave 145 Bibliografía 146
Preguntas de repaso 146 Problemas cualitativos 146
Problemas cuantitativos 147 Síntesis, diseño y proyectos 147

5 Metales y aleaciones ferrosas: producción, propiedades generales y aplicaciones 149

5.1 Introducción 149
5.2 Producción de hierro y acero 150
5.3 Fundición de lingotes 153
5.4 Colada continua 154
5.5 Aceros al carbono y aleados 156
5.6 Aceros inoxidables 161
5.7 Aceros para matrices y herramentales 163
Resumen 165 Términos clave 166 Bibliografía 166
Preguntas de repaso 166 Problemas cualitativos 167
Problemas cuantitativos 167 Síntesis, diseño y proyectos 168

6 Metales y aleaciones no ferrosas: producción, propiedades generales y aplicaciones 169

6.1 Introducción 169
6.2 Aluminio y sus aleaciones 170
6.3 Magnesio y sus aleaciones 174
6.4 Cobre y sus aleaciones 176
6.5 Níquel y sus aleaciones 178
6.6 Superaleaciones 179
6.7 Titanio y sus aleaciones 180
6.8 Metales y aleaciones refractarias 181
6.9 Berilio 183
6.10 Zirconio 183
6.11 Aleaciones de baja fusión 183
6.12 Metales preciosos 185
6.13 Aleaciones con memoria de forma 185
6.14 Aleaciones amorfas (vidrios metálicos) 186
6.15 Espumas metálicas 186
6.16 Nanomateriales 186
Resumen 187 Términos clave 188 Bibliografía 188
Preguntas de repaso 188 Problemas cualitativos 189
Problemas cuantitativos 189 Síntesis, diseño y proyectos 190

7 Polímeros: estructura, propiedades generales y aplicaciones 191

7.1 Introducción 191
7.2 Estructura de los polímeros 193
7.3 Termoplásticos 202
7.4 Plásticos termofijos 206
7.5 Aditivos en plásticos 207
7.6 Propiedades generales y aplicaciones de los termoplásticos 208

7.7 Propiedades generales y aplicaciones de los plásticos termofijos 211
7.8 Plásticos biodegradables 212
7.9 Elastómeros (hules) 214
Resumen 215 Términos clave 216 Bibliografía 216
Preguntas de repaso 217 Problemas cualitativos 217
Problemas cuantitativos 218 Síntesis, diseño y proyectos 218

8 Cerámicos, grafito y diamante: estructura, propiedades generales y aplicaciones 219

8.1 Introducción 219
8.2 Estructura de los cerámicos 220
8.3 Propiedades generales y aplicaciones de los cerámicos 224
8.4 Vidrios 229
8.5 Cerámicos vidriados 231
8.6 Grafito 232
8.7 Diamante 233
Resumen 234 Términos clave 235 Bibliografía 235
Preguntas de repaso 235 Problemas cualitativos 236
Problemas cuantitativos 236 Síntesis, diseño y proyectos 237

9 Materiales compósitos: estructura, propiedades generales y aplicaciones 238

9.1 Introducción 238
9.2 Estructura de los plásticos reforzados 239
9.3 Propiedades de los plásticos reforzados 244
9.4 Aplicaciones de los plásticos reforzados 248
9.5 Compósitos de matriz metálica 251
9.6 Compósitos de matriz cerámica 253
9.7 Otros compósitos 254
Resumen 254 Términos clave 255 Bibliografía 255
Preguntas de repaso 255 Problemas cualitativos 256
Problemas cuantitativos 257 Síntesis, diseño y proyectos 257

Parte II: Procesos y equipo para la fundición de metales 259

10 Fundamentos de la fundición de metales 261

10.1 Introducción 261
10.2 Solidificación de los metales 262
10.3 Flujo del fluido 267
10.4 Fluidez del metal fundido 270

10.5 Transferencia de calor 272
10.6 Defectos 275
Resumen 281 Términos clave 281 Bibliografía 282
Preguntas de repaso 282 Problemas cualitativos 282
Problemas cuantitativos 283 Síntesis, diseño y proyectos 284

11 Procesos de fundición de metales 285

11.1 Introducción 285
11.2 Procesos de fundición de molde desechable 287
11.3 Procesos de fundición en molde permanente 303
11.4 Técnicas de fundición para componentes monocristalinos 312
11.5 Solidificación rápida 314
11.6 Inspección de las fundiciones 314
11.7 Prácticas y hornos para fusión 315
11.8 Talleres de fundición y su automatización 316
Resumen 317 Términos clave 318 Bibliografía 318
Preguntas de repaso 319 Problemas cualitativos 319
Problemas cuantitativos 320 Síntesis, diseño y proyectos 321

12 Fundición de metales: diseño, materiales y economía 323

12.1 Introducción 323
12.2 Consideraciones de diseño en la fundición 323
12.3 Aleaciones para fundición 332
12.4 Economía de la fundición 337
Resumen 339 Términos clave 339 Bibliografía 339
Preguntas de repaso 340 Problemas cualitativos 340
Problemas cuantitativos 341 Síntesis, diseño y proyectos 341

Parte III: Procesos y equipo de formado y moldeado 344

13 Laminación de metales 347

13.1 Introducción 347
13.2 Proceso de laminación plana 349
13.3 Práctica de laminación plana 354
13.4 Molinos de laminación 358
13.5 Diversos procesos y molinos de laminación 360
Resumen 368 Términos clave 368 Bibliografía 369
Preguntas de repaso 369 Problemas cualitativos 369
Problemas cuantitativos 370 Síntesis, diseño y proyectos 370

14 Forjado de metales 371

14.1 Introducción 371
14.2 Forjado de matriz abierta 373
14.3 Forjado por matriz de impresión y de matriz cerrada 376
14.4 Diversas operaciones de forjado 380
14.5 Forjabilidad de los metales. Defectos del forjado 384
14.6 Diseño de matrices, materiales para matrices y lubricación 387
14.7 Métodos de manufactura de matrices. Fallas en las matrices 388
14.8 Máquinas para forjado 390
14.9 Economía del forjado 392
Resumen 396 Términos clave 396 Bibliografía 396
Preguntas de repaso 397 Problemas cualitativos 397
Problemas cuantitativos 398 Síntesis, diseño y proyectos 398

15 Extrusión y estirado (trefilado) de metales 400

15.1 Introducción 400
15.2 El proceso de extrusión 402
15.3 Extrusión en caliente 405
15.4 Extrusión en frío 409
15.5 Defectos de la extrusión 413
15.6 Equipo para extrusión 414
15.7 El proceso de estirado (trefilado) 415
15.8 Práctica de estirado 416
15.9 Defectos del estirado y esfuerzos residuales 419
15.10 Equipo para estirado 419
Resumen 420 Términos clave 421 Bibliografía 421
Preguntas de repaso 421 Problemas cualitativos 422
Problemas cuantitativos 422 Síntesis, diseño y proyectos 423

16 Proceso de formado de hojas metálicas 424

16.1 Introducción 424
16.2 Cizallado 425
16.3 Características y formabilidad de las hojas metálicas 435
16.4 Pruebas de formabilidad para hojas metálicas 437
16.5 Doblado de hojas, placas y tubos 440
16.6 Operaciones diversas de doblado y otras relacionadas 445
16.7 Embutido profundo 451
16.8 Formado con hule 460
16.9 Rechazado 461

16.10 Formado superplástico 463
16.11 Procesos especializados de formado 465
16.12 Manufactura de estructuras metálicas tipo panal 470
16.13 Consideraciones de diseño en el formado de hojas metálicas 471
16.14 Prensas de formado de hojas metálicas 474
16.15 Economía de las operaciones de formado de hojas metálicas 476
Resumen 477 Términos clave 478 Bibliografía 478
Preguntas de repaso 479 Problemas cualitativos 479
Problemas cuantitativos 480 Síntesis, diseño y proyectos 481

17 Procesamiento de los polvos metálicos 483

17.1 Introducción 483
17.2 Producción de polvos metálicos 484
17.3 Compactación de los polvos metálicos 490
17.4 Sinterizado 499
17.5 Operaciones secundarias y de acabado 503
17.6 Consideraciones de diseño 505
17.7 Capacidades del proceso 508
17.8 Economía de la metalurgia de polvos 508
Resumen 509 Términos clave 510 Bibliografía 510
Preguntas de repaso 510 Problemas cualitativos 511
Problemas cuantitativos 511 Síntesis, diseño y proyectos 512

18 Procesamiento de cerámicos, vidrio y superconductores 513

18.1 Introducción 513
18.2 Moldeado de cerámicos 514
18.3 Formado y moldeado de vidrio 521
18.4 Técnicas para reforzamiento y recocido del vidrio 525
18.5 Consideraciones de diseño para cerámicos y vidrios 528
18.6 Procesamiento de superconductores 529
Resumen 530 Términos clave 531 Bibliografía 531
Preguntas de repaso 532 Problemas cualitativos 532
Problemas cuantitativos 533 Síntesis, diseño y proyectos 533

19 Formado y moldeo de plásticos y materiales compósitos 534

19.1 Introducción 534
19.2 Extrusión 536
19.3 Moldeo por inyección 544

19.4 Moldeo por soplado 552
19.5 Rotomoldeo 554
19.6 Termoformado 555
19.7 Moldeo por compresión 556
19.8 Moldeo por transferencia 557
19.9 Colado 558
19.10 Moldeo de espuma 559
19.11 Formado en frío y formado de fase sólida 560
19.12 Procesamiento de elastómeros 561
19.13 Procesamiento de compósitos de matriz polimérica 562
19.14 Procesamiento de compósitos de matriz metálica y de matriz cerámica 570
19.15 Consideraciones de diseño 572
19.16 Economía del procesamiento de plásticos y materiales compósitos 574
Resumen 575 Términos clave 575 Bibliografía 576
Preguntas de repaso 577 Problemas cualitativos 577
Problemas cuantitativos 578 Síntesis, diseño y proyectos 578

20 Operaciones de producción de prototipos rápidos 580

20.1 Introducción 580
20.2 Procesos sustractivos 582
20.3 Procesos aditivos 583
20.4 Producción de prototipos virtuales 594
20.5 Manufactura directa y fabricación rápida de herramentales 594
Resumen 599 Términos clave 600 Bibliografía 600
Preguntas de repaso 600 Problemas cualitativos 601
Problemas cuantitativos 601 Síntesis, diseño y proyectos 601

Parte IV: Procesos de maquinado y máquinas herramienta 603

21 Fundamentos del maquinado 607

21.1 Introducción 607
21.2 Mecánica del corte 609
21.3 Fuerzas y potencia de corte 620
21.4 Temperaturas en el corte 623
21.5 Vida útil de la herramienta: desgaste y falla 626
21.6 Acabado superficial e integridad 635
21.7 Maquinabilidad 638
Resumen 642 Términos clave 642 Bibliografía 643
Preguntas de repaso 643 Problemas cualitativos 644
Problemas cuantitativos 644 Síntesis, diseño y proyectos 645

22 Materiales para herramientas de corte y fluidos de corte 647

22.1 Introducción 647
22.2 Aceros de alta velocidad 652
22.3 Aleaciones de cobalto fundido 653
22.4 Carburos 653
22.5 Herramientas recubiertas 656
22.6 Cerámicos base alúmina 661
22.7 Nitruro de boro cúbico 662
22.8 Cerámicos base nitruro de silicio 663
22.9 Diamante 663
22.10 Materiales para herramientas reforzados con triquitas 664
22.11 Costos y reacondicionamiento de las herramientas 664
22.12 Fluidos de corte 665
Resumen 670 Términos clave 670 Bibliografía 671
Preguntas de repaso 671 Problemas cualitativos 671
Problemas cuantitativos 672 Síntesis, diseño y proyectos 673

23 Procesos de maquinado utilizados para producir formas redondas: torneado y producción de orificios 674

23.1 Introducción 674
23.2 Proceso de torneado 676
23.3 Tornos y operaciones en el torno 686
23.4 Mandrinado y máquinas para mandrinar 703
23.5 Taladrado, brocas y taladros 704
23.6 Rimado y rimas 714
23.7 Machueleado y machuelos 716
Resumen 718 Términos clave 719 Bibliografía 719
Preguntas de repaso 720 Problemas cualitativos 720
Problemas cuantitativos 721 Síntesis, diseño y proyectos 721

24 Procesos de maquinado utilizados para producir diferentes formas: fresado, brochado, aserrado y limado; manufactura de engranes 723

24.1 Introducción 723
24.2 Fresado y fresadoras 724
24.3 Cepillado 741
24.4 Brochado y brochadoras 742
24.5 Aserrado 745

24.6 Limado 748
24.7 Manufactura de engranes mediante maquinado 749
Resumen 756 Términos clave 756 Bibliografía 756
Preguntas de repaso 757 Problemas cualitativos 757
Problemas cuantitativos 758 Síntesis, diseño y proyectos 758

25 Centros de maquinado, conceptos y estructuras de maquinado avanzado y economía del maquinado 760

25.1 Introducción 760
25.2 Centros de maquinado 761
25.3 Estructuras de las máquinas herramienta 770
25.4 Vibración y traqueteo en las operaciones de maquinado 775
25.5 Maquinado de alta velocidad 778
25.6 Maquinado duro 781
25.7 Maquinado de ultraprecisión 782
25.8 Economía del maquinado 783
Resumen 786 Términos clave 787 Bibliografía 787
Preguntas de repaso 787 Problemas cualitativos 788
Problemas cuantitativos 788 Síntesis, diseño y proyectos 789

26 Operaciones de maquinado abrasivo y de acabado 790

26.1 Introducción 790
26.2 Abrasivos y abrasivos aglutinados 792
26.3 Proceso de rectificado 798
26.4 Operaciones de rectificado y rectificadoras 808
26.5 Consideraciones de diseño para el rectificado 818
26.6 Maquinado ultrasónico 818
26.7 Operaciones de acabado 820
26.8 Operaciones de rebabeo 825
26.9 Economía de las operaciones de maquinado abrasivo y de acabado 828
Resumen 829 Términos clave 830 Bibliografía 830
Preguntas de repaso 831 Problemas cualitativos 831
Problemas cuantitativos 832 Síntesis, diseño y proyectos 833

27 Procesos de maquinado avanzado 835

27.1 Introducción 835
27.2 Maquinado químico 836
27.3 Maquinado electroquímico 841
27.4 Rectificación electroquímica 845
27.5 Maquinado por descarga eléctrica (electroerosinado) 846

27.6 Maquinado por rayo láser 851
27.7 Maquinado por haz de electrones 854
27.8 Maquinado por chorro de agua 855
27.9 Maquinado por chorro abrasivo 858
27.10 Economía de los procesos de maquinado avanzado 858
Resumen 861 Términos clave 861 Bibliografía 862
Preguntas de repaso 862 Problemas cualitativos 862
Problemas cuantitativos 863 Síntesis, diseño y proyectos 863

Parte V: Fabricación de dispositivos microelectrónicos y micromanufactura 865

28 Fabricación de dispositivos microelectrónicos 868

28.1 Introducción 868
28.2 Cuartos limpios 871
28.3 Silicio y semiconductores 872
28.4 Crecimiento de cristales y preparación de obleas 874
28.5 Deposición de película 875
28.6 Oxidación 877
28.7 Litografía 878
28.8 Ataque (grabado) 885
28.9 Difusión e implantación de iones 893
28.10 Metalización y prueba 895
28.11 Unión de cables y empaque 897
28.12 Rendimiento y confiabilidad 900
28.13 Tarjetas de circuitos impresos 901
Resumen 903 Términos clave 903 Bibliografía 904
Preguntas de repaso 905 Problemas cualitativos 905
Problemas cuantitativos 906 Síntesis, diseño y proyectos 907

29 Fabricación de dispositivos y sistemas microelectromecánicos (MEMS)

29.1 Introducción 908
29.2 Micromaquinado de los dispositivos MEMS 909
29.3 Proceso de microfabricación LIGA 920
29.4 Fabricación sin materia sólida de dispositivos 927
Resumen 932 Términos clave 933 Bibliografía 933
Preguntas de repaso 934 Problemas cualitativos 934
Problemas cuantitativos 935 Síntesis, diseño y proyectos 935

Parte VI: Procesos y equipo para unión 936

30 Procesos de soldadura por fusión 940

30.1 Introducción 940
30.2 Soldadura con oxígeno y combustible gaseosos 941
30.3 Procesos de soldadura por arco: electrodo no consumible 944
30.4 Procesos de soldadura por arco: electrodo consumible 948
30.5 Electrodos para soldadura por arco 954
30.6 Soldadura por haz de electrones 956
30.7 Soldadura por rayo láser 956
30.8 Corte 958
30.9 Unión soldada, calidad y pruebas 960
30.10 Diseño de la unión y selección del proceso 971
Resumen 975 Términos clave 975 Bibliografía 976
Preguntas de repaso 976 Problemas cualitativos 977
Problemas cuantitativos 978 Síntesis, diseño y proyectos 978

31 Procesos de soldadura de estado sólido 980

31.1 Introducción 980
31.2 Soldadura en frío y unión por laminación 981
31.3 Soldadura ultrasónica 982
31.4 Soldadura por fricción 983
31.5 Soldadura por resistencia 986
31.6 Soldadura por explosión 995
31.7 Unión por difusión 996
31.8 Economía de las operaciones de soldadura 998
Resumen 999 Términos clave 1000 Bibliografía 1000
Preguntas de repaso 1000 Problemas cualitativos 1001
Problemas cuantitativos 1001 Síntesis, diseño y proyectos 1002

32 Procesos de soldadura fuerte, blanda, unión con adhesivos y sujeción mecánica 1003

32.1 Introducción 1003
32.2 Soldadura fuerte 1004
32.3 Soldadura blanda 1009
32.4 Unión con adhesivos 1014
32.5 Sujeción mecánica 1023
32.6 Unión de plásticos, cerámicos y vidrios 1027
32.7 Economía de las operaciones de unión 1030
Resumen 1031 Términos clave 1031 Bibliografía 1031
Preguntas de repaso 1032 Problemas cualitativos 1032
Problemas cuantitativos 1033 Síntesis, diseño y proyectos 1033

Parte VII: Tecnología de superficies 1034

33 Rugosidad y medición superficial; fricción, desgaste y lubricación 1036

33.1 Introducción 1036
33.2 Estructura e integridad superficial 1037
33.3 Textura y rugosidad superficial 1038
33.4 Fricción 1043
33.5 Desgaste 1046
33.6 Lubricación 1050
33.7 Fluidos para el trabajo de los metales y su selección 1052
Resumen 1055 Términos clave 1056 Bibliografía 1057
Preguntas de repaso 1057 Problemas cualitativos 1057
Problemas cuantitativos 1058 Síntesis, diseño y proyectos 1058

34 Tratamientos, recubrimientos y limpieza de las superficies 1059

34.1 Introducción 1059
34.2 Tratamientos superficiales mecánicos 1060
34.3 Deposición y revestimiento mecánico 1062
34.4 Endurecimiento superficial y recubrimiento duro 1062
34.5 Rociado térmico 1063
34.6 Deposición de vapor 1065
34.7 Implantación de iones y recubrimiento por difusión 1068
34.8 Tratamientos láser 1068
34.9 Electrodeposición, deposición sin electricidad y electroformado 1069
34.10 Recubrimientos de conversión 1073
34.11 Inmersión en caliente 1074
34.12 Esmaltado de porcelana; recubrimientos cerámicos y orgánicos 1075
34.13 Recubrimiento de diamante y carbono similar al diamante 1076
34.14 Texturizado superficial 1077
34.15 Pintura 1077
34.16 Limpieza de superficies 1078
Resumen 1080 Términos clave 1080 Bibliografía 1080
Preguntas de repaso 1081 Problemas cualitativos 1081
Problemas cuantitativos 1082 Síntesis, diseño y proyectos 1082

Parte VIII: Aspectos comunes de la manufactura 1084

35 Metrología e instrumentación en ingeniería 1085

35.1 Introducción 1085
35.2 Patrones de medición 1086
35.3 Características geométricas de las partes, mediciones analógicas y digitales 1087

35.4 Métodos e instrumentos tradicionales de medición 1089
35.5 Instrumentos y máquinas modernas de medición 1096
35.6 Medición automatizada 1100
35.7 Características generales y selección de instrumentos de medición 1101
35.8 Dimensionamiento y tolerancias geométricas 1101
Resumen 1107 Términos clave 1107 Bibliografía 1108
Preguntas de repaso 1108 Problemas cualitativos 1108
Problemas cuantitativos 1109 Síntesis, diseño y proyectos 1109

36 Aseguramiento de la calidad, prueba e inspección 1110

36.1 Introducción 1110
36.2 Calidad del producto 1111
36.3 Aseguramiento de la calidad 1112
36.4 Administración de la calidad total 1113
36.5 Métodos Taguchi 1114
36.6 Las normas ISO y QS 1119
36.7 Métodos estadísticos de control de calidad 1121
36.8 Control estadístico de proceso 1124
36.9 Confiabilidad de productos y procesos 1131
36.10 Ensayos no destructivos 1132
36.11 Ensayos destructivos 1136
36.12 Inspección automatizada 1137
Resumen 1137 Términos clave 1138 Bibliografía 1138
Preguntas de repaso 1139 Problemas cualitativos 1140
Problemas cuantitativos 1140 Síntesis, diseño y proyectos 1141

Parte IX: Manufactura en un ambiente competitivo 1142

37 Automatización de los procesos de manufactura 1144

37.1 Introducción 1144
37.2 Automatización 1146
37.3 Control numérico 1153
37.4 Control adaptable 1161
37.5 Manejo y movimiento de materiales 1163
37.6 Robots industriales 1165
37.7 Tecnología de sensores 1171
37.8 Soportes flexibles 1176
37.9 Sistemas de ensamble 1180

37.10 Consideraciones de diseño para soportes fijos, ensamble, desensamble y servicio 1183
37.11 Consideraciones económicas 1186
Resumen 1187 Términos clave 1187 Bibliografía 1188
Preguntas de repaso 1189 Problemas cualitativos 1189
Síntesis, diseño y proyectos 1189

38 Manufactura asistida por computadora 1191

38.1 Introducción 1191
38.2 Sistemas de manufactura 1191
38.3 Manufactura integrada por computadora 1192
38.4 Diseño e ingeniería asistidos por computadora 1195
38.5 Manufactura asistida por computadora 1203
38.6 Planeación de procesos asistidos por computadora 1204
38.7 Simulación por computadora de procesos y sistemas de manufactura 1206
38.8 Tecnología de grupos 1208
Resumen 1215 Términos clave 1215 Bibliografía 1216
Preguntas de repaso 1216 Problemas cualitativos 1216
Síntesis, diseño y proyectos 1217

39 Sistemas de manufactura integrados por computadora 1218

39.1 Introducción 1218
39.2 Manufactura celular 1219
39.3 Sistemas flexibles de manufactura 1221
39.4 Manufactura holónica 1224
39.5 Producción justo a tiempo 1225
39.6 Manufactura esbelta 1227
39.7 Redes de comunicaciones en manufactura 1228
39.8 Inteligencia artificial 1230
39.9 Consideraciones económicas 1233
Resumen 1234 Términos clave 1234 Bibliografía 1235
Preguntas de repaso 1236 Problemas cualitativos 1236
Síntesis, diseño y proyectos 1236

40 Diseño de productos y selección de procesos en un ambiente competitivo 1238

40.1 Introducción 1238
40.2 Diseño del producto 1239
40.3 Calidad del producto y expectativa de vida 1242

40.4 Evaluación e ingeniería del ciclo de vida: manufactura sustentable 1244
40.5 Selección de materiales para productos 1246
40.6 Sustitución de materiales 1250
40.7 Capacidades de procesos de manufactura 1253
40.8 Selección de procesos 1257
40.9 Costos de manufactura y reducción de costos 1261
Resumen 1269 Términos clave 1269 Bibliografía 1269
Preguntas de repaso 1271 Problemas cualitativos 1271
Síntesis, diseño y proyectos 1272

Índice 1278

Estudio de casos

11.1: Fundición a la espuma perdida de monobloques para motores 299
13.1: Manufactura de segmentos de cubierta de un motor cohete sólido para un transbordador espacial 366
14.1: Manufactura de un perno escalonado mediante cabeceado y penetrado 382
14.2: Componentes de la suspensión del automóvil Lotus Elise 394
16.1: Manufactura de platillos musicales 468
18.1: Producción de cintas superconductoras de alta temperatura 529
19.1: Prótesis de cadera EPOCH 547
20.1: Alineadores ortodóncicos Invisalign 595
23.1: Retenedor de tornillo para huesos 717
25.1: Maquinado en seco de alta velocidad de motores de hierro fundido 779
27.1: Maquinado electroquímico de un implante biomédico 843
27.2: Manufactura de “stents” 858
29.1: Acelerómetro para bolsas de aire automotrices 928
32.1: Curado mediante luz de adhesivos acrílicos para productos médicos 1020
36.1: Manufactura de televisores por Sony Corporation 1118
36.2: Control dimensional de partes de plástico en los automóviles Saturn 1129
37.1: Desarrollo de un soporte fijo modular 1178
38.1: Desarrollo de modelos CAD para componentes automovilísticos 1199
40.1: Ingeniería concurrente para contenedores de solución intravenosa 1267

PREFACIO

La ciencia, ingeniería y tecnología de los procesos y sistemas de manufactura continúan avanzando con rapidez a escala global y con un efecto importante en las economías de todas las naciones. Al preparar esta quinta edición, nuestra meta ha sido presentar un libro de texto completo y avanzado sobre ingeniería y tecnología de manufactura, con objetivos adicionales para motivar y retar a los alumnos a que estudien esta importante disciplina.

Al igual que en las cuatro ediciones anteriores, el texto presenta temas con una cobertura equilibrada de fundamentos relevantes y prácticas reales para ayudar a los estudiantes a desarrollar y comprender las relaciones, con frecuencia complejas, entre los muchos factores técnicos y económicos involucrados en la manufactura.

Aunque esta nueva edición sigue básicamente la misma naturaleza introductoria, el formato y la organización de la cuarta edición, ahora pone un mayor énfasis en: *a)* la influencia de los materiales y los parámetros de procesamiento en la comprensión de los procesos y las operaciones individuales; *b)* las consideraciones de diseño, calidad del producto y costos de manufactura; y *c)* el contexto competitivo global de cada proceso y operación de manufactura, resaltado con numerosos ejemplos ilustrativos y monografías.

Lo nuevo en esta edición

Una comparación detallada con la cuarta edición mostrará que se han realizado literalmente miles de cambios para mejorar la calidad y profundidad de los numerosos temas cubiertos.

- Como guía general para el estudiante, ahora cada capítulo comienza con una breve descripción de los objetivos del capítulo, los temas por tratar y su relevancia. En donde se consideró apropiado, se incluyó una lista relativa a las partes típicas producidas mediante los procesos descritos en el capítulo, así como los métodos alternativos para producir las mismas.
- Se modificó completamente la mayoría de las ilustraciones para mejorar el impacto gráfico y la claridad, y se agregó una gran cantidad de fotografías nuevas.
- Incluye dos capítulos relativos a los temas de dispositivos microelectrónicos y microelectromecánicos y sistemas de manufactura, incluyendo el MEMS.
- Ahora existen alrededor de 120 ejemplos y diversos estudios de caso, todos ellos resaltados.
- Se actualizaron las preguntas y los problemas de cada capítulo, de los cuales aproximadamente 20% son nuevos en esta edición. Asimismo, la última sección de preguntas y problemas ahora se denomina "Síntesis, diseño y proyectos" a fin de reflejar mejor el énfasis mayor en estos temas a lo largo del libro.
- El texto tiene más referencias cruzadas con otras secciones, capítulos, tablas y figuras importantes del libro.
- Se actualizaron totalmente las bibliografías al final de cada capítulo.

Auxiliares para el estudio

- Cada tema se presenta en un contexto mucho mayor de ingeniería y tecnología para la manufactura, utilizando varios diagramas de flujo y diagramas esquemáticos en donde se consideró apropiado.
- Se enfatizan continuamente los usos prácticos de los conceptos descritos y de la información presentada.

- Se trató de proporcionar analogías, discusiones y problemas diseñados para estimular el estudio y la curiosidad del alumno acerca de los productos industriales y de consumo y cómo se fabrican, en tanto que se minimizan los costos de producción.
- Se presenta un gran número de datos y materiales de referencia, incluyendo numerosas tablas, ilustraciones, gráficas y bibliografías.
- Se incluyeron varios ejemplos y nuevos estudios de caso para resaltar conceptos y técnicas importantes en la manufactura.
- Numerosas tablas comparan las ventajas, así como las limitaciones, de procesos competitivos importantes de manufactura.
- Se incluyen un resumen y una lista de términos clave de cada capítulo para ayudar y recordar a los estudiantes los temas cubiertos en cada uno de ellos.

A quién va dirigido

Al igual que en las ediciones anteriores, esta quinta edición se escribió para estudiantes de programas de ingeniería mecánica, de manufactura, industrial, biomédica, aeroespacial y metalúrgica y de materiales. Se espera que al leer y estudiar este libro, los alumnos puedan apreciar la naturaleza vital de la ingeniería y la tecnología de manufactura, y descubran una materia tan apasionante y desafiante como muchas otras disciplinas.

Agradeceríamos cualquier comentario de los profesores y de los estudiantes en relación con cualquier sugerencia acerca de la gran cantidad de temas presentados, o sobre cualquier error que pudiera haber escapado a nuestra atención durante la preparación de este texto.

Sitio Web (www.pearsoneducacion.net/kalpakjian)

Este sitio ofrece al profesor la posibilidad de descargar el manual de soluciones y presentaciones en PowerPoint (en inglés). Los profesores deberán solicitar un código de acceso al representante de Pearson en su localidad o seguir el procedimiento de registro indicado en la página Web.

CourseCompass

CourseCompass es una plataforma para cursos en línea que Pearson Educación ofrece como apoyo para sus libros de texto. Este libro cuenta con un curso precargado en *CourseCompass*, que incluye lecturas en PowerPoint, recursos para el profesor, manual de soluciones, proyectos para tareas y *Test Gen* (generador de exámenes).

Agradecimientos

Este libro, junto con sus ediciones anteriores, representa un total de aproximadamente 20 años de esfuerzo. No podría haber sido escrito y producido sin la ayuda de numerosos colegas y estudiantes anteriores. Nos da mucho gusto agradecer la ayuda de las siguientes personas en la preparación y publicación de esta quinta edición: K. E. McKee, del Illinois Institute of Technology; K. J. Weinmann, de la Michigan Technological University; P. J. Guichelaar, de la Western Michigan University; Z. Liang, de Indiana University y Purdue University, Fort Wayne, y R. Abella, de la Universidad de Toledo. También reconocemos a Kent M. Kalpakjian como el autor original del capítulo sobre fabricación de dispositivos microelectrónicos.

Deseamos agradecer a nuestros editores, Dorothy Marrero y Eric Svendsen, de Prentice Hall, por su entusiasta apoyo y guía; a Rose Kernan, por su meticulosa supervisión editorial y de producción y por el diseño interior de este libro, así como a Xiaohong Zhu, por la elaboración de todas las ilustraciones nuevas.

Nos complace presentar la siguiente lista con todas las personas que de una manera u otra, realizaron diversas contribuciones a esta y a las ediciones anteriores del libro:

B. J. Aaronson
S. Arellano
R. A. Arlt
V. Aronov
A. Bagchi
E. D. Baker
J. Barak
J. Ben-Ari
G. F. Benedict
S. Bhattacharyya
J. T. Black
C. Blathras
G. Boothroyd
D. Bourell
B. Bozak
N. N. Breyer
C. A. Brown
R. G. Bruce
J. Cesarone
T.-C. Chang
R. L. Cheaney
A. Cheda
S. Chelikani
S.-W. Choi
A. Cinar
R. O. Colantonio
P. Cotnoir
P. Courtney
P. Demers
D. Descoteaux
M. F. DeVries
R. C. Dix
M. Dollar
D. A. Dornfeld
H. I. Douglas
M. Dugger
D. R. Durham
D. Duvall
S. A. Dynan
J. El Gomayel
M. G. Elliott
E. C. Feldy
J. Field
G. W. Fischer
D. A. Fowley
R. L. French
B. R. Fruchter
D. Furrer
R. Giese
E. Goode
K. Graham
P. Grigg
B. Harriger
D. Harry
M. Hawkins
R. J. Hocken
E. M. Honig, Jr.
S. Imam
R. Jaeger
C. Johnson
K. Jones
D. Kalisz
J. Kamman
S. G. Kapoor
R. Kassing
R. L. Kegg
W. J. Kennedy
B. D. King
J. E. Kopf
R. J. Koronkowski
J. Kotowski
S. Krishnamachari
K. M. Kulkarni
T. Lach
L. Langseth
M. Levine
B. S. Levy
X. Z. Li
B. W. Lilly
D. A. Lucca
L. Mapa
A. Marsan
R. J. Mattice
C. Maziar
T. McClelland
L. McGuire
K. E. McKee
K. P. Meade
R. Miller
T. S. Milo
S. Mostovoy
C. Nair
P. G. Nash
J. Nazemetz
E. M. Odom
S. J. Parelukar
J. Penaluna
C. Petronis
M. Philpott
J. M. Prince
W. J. Riffe
R. J. Rogalla
A. A. Runyan
G. S. Saletta
M. Salimian
M. Savic
W. J. Schoech
S. A. Schwartz
M. T. Siniawski
J. E. Smallwood
J. P. Sobczak
L. Soisson
J. Stocker
L. Strom
A. B. Strong
K. Subramanian
T. Sweeney
W. G. Switalski
T. Taglialavore
M. Tarabishy
K. S. Taraman
R. Taylor
B. S. Thakkar
A. Trager
C. Tszang
S. Vaze
J. Vigneau
G. A. Volk
G. Wallace
K. J. Weinmann
R. Wertheim
K. West
J. Widmoyer
K. Williams
G. Williamson
B. Wiltjer
J. Wingfield
P. K. Wright

Agradecemos a las diversas organizaciones que nos proporcionaron muchas ilustraciones y estudios de casos. Estas contribuciones se destacan específicamente a lo largo del texto.

Finalmente, agradecemos mucho a Margaret Jean Kalpakjian por su ayuda durante la edición de este libro.

Serope Kalpakjian

Steven R. Schmid

Semblanza de los autores

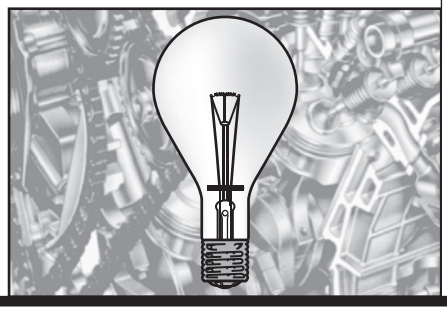
Serope Kalpakjian es profesor emérito de ingeniería mecánica y de materiales en el Illinois Institute of Technology, en Chicago. Es autor de *Mechanical Processing of Materials* (Van Nostrand, 1967) y coautor de *Lubricants and Lubrication in Metalworking Operations* (Dekker, 1985). Las dos primeras ediciones de sus libros *Manufacturing Processes for Engineering Materials* (1984) y *Manufacturing Engineering and Technology* (1989) recibieron el M. Eugene Merchant Manufacturing Textbook Award. Es autor de numerosos ensayos técnicos y artículos en manuales y enciclopedias, y ha editado varios procedimientos para conferencias. Ha sido editor y coeditor de diferentes revistas técnicas y forma parte del comité editorial de *Encyclopedia Americana*.

Entre otros premios, el profesor Kalpakjian ha recibido el Forging Industry Educational and Research Foundation Best Paper Award (1996), un Excellence Teaching Award del IIT (1970), un Centennial Medallion de ASME (1980), el International Education Award de SME (1989), un Person of the Millenium Award del IIT (1999), y el Albert Easton White Oustanding Teacher Award de ASM International (2000). Al SME Outstanding Young Manufacturing Engineer Award de 2002 se le dio su nombre. Es un asociado vitalicio de ASME, asociado y miembro vitalicio de ASM International, miembro de pleno derecho emérito de CIRP (International Institution for Production Engineering Research), y es miembro fundador y ex presidente de NAMRI/SME. Se graduó con honores en el Robert College (en Estambul) y en el Massachusetts Institute of Technology.

Steven R. Schmid es profesor asociado en el Departamento de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica en la University of Notre Dame, donde enseña y realiza investigaciones en las áreas generales de manufactura, diseño de máquinas y tribología. Recibió (con honores) el grado de licenciatura en Ingeniería Mecánica en el Illinois Institute of Technology y los grados de maestría y doctorado, ambos en Ingeniería Mecánica, en la Northwestern University. Ha recibido numerosos premios, incluyendo el John T. Parsons Award de la Society of Manufacturing Engineers (2000), el Newkirk Award de la American Society of Mechanical Engineers (2000), el Kaneb Center Teaching Award (2000 y 2003), y el Ruth and Joel Spira Award for Excellence in Teaching (2005). También recibió un National Science Foundation CAREERS Award (1996) y el ACOA Foundation Award (1994).

El doctor Schmid es autor de más de 80 ensayos técnicos, ha sido coautor de los textos *Fundamentals of Machine Elements*, *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*, y *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, y contribuyó con dos capítulos en el *CRC Handbook of Modern Tribology*. Actualmente presta sus servicios en el Tribology Division Executive Committe de la American Society of Mechanical Engineers, es editor asociado del *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, y es ingeniero profesionista e ingeniero certificado en manufactura.

Introducción general



Los objetivos de este capítulo son explicar:

- Qué es la manufactura y, con ejemplos, mostrar su papel en nuestra vida diaria.
- El proceso de diseño del producto y la importancia de la selección de materiales y procesos.
- El papel de las computadoras en todos los aspectos de la manufactura.
- Costos de manufactura y su papel en la economía global.
- Tendencias generales en la manufactura.

I.1 ¿Qué es la manufactura? 1
I.2 El proceso de diseño del producto y la ingeniería concurrente 11
I.3 Diseño para manufactura, ensamble, desensamble y servicio 14
I.4 Selección de materiales 16
I.5 Selección de procesos de manufactura 19
I.6 Diseño y manufactura consciente del medio ambiente 32
I.7 Manufactura integrada por computadora 33
I.8 Producción esbelta y manufactura ágil 37
I.9 Aseguramiento de la calidad y administración de la calidad total 38
I.10 Competitividad global y costos de manufactura 39
I.11 Tendencias generales en la manufactura 41

EJEMPLOS:

I.1 Sujetadores para papel 8
I.2 Bombillas 9
I.3 Selección de materiales para monedas de Estados Unidos 18
I.4 Selección de materiales para bates de béisbol 18
I.5 Manufactura de una prótesis de cadera 26
I.6 Manufactura de un salero y molino de pimienta 32
I.7 Aplicación de CAD/CAM para fabricar un molde de anteojos para el sol 36

I.1 ¿Qué es la manufactura?

Antes de empezar a leer esta introducción, tómese unos minutos para revisar varios objetos alrededor de usted: su reloj, el teléfono celular, la silla, una lata de refresco, los interruptores de luz, una taza de café y su computadora. Pronto advertirá que todos estos objetos y sus componentes individuales tienen diferentes formas; no los encontraría en la naturaleza tal como están en su cuarto. Se han transformado en diferentes formas a partir de materias primas y ensamblado como los productos que ahora ve.

Notará fácilmente que algunos objetos están hechos de una sola pieza, como los clavos, tornillos, tenedores, ganchos de plástico para ropa o llantas de bicicleta. Sin embargo, la mayoría de los objetos, como los motores de automóviles mostrados en la figura I.1 (inventados en 1876), las lavadoras de ropa (1910), los tostadores (1926), los aparatos de aire acondicionado (1928), los refrigeradores (1931), los bolígrafos (1938), las fotocopiadoras (1949) y miles de otros productos, se construyen mediante el ensamblado de varias partes (tabla I.1) y componentes fabricados a partir de numerosos materiales. Todos los productos mencionados se fabrican por medio de diversos procesos denominados *manufactura*.

Manufactura, en un sentido completo, es el proceso de convertir materias primas en productos. También comprende las actividades en que el propio producto fabricado se utiliza para elaborar otros productos. Los ejemplos podrían incluir a las grandes prensas que forman las hojas metálicas usadas en accesorios y carrocerías para automóviles, la maquinaria para fabricar sujetadores, como tornillos y tuercas, y las máquinas de coser ropa. El nivel de manufactura de una nación se relaciona directamente con su salud económica; por lo general, cuanto mayor es la actividad manufacturera de un país, mayor será el estándar de vida de su gente.

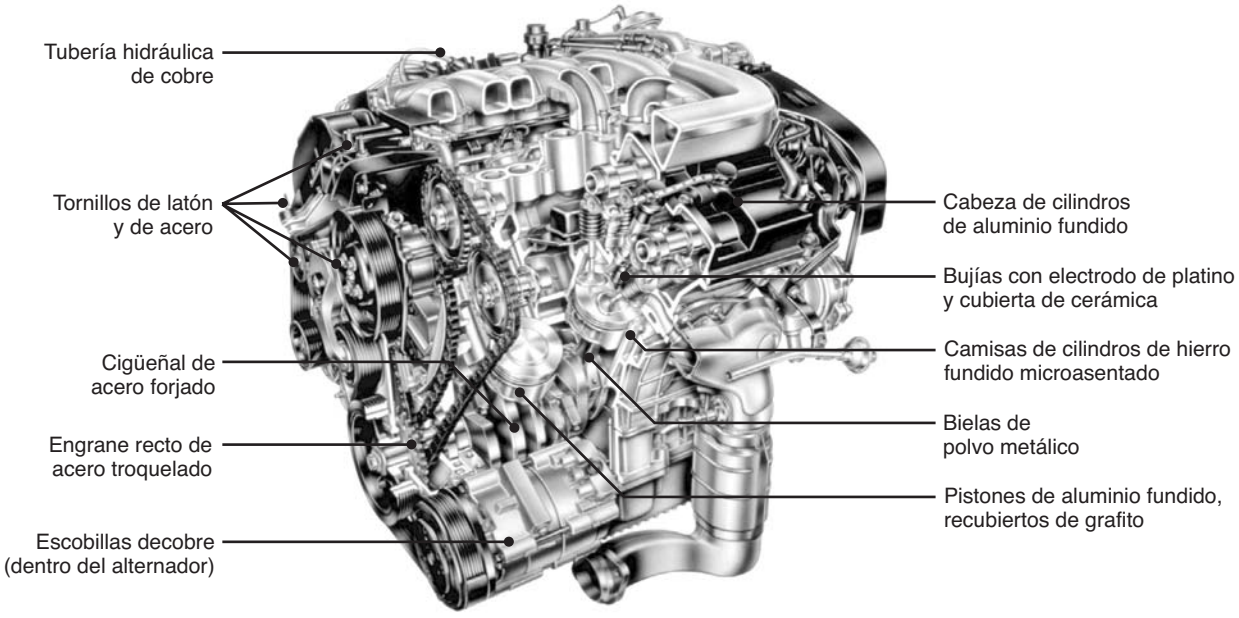


FIGURA I.1 Ilustración de un motor de automóvil (el Duratec V-6), mostrando diversos componentes y los materiales utilizados para fabricarlos. *Fuente:* Cortesía de Ford Motor Company. Ilustración por David Kimball.

TABLA I.1

Número de partes en algunos productos

Producto	Número de partes
Podadora rotatoria	300
Piano de cola	12,000
Automóvil	15,000
Avión de carga C-5A	>4,000,000
Boeing 747–400	>6,000,000

La palabra *manufactura* se deriva del latín *manu factus*, que significa "hecho a mano", y apareció por primera vez en 1567. La palabra *manufacturar* apareció en 1683. La palabra *producto* significa "algo que se produce" y apareció, junto con la palabra *producción*, en algún momento durante el siglo XV. Los vocablos "manufactura" y "producción" con frecuencia se utilizan de manera indistinta.

Debido a que suelen pasar por varios procesos en los que las materias primas se convierten en productos útiles, los artículos manufacturados adquieren un **valor,** definido como equivalente monetario o precio de venta. Por ejemplo, como materia prima para los cerámicos, la arcilla tiene un valor pequeño al extraerla de la mina. Cuando se convierte en la parte cerámica de una bujía, un vaso, una herramienta de corte o un aislador eléctrico, se agrega valor a la arcilla (**valor agregado**). De manera similar, un gancho para ropa o un clavo tiene un valor superior al costo de la pieza de alambre con la que se fabricó; entonces, la manufactura tiene la importante función de *agregar valor*. El término **alto valor agregado** se utiliza para identificar a dichos productos. Los ejem-

plos incluyen chips de computadoras, monobloques de motores, engranes y zapatos deportivos.

La manufactura puede fabricar **productos discretos**, es decir, partes individuales o **productos continuos**. Los clavos, engranes, bolas para rodamientos, latas para bebidas y monobloques para motores son ejemplos de partes discretas, aunque se producen en altos volúmenes y capacidades de producción. En cambio, el alambre, las hojas metálicas y los tubos y tuberías de plástico son productos continuos, que después se cortan en piezas individuales y se convierten así en productos discretos.

Por lo general, la manufactura es una actividad compleja que comprende una amplia variedad de recursos y actividades, como las siguientes:

- Diseño del producto.
- Maquinaria y herramienta.
- Planeación del proceso.
- Materiales.
- Compra.
- Manufactura.
- Control de la producción.
- Servicios de soporte.
- Mercadeo.
- Ventas.
- Embarque.
- Servicios al cliente.

Es fundamental que las actividades de la manufactura respondan a las diversas demandas y tendencias:

1. Un producto debe satisfacer totalmente los **requisitos de diseño**, **especificaciones** y **normas**.
2. Un producto debe manufacturarse mediante los métodos **más económicos y amigables con el medio ambiente**.
3. La **calidad** debe *integrarse al producto* en cada etapa, desde el diseño hasta el ensamblado, en vez de confiar sólo en las pruebas de calidad después de haberlo manufacturado.
4. En el muy competitivo ambiente actual, los métodos de producción deben ser lo suficientemente **flexibles** para responder a las cambiantes demandas del mercado, a los tipos de productos y a las capacidades de producción, a fin de asegurar una entrega oportuna al cliente.
5. Los continuos desarrollos en **materiales**, **métodos de producción** e **integración a las computadoras,** tanto de las actividades tecnológicas como de las administrativas en una organización manufacturera, deben evaluarse constantemente con miras a su implantación apropiada, oportuna y económica.
6. Las actividades de manufactura deben verse como un gran **sistema,** cuyas partes se relacionan entre sí en grados variables. Estos sistemas se pueden modelar para estudiar el efecto de factores como los cambios en las demandas del mercado, el diseño del producto, los materiales y los métodos de producción tanto en la calidad como en el costo de los productos.
7. El fabricante debe trabajar con el cliente para obtener una retroalimentación oportuna y conseguir así una **mejora continua del producto.**

8. Una organización manufacturera debe luchar constantemente por obtener mayores niveles de **productividad**, que se define como el uso óptimo de todos sus recursos: materiales, máquinas, energía, capital, mano de obra y tecnología. Debe maximizarse la producción por empleado por hora en todas las fases.

I.1.1 Breve historia de la manufactura

La manufactura se originó entre los años 5000 y 4000 a.C. (tabla I.2). Es más antigua que la historia registrada. Las marcas y los dibujos en las cuevas o en las rocas primitivas dependían de alguna forma de marcador o brocha, y se empleaba una "pintura" o algún medio para grabar en la roca. Era necesario fabricar herramientas apropiadas para esas aplicaciones. La manufactura de productos que tenían diversos usos específicos comenzó con la producción de artículos de madera, cerámica, piedra y metal. Los materiales y procesos que se utilizaron para dar forma a productos mediante la fundición y el martillado se han desarrollado gradualmente a lo largo de los siglos, usando nuevos materiales y operaciones más complejas, con crecientes capacidades de producción y mayores niveles de calidad.

Los primeros materiales utilizados para fabricar utensilios domésticos y objetos ornamentales incluían metales como el oro, cobre e hierro, seguidos de la plata, el plomo, estaño, latón y bronce. La producción de acero (entre los años 600 y 800 d.C.) constituyó un hito importante; desde entonces se ha desarrollado una variedad muy amplia de metales ferrosos y no ferrosos. En la actualidad, los materiales que se emplean en productos avanzados, como computadoras y aeronaves supersónicas, incluyen materiales de ingeniería (desarrollados para ese fin) con propiedades únicas, como cerámicos avanzados, plásticos reforzados, materiales compuestos y nanomateriales.

Hasta antes de la *Revolución Industrial*, que comenzó en Inglaterra durante la década de 1750, los bienes se producían en lotes y se requería mucha confianza en la mano de obra en todas las fases de la producción. A dicha revolución también se le denomina *Primera Revolución Industrial*, ya que la segunda comenzó a mediados del siglo XX con el desarrollo de los dispositivos electrónicos de estado sólido y las computadoras. La *mecanización* moderna comenzó en Inglaterra y el resto de Europa con el desarrollo de la maquinaria textil y de las máquinas herramienta para cortar metales. Esta tecnología se trasladó rápidamente a Estados Unidos, en donde se desarrolló más y se introdujo el importante avance del diseño, la fabricación y el uso de *partes intercambiables*, creadas por Eli Whitney a principios de 1800. Antes de esta aportación era necesario en gran medida el ajuste a mano, porque no se podían fabricar dos partes exactamente iguales. Ahora se da por entendido que podemos reemplazar un tornillo roto de cierto tamaño con uno idéntico comprado años después en una ferretería local. Pronto siguieron nuevos desarrollos, cuyos resultados son incontables productos de uso común y sin los cuales hoy no podríamos imaginar nuestra vida.

Al inicio de la década de 1940 se alcanzaron hitos importantes en todos los aspectos de la manufactura. En la tabla I.2 se observa el avance logrado durante los últimos 100 años, y particularmente durante las últimas tres décadas con el advenimiento de la era de las computadoras, si se compara con el largo periodo transcurrido del año 4000 al año 1 a.C. Aunque los romanos tenían factorías para producir en masa artículos de vidrio, al principio los métodos eran muy primitivos y por lo general muy lentos, con mucha mano de obra en el manejo de partes y en la operación de la maquinaria. Hoy en día, con la ayuda de los *sistemas de manufactura integrados por computadora*, los métodos de producción han avanzado tanto que, por ejemplo, las latas de aluminio para bebidas se manufacturan a velocidades de 500 por minuto, los agujeros en las hojas metálicas se perforan a razón de 800 por minuto y las bombillas se elaboran en cantidades de más de 2000 por minuto.

TABLA I.2

Desarrollo histórico de materiales y procesos de manufactura

Periodo	Fechas	Metales y fundición	Diversos materiales y compósitos	Formado y modelado	Unión	Herramientas, maquinado y sistemas de manufactura
	Antes de 4000 a.C.	Oro, cobre, hierro meteórico	Artículos de tierra, vidriería, fibras naturales	Martillado		Herramientas de piedra, pedernal, madera, hueso, marfil, herramientas compósitas
	4000 a 3000 a.C.	Fundición de cobre, moldes de piedra y metales, proceso a la cera perdida, plata, plomo, estaño, bronce		Estampado, joyería	Soldadura de cobre (Cu-Au, Cu-Pb, Pb-Sn)	Corindón (alúmina, esmeril)
Egipto: ~3100 a.C. a ~300 a. C. Grecia: ~1100 a. C. a ~146 a. C. Imperio romano: ~500 a. C. a 476 d. C. Edad media: ~476 a 1492 Renacimiento: siglo XIV al XVI	3000 a 2000 a.C.	Fundición y estirado de bronce y hojas de oro	Perlas de vidrio, torno de alfarero, recipientes de vidrio	Alambre mediante el corte de hojas metálicas	Remachado, soldadura de cobre	Fabricación de azadones, hachas martilladas, herramientas para herrería y carpintería
	2000 a 1000 a.C.	Hierro maleable, bronce				
	1000 a 1 a.C.	Hierro fundido, acero fundido	Prensado y soplado de vidrio	Estampado de monedas	Soldadura por forja de hierro y acero, pegado	Cinceles improvisados, sierras, limas, y tornos para madera
	1 a 1000 d.C.	Zinc, acero	Vidrio veneciano	Armaduras, acuñado, forja, espadas de acero		Grabado de armaduras
	1000 a 1500	Alto horno, tipos de metales, fundición de campanas, peltre	Cristal	Estirado de alambre, trabajos de orfebrería en oro y plata		Papel lija, sierra impulsada por molino de viento
	1500 a 1600	Cañones de hierro fundido, placa de estaño	Vidrio plano fundido, vidrio de pedernal	Potencia hidráulica para trabajo de los metales, laminación de tiras para monedas		Torno de mano para madera
	1600 a 1700	Fundición de molde permanente, latón a partir de cobre y zinc metálico	Porcelana	Laminación (plomo, oro, plata), laminado de formas (plomo)		Mandrinado, torneado, mecanizado de roscas, taladro de columna

(*continúa en la siguiente página*)

TABLA I.2

Desarrollo histórico de materiales y procesos de manufactura (continuación)

Periodo	Fechas	Metales y fundición	Diversos materiales y compósitos	Formado y modelado	Unión	Herramientas, maquinado y sistemas de manufactura
Revolución Industrial: ~1750 a 1850	1700 a 1800	Hierro fundido maleable, acero de crisol (barras y varillas de hierro)		Extrusión (tubo de plomo), embutido profundo, laminación		
	1800 a 1900	Fundición centrífuga, proceso Bessemer, aluminio electrolítico, barras de níquel, metales babbitt, acero galvanizado, metalurgia de polvos, acero de hogar abierto	Vidrio para ventana de cilindro dividido, lámpara de luz, vulcanización, procesamiento del hule, poliéster, estireno, celuloide, extrusión de hule, moldeo	Martillo de vapor, laminación de acero, tubo sin costura, laminación de rieles de acero, laminado continuo, electrodeposición		Cepillo de mesa fija, fresado, torno copiador para cajas de fusiles, torno de torreta, fresadora universal, disco vitrificado para rectificado
Primera Guerra Mundial	1900 a 1920		Fabricación automática de botellas, baquelita, vidrio de borosilicato	Rolado de tubos, extrusión en caliente	Oxiacetileno; soldadura de arco, resistencia eléctrica y térmica	Torno engranado, roscadora automática, tallado de engranes con fresa madre, herramientas de acero de alta velocidad, óxido de aluminio y carburo de silicio (sintético)
	1920 a 1940	Fundición a presión	Desarrollo de plásticos, fundición, moldeo, cloruro de polivinilo, acetato de celulosa, polietileno, fibras de vidrio	Alambre de tungsteno a partir de polvo metálico	Electrodos recubiertos	Carburo de tungsteno, producción en masa, máquinas de transferencia
Segunda Guerra Mundial	1940 a 1950	Proceso a la cera perdida para partes de ingeniería	Acrílicos, hule sintético, epóxicos, vidrio fotosensible	Extrusión (acero), estampado, metales en polvo para partes para ingeniería	Soldadura de arco sumergido	Recubrimientos de conversión de fosfato, control de calidad total
	1950 a 1960	Molde cerámico, hierro nodular, semiconductores, fundición continua	Acrilonitrilo butadieno estireno, fluorocarbonos, poliuretano, vidrio flotado, vidrio templado, cerámicos vidriados	Extrusión en frío (acero), formado explosivo, procesamiento termomecánico	Soldadura de arco de metal y gas, de tungsteno y gas y de electroescoria; soldadura por explosión	Maquinado eléctrico y químico, control automático

TABLA I.2

Desarrollo histórico de materiales y procesos de manufactura (continuación)

Periodo	Fechas	Metales y fundición	Diversos materiales y compósitos	Formado y modelado	Unión	Herramientas, maquinado y sistemas de manufactura
	1960 a 1970	Fundición por compresión, álabes para turbina de monocristales	Acetales, policarbonato, formado en frío de plásticos, plásticos reforzados, devanado de filamentos	Hidroformado, extrusión hidrostática, electroformado	Soldadura de arco de plasma y de haz de electrones, unión por adhesivos	Carburo de titanio, diamante sintético, control numérico, microcircuito integrado
Era espacial	1970 a 1990	Grafito compactado, fundición al vacío, arena aglutinada orgánicamente, automatización del moldeo y colado, solidificación rápida, compósitos de matriz metálica, trabajo de metales semisólidos, metales amorfos, aleaciones con memoria de forma (materiales inteligentes), simulación en computadoras	Adhesivos, materiales compósitos, semiconductores, fibras ópticas, cerámicos estructurales, compósitos de matriz cerámica, plásticos biodegradables, polímeros eléctricamente conductores	Forjado de precisión, forjado isotérmico, formado superplástico, matrices fabricadas mediante diseño y manufactura asistida por computadora, forjado y formado de forma neta, simulación en computadora	Rayo láser, unión por difusión (también combinada con formado superplástico), soldadura blanda con montura superficial	Nitruro de boro cúbico, herramientas recubiertas, torneado de diamante, maquinado de ultraprecisión, manufactura integrada por computadora, robots industriales, centros de maquinado y torneado, sistemas de manufactura flexible, tecnología de detectores, inspección automatizada, sistemas expertos, simulación y optimización en computadoras
Era de la información	1990 a 2000	Reofundición, diseño de moldes y matrices asistido por computadora, montaje rápido de herramientas	Materiales de nanofase, espumas metálicas, recubrimientos avanzados, superconductores de alta temperatura, cerámicos maquinables, carbono como diamante	Fabricación rápida de prototipos, montaje rápido de herramientas, fluidos amigables con el medio ambiente para el trabajo de los metales	Soldadura de agitación por fricción, sueldas sin plomo, esbozos de hoja metálica (especiales) soldadas a tope con láser, adhesivos eléctricamente conductores	Micro y nanofabricación, LIGA (acrónimo alemán para un proceso que comprende litografía, electrodeposición y moldeo), ataque en seco, transmisiones de motores lineales, redes neuronales artificiales, seis sigma

Fuente: J. A. Schey, C. S. Smith, R. F. Tylecote, T. K. Derry, T. I. Williams, S. R. Schmid y S. Kalpakjian.

EJEMPLO I.1 Sujetadores para papel

El sujetador para papel o clip (fig. I.2), como lo conocemos hoy en día, fue desarrollado por un noruego, Johan Vaaler, quien recibió la patente respectiva en Estados Unidos en 1901. En este ejemplo, identificaremos los importantes factores comprendidos en el diseño y la manufactura de dichos sujetadores.

Suponga que se le pide diseñar y producir sujetadores para papel. ¿Qué tipo de material elegiría para hacer este producto tan simple? ¿Debería ser metálico o podría ser no metálico, como el plástico? Si elige un metal, ¿qué tipo de metal y en qué condiciones? Si el material con el que inició tiene la forma de alambre, ¿cuál sería su diámetro? ¿Debería ser redondo o tener alguna otra sección transversal? ¿Son importantes el acabado superficial y la apariencia del alambre? Más aún, ¿cómo tomaría una pieza de alambre y le daría la forma de clip? ¿Lo haría a mano o, de no ser así, qué tipo de máquina especial diseñaría y fabricaría, o compraría, a fin de elaborar sujetadores para papel? Si como propietario de una compañía recibiera una orden por 10,000 clips y otra por millones de ellos, ¿sería diferente su método de manufactura?

Es obvio que el sujetador para papel debe cumplir su requisito funcional básico: mantener juntas hojas de papel con la suficiente fuerza de sujeción para que no se separen. Por consiguiente, debe diseñarse de modo apropiado, particularmente en cuanto a forma, tamaño, textura y apariencia. El material seleccionado puede tener cierta rigidez y resistencia. Por ejemplo, si la rigidez (una medida de cuánto se flexiona cuando se somete a una fuerza) es muy grande, tal vez los usuarios requieran un nivel de fuerza incómodo o inconveniente para utilizar el clip, al igual que se necesita mayor fuerza para estirar o comprimir un resorte rígido que para hacerlo con uno más suave. En cambio, si la rigidez del sujetador es demasiado pequeña, no ejercerá la suficiente fuerza de sujeción sobre el conjunto de papeles. Además, si el esfuerzo de fluencia del material del alambre (el esfuerzo requerido para provocar una defor-

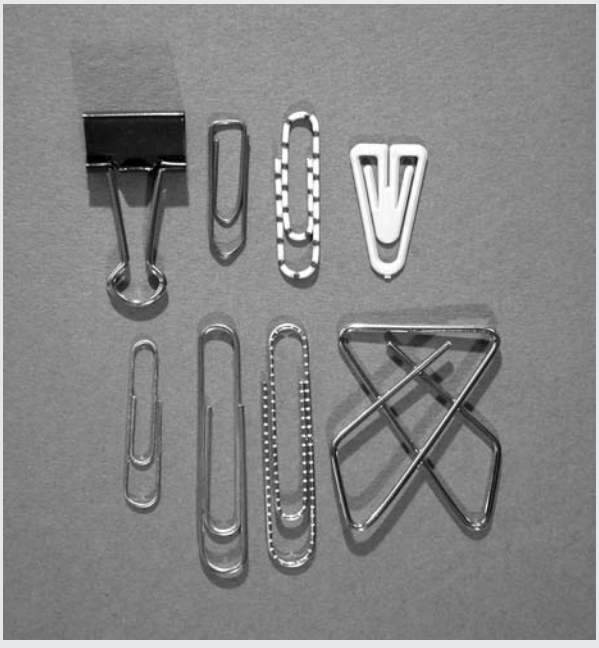


FIGURA I.2 Ejemplos de una amplia variedad de materiales y formas para sujetadores para papel.

mación permanente en un material) es muy pequeño, el sujetador se doblará de manera permanente durante el uso normal y, por lo tanto, será muy difícil volver a usarlo, como todos hemos experimentado. Nótese que la rigidez y resistencia del clip también dependen del diámetro del alambre y de las dimensiones y del diseño del sujetador.

Después de terminar el diseño del sujetador, debe buscarse el material adecuado. Esta selección requiere conocimiento de la *función* y los *requisitos de servicio* del producto, lleva a elegir materiales que, de preferencia, estén disponibles comercialmente, y comprende la consideración de su resistencia a la corrosión, porque el sujetador se manipula con frecuencia y se somete a la humedad y a otros ataques del medio ambiente. Por ejemplo, véanse las marcas de oxidación que los clips dejan en los documentos guardados en archivos durante un largo periodo.

Deben hacerse muchas otras preguntas respecto de la producción de clips. ¿Podrá el material elegido soportar el doblado durante la manufactura sin agrietarse o sin romperse? ¿Podrá cortarse fácilmente el alambre de una pieza larga sin desgastar en exceso el herramental? ¿El proceso de corte (cizallamiento) producirá una arista lisa en el extremo del alambre, o dejará una rebaba (una arista afilada) que podría interferir en el uso que se pretende? Finalmente, ¿cuál es el método de manufactura más económico de esta parte, a la capacidad deseada de producción, para que pueda ser competitivo en el mercado? Por lo anterior, debe seleccionarse un método de manufactura adecuado, así como las herramientas, maquinaria y equipos correspondientes.

EJEMPLO I.2 Bombillas

T. A. Edison (1847-1931) fabricó la primera lámpara de luz incandescente y la encendió en 1879. Sin embargo, una bombilla típica o foco tenía una vida de sólo 13.5 horas aproximadamente. Desde entonces se han hecho muchas mejoras en los materiales y en los métodos de manufactura para fabricar bombillas. En este ejemplo describiremos la secuencia de los métodos utilizados para manufacturarlas en máquinas altamente automatizadas, a razón de 2000 focos por minuto.

En la figura I.3a se muestran los componentes de una bombilla típica. La parte emisora de luz es el filamento, el cual, al paso de la corriente y debido a su resistencia eléctrica, se calienta hasta la incandescencia; esto es, a temperaturas entre 2200 °C y 3000 °C (4000 °F y 5400 °F). La primera lámpara exitosa de Edison tenía un filamento de carbono, aunque él y otros también habían experimentado con diversos materiales, entre ellos el papel carbonizado y metales como el osmio, iridio y tantalio. Sin embargo, ninguno de estos materiales tenía la resistencia mecánica, la resistencia a la alta temperatura y la larga vida del tungsteno (sección 6.8), que ahora es el material para filamentos más utilizado.

El primer paso en la manufactura de una bombilla consiste en fabricar el vástago de vidrio que soporta los alambres de entrada y el filamento, y los conecta a la base de la lámpara (fig. I.3b). Estos componentes se colocan, ensamblan y sellan mientras el vidrio se calienta con flamas de gas. Después se sujeta el filamento a los alambres de entrada.

El ensamble terminado del vástago (montura) se transfiere entonces a una máquina que baja un globo de cristal sobre él y, con flama, sella su cuello al aro de la montura. Se extrae el aire de la bombilla mediante un tubo de escape (una parte integral del vástago de vidrio) y después se evacua o se llena con gas inerte. Para focos de 40 W o más, el gas suele ser una mezcla de nitrógeno y argón. Después se sella el tubo de escape. El siguiente paso de la producción consiste en sujetar la base a la bom-

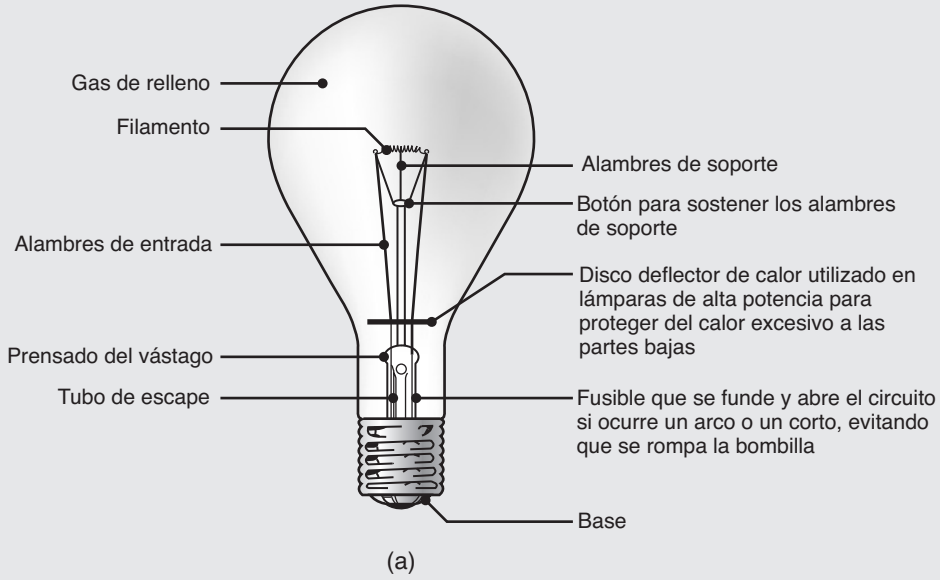


FIGURA I.3a Componentes de una bombilla o foco. *Fuente:* Cortesía de General Electric Company.

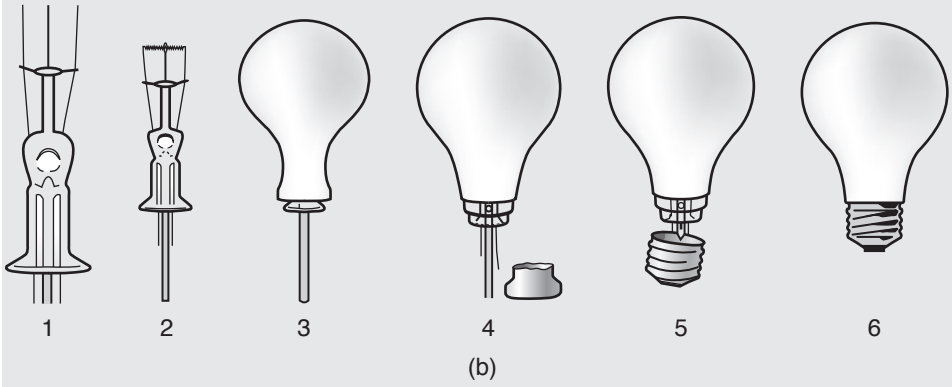


FIGURA I.3b Pasos de manufactura para fabricar una bombilla. *Fuente:* Cortesía de General Electric Company.

billa, utilizando un cemento especial. La máquina que realiza la operación de sujeción también suelda (parte VI) los alambres de entrada a la base metálica para proveer la conexión eléctrica.

El filamento se produce comprimiendo primero polvo de tungsteno en lingotes y sinterizándolo (calentándolo sin que se funda; sección 17.4). Después se redondea el lingote y se le da forma de varilla mediante estampado rotatorio (sección 14.4); las varillas se estiran por medio de una matriz, en varios pasos, a fin de producir un alambre delgado (sección 15.7) que se enrolla para aumentar la capacidad de producción de luz del filamento. El diámetro del alambre para un foco de 60 W, 120 V, es de 0.045 mm (0.0018 pulgada) y debe controlarse de manera muy precisa, porque si es menor al especificado en sólo 1% la vida de la bombilla podría reducirse hasta 25%.

El espaciamiento entre las espiras también debe ser muy preciso, para evitar la concentración localizada de calor y con ello un posible corto.

En general, los alambres de entrada se elaboran con níquel, cobre o molibdeno, y los alambres de soporte con molibdeno (sección 6.8). La porción del alambre de entrada embutida en el vástago se fabrica con una aleación de hierro-níquel, recubierta con cobre. El alambre tiene fundamentalmente el mismo coeficiente de dilatación térmica que el vidrio (capítulos 3 y 8), lo cual impide el desarrollo de los esfuerzos térmicos que de otra manera podrían hacer que se agrietara el vástago. La base de la bombilla suele hacerse de aluminio (que debido a su bajo costo ha reemplazado al latón) recubierto especialmente para permitir que se inserte con facilidad en la toma eléctrica o "socket".

Por lo común, el vidrio de las bombillas se fabrica soplando vidrio fundido en un molde (sección 18.3.3). Se utilizan varios tipos de vidrio, dependiendo del tipo de bombilla deseado. El interior del tubo puede ser esmerilado (translúcido), para reducir el brillo y difundir mejor la luz, o simple (transparente). El gas de relleno debe ser puro, pues en caso contrario se ennegrecerían las paredes interiores de la bombilla. Por ejemplo, una sola gota de agua en el gas utilizado para medio millón de focos haría que se ennegrecieran todos.

I.2 El proceso de diseño del producto y la ingeniería concurrente

El diseño del producto es una actividad crítica, porque se estima que 70% u 80% del costo de desarrollo y manufactura de un producto está determinado por las decisiones tomadas en las etapas *iniciales* del diseño. Este proceso comienza con el desarrollo de un concepto para un producto original. En esta etapa es altamente deseable, e incluso fundamental, un método innovador de diseño, para que el producto sea exitoso en el mercado y se obtengan ahorros importantes en costos de materiales y de producción.

Primero, el diseño de un producto requiere un entendimiento completo de sus *funciones* y de su *desempeño* esperado. El mercado de un producto, así como los usos previstos para el mismo, deben definirse claramente con la ayuda de analistas de mercado y personal de ventas, que aportan a la compañía información valiosa y oportuna sobre el ramo. El producto puede ser nuevo o una versión modificada o más reciente de un artículo existente; por ejemplo, obsérvese cómo han cambiado a través de los años el diseño y el estilo de los teléfonos celulares, las calculadoras, los aparatos domésticos, los automóviles y las aeronaves.

Las actividades de diseño y manufactura suelen efectuarse de manera consecutiva (fig. I.4a), una metodología que en principio puede parecer lógica y directa, pero que en la práctica desperdicia recursos de modo extremo. En teoría, un producto puede pasar de un departamento de una organización a otro, puede producirse y después colocarse directamente en el mercado, pero es común que haya dificultades. Por ejemplo, un ingeniero de manufactura podría desear que se conificara la brida de una parte para mejorar su capacidad de fundición, o decidir que es preferible una aleación diferente. Tales cambios obligarían a repetir la etapa de análisis del diseño, a fin de asegurar que el producto funcione satisfactoriamente. Estas iteraciones, como se muestra en la figura I.4a, desperdician recursos y, lo más importante, desperdician tiempo.

Impulsada por la industria electrónica de consumo, se desarrolló una gran necesidad de proveer productos al mercado lo más rápidamente posible. El razonamiento era que los productos introducidos antes gozaban de un mayor porcentaje del mercado y, en consecuencia, de mayores ganancias, así como de una vida más larga antes de la obsolescencia. Por estas razones apareció la **ingeniería concurrente**, también denominada **ingeniería simultánea**, que llevó al método de desarrollo de productos mostrado en la figura

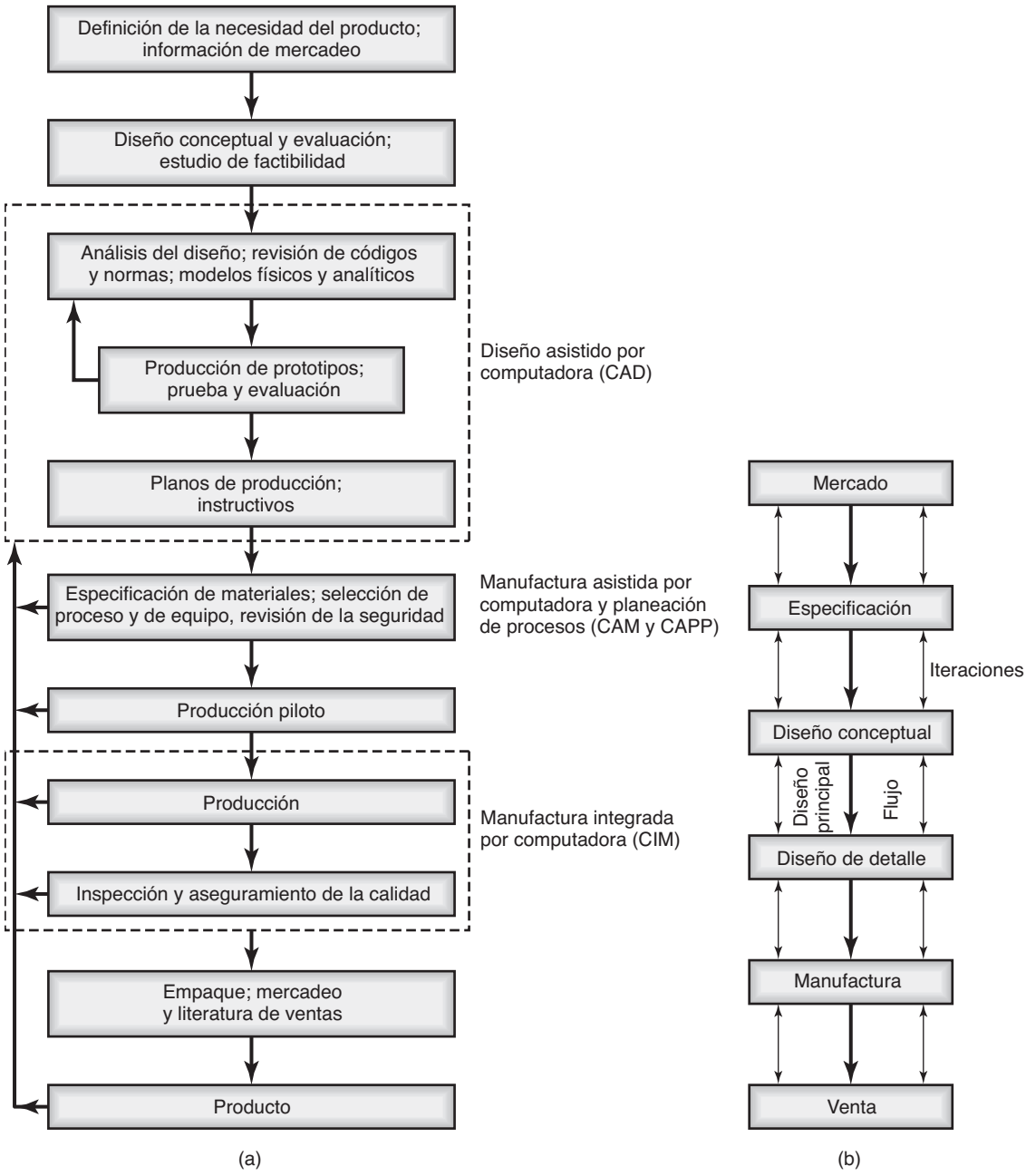


FIGURA I.4 *(a)* Gráfica que muestra los diversos pasos comprendidos en el diseño y la manufactura de un producto. Según la complejidad del artículo y el tipo de materiales utilizados, el tiempo que media entre el concepto original y el mercadeo de un producto puede variar desde unos cuantos meses hasta muchos años. *(b)* Gráfica que muestra el flujo general de un producto en la ingeniería concurrente, desde el análisis de mercado hasta la venta del producto. *Fuente:* S. Pugh, *Total Design*, Addison-Wesley, 1991.

I.4b. Aunque aún tiene un flujo general del producto que va del análisis de mercado al diseño y la manufactura, contiene varias iteraciones deliberadas. La principal diferencia con el método anterior es que ahora todas las disciplinas se involucran en las primeras etapas del diseño, para que en las iteraciones, que ocurren naturalmente, haya un menor desperdicio de esfuerzos y de tiempo. Una clave para este método es la ahora bien reco-

nocida importancia de la *comunicación* entre y dentro de las diversas disciplinas: debe existir comunicación no sólo entre las funciones de ingeniería, mercadeo y servicio, sino también entre actividades como el diseño para la manufactura, diseño para el reciclamiento y diseño para la seguridad.

La ingeniería concurrente integra el diseño y la manufactura de un producto con vistas a optimizar todos los elementos incluidos en su **ciclo de vida**. Este método reduce *(a)* los cambios en el diseño y la ingeniería de un producto, y *(b)* el tiempo y los costos comprendidos en llevarlo desde su diseño conceptual hasta su producción e introducción en el mercado. El ciclo de vida típico de un producto nuevo consta de las siguientes etapas: *(a)* arranque, *(b)* crecimiento rápido en el mercado, *(c)* madurez y *(d)* declinación.

El concepto de **ingeniería de ciclo de vida** demanda que en la etapa de diseño se considere toda la vida de un producto: así, el diseño, la producción, la distribución, el uso y el reciclamiento o disposición deben considerarse simultáneamente. Entonces, un producto bien diseñado es:

- Funcional (diseño).
- Bien manufacturado (producción).
- Bien empacado (para que llegue a salvo al usuario final o al cliente).
- Durable (funciona efectivamente para el propósito destinado).
- Conservable (tiene componentes que se pueden reemplazar o reparar, o a los que se puede dar mantenimiento con facilidad).
- Un recurso eficiente (se puede desensamblar para reciclar los componentes).

Aunque en este libro de texto se enfatiza principalmente el aspecto de la *producción* en el ciclo de vida de un producto, la necesidad de integración de múltiples disciplinas en el desarrollo del mismo domina su ciclo de vida; por ejemplo, el reciclamiento se trata de mejor manera durante el desarrollo del producto mediante la selección de materiales que sean fácilmente reciclables. Aunque el concepto de ingeniería concurrente parece lógico y eficiente, su implantación requiere considerable tiempo y esfuerzo cuando sus usuarios no trabajan en equipo o no aprecian sus beneficios reales.

Existen numerosos ejemplos de los beneficios de la ingeniería concurrente. Tal es el caso de una compañía automotriz que redujo 30% el número de componentes en uno de sus motores, ocasionando que el peso del motor disminuyera 25% y su tiempo de manufactura se redujera en 50%. El concepto de ingeniería concurrente se puede implantar en compañías grandes y pequeñas, particularmente en vista de que 98% de los establecimientos manufactureros de Estados Unidos tienen menos de 500 empleados.

El diseño del producto comprende a menudo la preparación de *modelos analíticos y físicos* del mismo para estudiar factores como fuerzas, esfuerzos, deflexiones y una forma óptima de la parte. La necesidad de dichos modelos depende de la complejidad del producto. Hoy en día, la construcción y el estudio de modelos analíticos se simplifica altamente con el uso de técnicas de **modelado y diseño asistidos por computadora** (CAD), **ingeniería asistida por computadora** (CAE) y **manufactura asistida por computadora** (CAM). Los sistemas CAD son capaces de analizar rápida y totalmente desde un simple soporte o un eje hasta estructuras grandes y complejas. Por ejemplo, el avión de pasajeros Boeing 777 de dos motores se diseñó en su totalidad por medio de computadoras (**diseño sin documentos**), con 2000 estaciones de trabajo conectadas a ocho servidores de diseño. A diferencia de los modelos anteriores, no se elaboraron prototipos o maquetas y el avión se construyó directamente a partir del software CAD/CAM desarrollado.

Al utilizar ingeniería asistida por computadora es posible simular, analizar y probar eficientemente, con precisión y rapidez, el desempeño de las estructuras sujetas, por ejemplo, a cargas estáticas o cambiantes y a gradientes de temperatura. La información elaborada se puede almacenar, consultar, mostrar, imprimir y transferir a cualquier lugar dentro de la organización. Se pueden optimizar los diseños y realizar modificaciones, directa y fácilmente, en cualquier momento.

La **manufactura asistida por computadora** (sección 39.5) comprende todas las fases de la manufactura, para lo cual se utilizan y procesan las grandes cantidades de información sobre materiales y procesos reunidas y almacenadas en la base de datos de la organización. Ahora las computadoras ayudan a los ingenieros de manufactura y a sus asociados a organizar tareas como programación del control numérico de máquinas, programación de robots para manejo y ensamble de materiales, diseño de herramientas, matrices y monturas, así como mantenimiento del control de calidad.

Con base en los modelos desarrollados mediante las técnicas anteriores, el diseñador de productos selecciona y especifica la forma y las dimensiones finales del producto, su precisión dimensional, acabado superficial y materiales componentes. La selección de materiales se realiza con el consejo y la cooperación de ingenieros de materiales, a menos que el ingeniero de diseño tenga experiencia y esté calificado en esta área. Una consideración importante de diseño es cómo se va a *ensamblar* un componente particular en el producto final; por ejemplo, en el motor de un automóvil es posible observar cómo cientos de componentes se ajustan en un espacio limitado, y lo mismo puede verse en un interruptor para luz o en un teléfono.

El siguiente paso en el proceso de producción consiste a menudo en hacer y probar un **prototipo**; esto es, un modelo original de trabajo del producto. Una tecnología importante es la **producción rápida de prototipos** (capítulo 20), que se basa en CAD/CAM y en diversas técnicas de manufactura (las cuales utilizan materiales metálicos o no metálicos como piezas de trabajo) para producir prototipos rápidamente y a bajo costo, en la forma de un modelo físico sólido de una parte. Producir prototipos de nuevos componentes automovilísticos mediante métodos tradicionales, como modelado, formado y maquinado, podría costar cientos de millones de dólares al año y algunos componentes requerirían un año más o menos para producirse. La producción rápida de prototipos puede reducir estos costos y los tiempos de desarrollo asociados de manera significativa. Estas técnicas están avanzando aún más y podrían utilizarse en la producción económica de bajos volúmenes de partes reales, para incorporarlas en productos.

Se deben diseñar pruebas para los prototipos que simulen lo más cercanamente posible las condiciones en que se utilizará el producto, las cuales incluyen factores ambientales (como temperatura y humedad), los efectos de la vibración y el uso repetido, así como el empleo indebido del producto. Durante la prueba de los prototipos podrían necesitarse modificaciones al diseño original, a los materiales o a los métodos de producción. Al terminar esta fase se seleccionan planes apropiados de proceso, métodos de manufactura, equipo y herramental, con la cooperación de ingenieros de manufactura, planeadores de procesos y otros involucrados en la producción.

La **producción virtual de prototipos** es una forma totalmente programable de producir prototipos que utiliza gráficas avanzadas y ambientes de realidad virtual para permitir a los diseñadores examinar una parte. Esta tecnología se utiliza en paquetes CAD para producir una parte, a fin de que los diseñadores puedan observarla y evaluarla conforme se dibuja. Sin embargo, debe reconocerse que los sistemas de producción virtual de prototipos son casos altamente demandantes para producir detalles de las partes.

I.3 Diseño para manufactura, ensamble, desensamble y servicio

Las discusiones anteriores muestran que el diseño y la manufactura nunca deben verse como actividades separadas. Cada parte o componente de un producto debe diseñarse para satisfacer los requisitos y especificaciones de diseño y para manufacturarse económicamente. El **diseño para manufactura** (DFM) es un método completo de producción de bienes e integra el proceso de diseño con materiales, métodos de manufactura, planeación de procesos, ensamble, prueba y aseguramiento de la calidad. Esta metodología requiere que los diseñadores entiendan cabalmente las características, capacidades y

limitaciones de los materiales, los procesos de manufactura y las operaciones, la maquinaria y el equipo relativos. Este conocimiento incluye características como variabilidad en el desempeño de las máquinas, precisión dimensional y acabado superficial de la pieza de trabajo, tiempo de proceso y el efecto del método de procesamiento en la calidad de la parte.

Los diseñadores y los ingenieros de producto deben ser capaces de evaluar el impacto de las modificaciones del diseño en la selección del proceso y en el ensamble, inspección, herramientas y matrices, así como en el costo del producto. Establecer relaciones cuantitativas es fundamental para optimizar el diseño, a fin de facilitar la manufactura y el ensamble del producto a un costo mínimo. Los **sistemas expertos** (ES), que tienen capacidad de optimización y por lo tanto pueden agilizar el proceso iterativo tradicional en la optimización del diseño, son poderosas herramientas para dicho análisis.

Los componentes individuales manufacturados tienen que ensamblarse en un producto. El **ensamble** es una fase importante de la operación de manufactura y requiere que se consideren la facilidad, la rapidez y el costo de juntar las partes (fig. I.5). Además, los productos deben diseñarse para que también sea posible el **desensamble**, a fin de desarmar el producto con relativa facilidad para mantenimiento, servicio y reciclamiento de sus componentes. Debido a que las operaciones de ensamble pueden contribuir significativamente al costo del producto, el **diseño para ensamble** (DFA) y el **diseño para desensamble** son aspectos importantes de la manufactura. Un producto que se puede ensamblar fácilmente también se debe desensamblar fácilmente. Importantes desarrollos posteriores incluyen el **diseño para servicio**, cuya meta es tener fácil acceso a las partes individuales o a los subensambles de un producto para darles servicio.

Existen metodologías y software para computadora para el DFA que utilizan diseños conceptuales y modelos sólidos en tres dimensiones (3-D). Así, se minimizan los tiempos y los costos de los subensambles y ensambles mientras se mantienen la integridad y el desempeño del producto; el sistema también mejora la facilidad de desensamble del mismo. Un resultado natural de estos desarrollos es el **diseño para manufactura y en-**

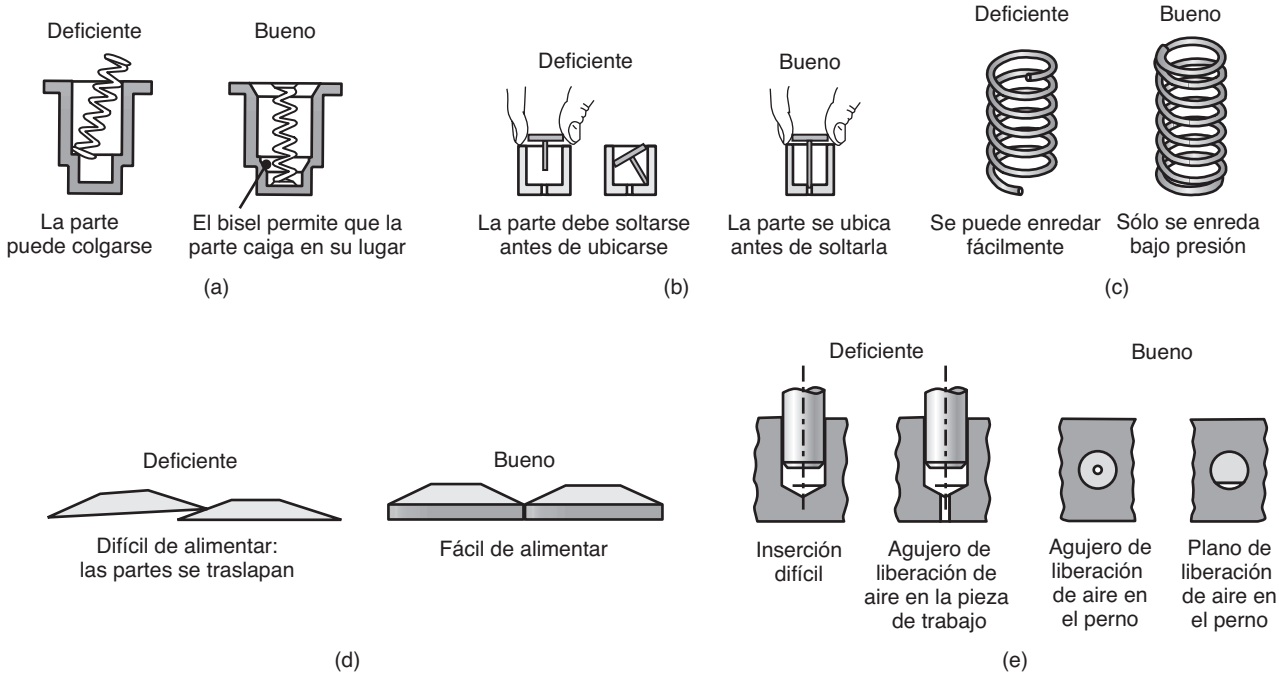


FIGURA I.5 Nuevo diseño de partes para facilitar el ensamble. *Fuente:* Reimpreso de G. Boothroyd y P. Dewhurst, *Product Design for Assembly*, 1989. Cortesía de Marcel Dekker, Inc.

samble (DFMA), que reconoce la relación inherente entre la manufactura de los componentes y su ensamble como producto final.

Existen varios métodos de ensamble (por ejemplo, el uso de sujetadores o adhesivos, o mediante soldadura, soldadura blanda o fuerte), cada uno con sus propias características y requiriendo diferentes operaciones. Por ejemplo, el uso de un tornillo y una tuerca requiere la preparación de los orificios, cuya ubicación y tamaño deben coincidir. A su vez, la producción de los orificos requiere operaciones como el taladrado o punzonado, que necesitan tiempo adicional y operaciones independientes, y que también producen desperdicios. Por otro lado, los productos ensamblados con tornillos y tuercas se pueden desarmar y reensamblar con relativa facilidad.

Las partes individuales se pueden ensamblar a mano o mediante equipo automático y robots. La elección depende de factores como la complejidad del producto, el número de partes por ensamblar, el cuidado y la protección requerida para evitar el daño o rayado de las superficies terminadas de las partes, y el costo relativo de la mano de obra, comparado con el de la maquinaria exigida para el ensamble automatizado.

I.4 Selección de materiales

Actualmente existe una creciente variedad de materiales, cada uno con sus características, aplicaciones, ventajas, limitaciones y costos (parte I). Los siguientes son los tipos generales de materiales utilizados en manufactura, ya sea individualmente o en combinación con otros materiales:

- **Metales ferrosos:** aceros al carbono, aleados, inoxidables y para herramientas y matrices (capítulo 5).
- **Metales no ferrosos:** aluminio, magnesio, cobre, níquel, titanio, superaleaciones, metales refractarios, berilio, zirconio, aleaciones de bajo punto de fusión y metales preciosos (capítulo 6).
- **Plásticos (polímeros):** termoplásticos, termofijos y elastómeros (capítulo 7).
- **Cerámicos, vidrios, cerámicos vidriados, grafito, diamante y materiales como el diamante** (capítulo 8).
- **Materiales compósitos:** plásticos reforzados, compósitos de matriz metálica y de matriz cerámica (capítulo 9), conocidos también como **materiales de ingeniería.**
- **Nanomateriales, aleaciones con memoria de forma, aleaciones amorfas, semiconductores, superconductores** y otros **materiales avanzados** con propiedades únicas (capítulo 6).

El desarrollo de nuevos materiales vuelve aún más demandante la selección de los apropiados. Las estructuras aeroespaciales, las aplicaciones automotrices, el equipo militar y los artículos deportivos se han colocado a la vanguardia en el uso de materiales nuevos. A menudo surgen nuevas tendencias en el uso de materiales en todos los productos, impulsadas sobre todo por razones económicas, aunque también por otras consideraciones que se describirán a continuación.

Propiedades de los materiales. Al seleccionar materiales para un producto, primero se consideran sus *propiedades mecánicas*: resistencia, tenacidad, ductilidad, dureza, elasticidad, fatiga y termofluencia (capítulo 2). Las propiedades mecánicas especificadas para un producto y sus componentes deben, desde luego, ser apropiadas para las condiciones en que se espera que funcionen. Después se consideran las *propiedades físicas* de los materiales: densidad, calor específico, dilatación y conductividad térmica, punto de fusión, y propiedades eléctricas y magnéticas (capítulo 3). Una combinación de propiedades mecánicas y físicas son las proporciones de resistencia a peso y rigidez a peso de los materiales, que son particularmente importantes para las aplicaciones aeroespaciales y

TABLA I.3

Características generales de manufactura de diversas aleaciones

Aleación	Fundibilidad	Soldabilidad	Maquinabilidad
Aluminio	E	R	E–B
Cobre	B–R	R	B–R
Hierro fundido gris	E	D	B
Hierro fundido blanco	B	MD	MD
Níquel	R	R	R
Aceros	R	E	R
Zinc	E	D	E

Nota: E, excelente; B, buena; R, regular; D, difícil; MD, muy deficiente

automotrices, así como para artículos deportivos. Por ejemplo, el aluminio, el titanio y los plásticos reforzados tienen generalmente mayores proporciones que los aceros y los hierros fundidos.

Las *propiedades químicas* también desempeñan un papel importante, tanto en ambientes hostiles como en los normales. La oxidación, corrosión, degradación general de las propiedades, toxicidad e inflamabilidad de los materiales son factores importantes que se deben considerar. Por ejemplo, en algunos accidentes de aerolíneas comerciales, los humos tóxicos han provocado muchas muertes al quemarse materiales no metálicos en la cabina de la aeronave.

Las *propiedades de manufactura* de los materiales determinan si se pueden fundir, formar, maquinar, unir y tratar térmicamente con relativa facilidad (tabla I.3). El método o métodos utilizados para procesar materiales en las formas finales deseadas pueden afectar el desempeño, la vida de servicio y el costo del producto.

Costo y disponibilidad. El costo y la disponibilidad de las materias primas, de los materiales procesados y de los componentes manufacturados, son preocupaciones importantes en la manufactura. Los aspectos económicos de la selección de materiales son tan importantes como las consideraciones tecnológicas de las propiedades y características de los mismos (capítulo 40). Si las materias primas, los materiales procesados o los componentes manufacturados no existen en las formas, dimensiones y cantidades deseadas, se requerirán sustitutos y/o procesamiento adicional, lo que puede afectar significativamente el costo del producto. Por ejemplo, si necesitamos una barra redonda de cierto diámetro y no está disponible, tendremos que comprar una más grande y reducir su diámetro por algún medio (como maquinado, estirado a través de una matriz o rectificado). Sin embargo, con frecuencia se puede cambiar el diseño de un producto para aprovechar las dimensiones normales de las materias primas y evitar así costos de manufactura adicionales.

La *confiabilidad del suministro* y la demanda del material afectan el costo. La mayoría de los países importan numerosas materias primas que son fundamentales para la manufactura. Por ejemplo, Estados Unidos importa la mayoría de los siguientes materiales: hule natural, diamante, cobalto, titanio, cromo, aluminio y níquel. Las amplias implicaciones geopolíticas de tal confianza en otros países son evidentes. La confiabilidad del suministro también es importante en algunas industrias, particularmente la automotriz, en donde es crucial que los materiales y componentes arriben a tiempo a la planta.

Los diferentes métodos de procesamiento de los materiales tienen diferentes costos. Algunos requieren maquinaria costosa; otros, mano de obra intensiva, y los más exigen personal con habilidades especiales, un alto nivel de educación o capacitación especializada.

Apariencia, vida de servicio y reciclamiento. Una vez que se han manufacturado los materiales, la apariencia de los productos influye en su atractivo para el consumidor. El color, la sensación y la textura superficial son características que todos consideramos al decidir la compra de un producto en particular.

También son importantes los fenómenos que dependen del tiempo y del servicio, como el desgaste, la fatiga, el deslizamiento y la estabilidad dimensional. Estos fenómenos podrían afectar significativamente el desempeño de un producto y, si no se controlan, causar un funcionamiento deficiente o la falla del producto. Es importante además la compatibilidad de los materiales utilizados en un producto. La fricción y el desgaste, la corrosión (incluyendo la corrosión galvánica entre partes coincidentes pero hechas de metales no similares) y otros fenómenos pueden acortar la vida de un producto o hacer que falle prematuramente.

En la medida en que tomamos mayor conciencia sobre la necesidad de conservar recursos y de mantener un medio ambiente limpio y saludable, adquiere más relevancia el reciclamiento o la disposición apropiada de los materiales componentes de un producto al final de su vida útil. Como ejemplos están los casos de los materiales biodegradables para empaque, de las botellas de plástico reciclable y de las latas de aluminio para bebidas. El tratamiento apropiado y la disposición de los desechos y materiales tóxicos también son consideraciones importantes.

EJEMPLO I.3 Selección de materiales para monedas de Estados Unidos

Cada año se acuñan miles de millones de monedas. Los materiales que utiliza la Casa de Moneda de Estados Unidos para fabricarlas han sufrido cambios significativos a través de la historia, debido principalmente a la escasez de materiales y al costo cambiante de las materias primas. En la siguiente tabla se muestra el desarrollo cronológico de las sustituciones de materiales (ver capítulos 5 y 6) en las monedas. Estos materiales, o la combinación de los mismos, necesitan impartir propiedades apropiadas a las monedas durante su circulación y uso.

1793–1837	100% cobre
1837–1857	95% cobre, 5% estaño y zinc (bronce)
1857–1863	88% cobre, 12% níquel (níquel-bronce)
1864–1962	95% cobre, 5% estaño y zinc (bronce)
1943 (años de la Segunda Guerra Mundial)	Acero (recubierto con zinc)
1962–1982	95% cobre, 5% zinc (bronce)
1982–presente	97.5% zinc, recubierto con 2.5% de cobre

EJEMPLO I.4 Selección de materiales para bates de béisbol

Generalmente, los bates de béisbol para las Grandes Ligas se fabrican de fresno blanco del norte debido a su alta estabilidad dimensional, módulo elástico, relación de resistencia a peso y resistencia al impacto. Los bates se fabrican en tornos semiautomáticos (sección 23.3.4) y después se someten a operaciones de acabado (sección 26.7). Cada vez se vuelve más difícil encontrar el grano uniforme recto requerido para tales bates, particularmente cuando la mejor madera proviene de fresnos que tienen cuando menos 45 años de edad.

Durante algunos años se han fabricado bates de aluminio para el mercado amateur (parte superior de la fig. I.6) mediante diversas técnicas de formado metálico (parte III). Aunque al principio no eran tan buenos como los de madera, la tecnología ha avanzado tanto que ahora estos bates se fabrican con tubo de aluminio de alta resistencia y poseen características deseables de desempeño, como distribución del peso, centro de percusión, y dinámica del sonido y del impacto. Usualmente se rellenan con poliuretano o corcho, para amortiguar el sonido y controlar su equilibrio. Sin embargo, pueden ser sensibles a defectos superficiales que se desarrollan durante su uso normal y suelen fallar por fatiga debido al uso repetido (carga cíclica, sección 2.7).



FIGURA I.6 Secciones transversales de bates fabricados con aluminio (parte superior) y material compósito (parte inferior).

Se han desarrollado materiales compósitos para bates que consisten en fibras de vidrio y grafito de alta resistencia en una matriz de resina epóxica (capítulo 9). El mango interno tejido (parte inferior de la fig. I.6) se fabrica con fibras de Kevlar, que agrega resistencia y amortigua las vibraciones en el bate. El precio de estos bates es de aproximadamente 125 dólares, y por su comportamiento y sonido son muy parecidos a los bates de madera. *Fuente:* Mizuno Sports Inc.

I.5 Selección de procesos de manufactura

La producción de partes exige una extensa variedad de procesos de manufactura en continua expansión, y por lo general hay más de un método de manufactura para una parte a partir de un material dado. Las categorías de dichos métodos son las siguientes, y se encuentran referidas a las partes correspondientes en el texto e ilustradas con ejemplos para cada una de ellas:

a. **Fundición:** De molde desechable y de molde permanente (parte II); figura I.7a.
b. **Formado y moldeado:** Laminado, forjado, extrusión, estirado o trefilado, formado de lámina, metalurgia de polvos y moldeo (parte III); figuras I.7b a I.7d.
c. **Maquinado:** Torneado, mandrinado, taladrado, fresado, cepillado, escariado y rectificado, maquinado ultrasónico, maquinado químico, eléctrico y electroquímico; y

maquinado por rayo de alta energía (parte IV); figura I.7e; esta categoría también incluye el **micromaquinado,** para producir partes de ultraprecisión (parte V).

d. Unión: Soldado, soldadura blanda, soldadura fuerte, unión por difusión, unión por adhesivos y unión mecánica (parte VI); figura I.7f.

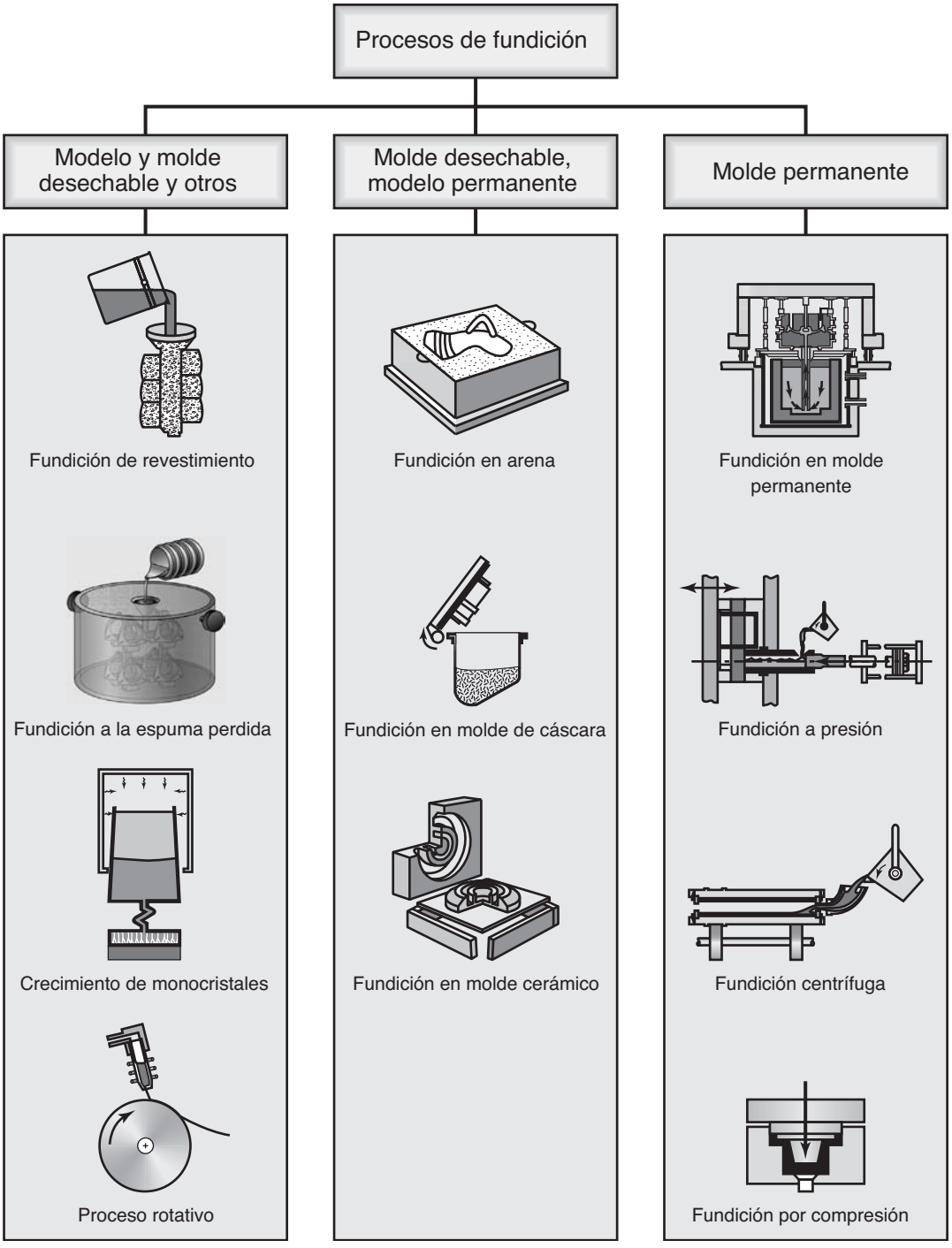


FIGURA I.7a Esquemas de diversos procesos de fundición.

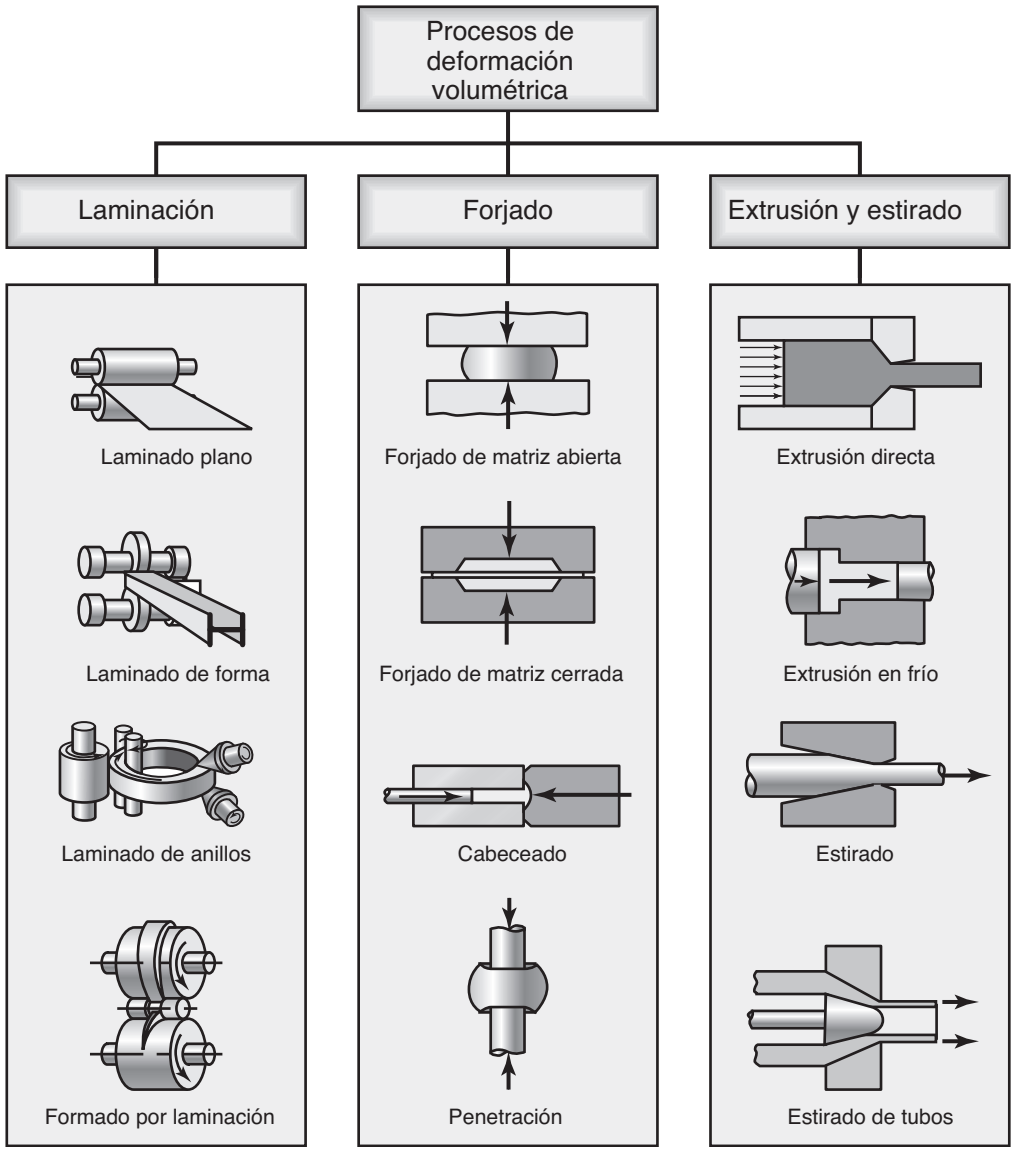


FIGURA I.7b Esquemas de diversos procesos de deformación volumétrica.

e. **Acabado:** Asentado, lapidado, pulido, satinado, rebabeado, tratamiento superficial, recubrimiento y chapeado (capítulos 26 y 35).

f. **Nanofabricación:** Es la tecnología más avanzada, capaz de producir partes con dimensiones en el nivel nano (una milmillonésima); típicamente comprende procesos como técnicas de ataque, haces de electrones y rayos láser. Las aplicaciones actuales son la fabricación de sistemas microelectromecánicos (MEMS) y sistemas nanoelectromecánicos (NEMS), que funcionan en la misma escala que las moléculas biológicas.

La selección de un proceso particular de manufactura, o de una secuencia de procesos, depende no sólo de la forma a producir, sino también de factores relativos a las propiedades de los materiales. Por ejemplo, los materiales frágiles y duros no se pueden

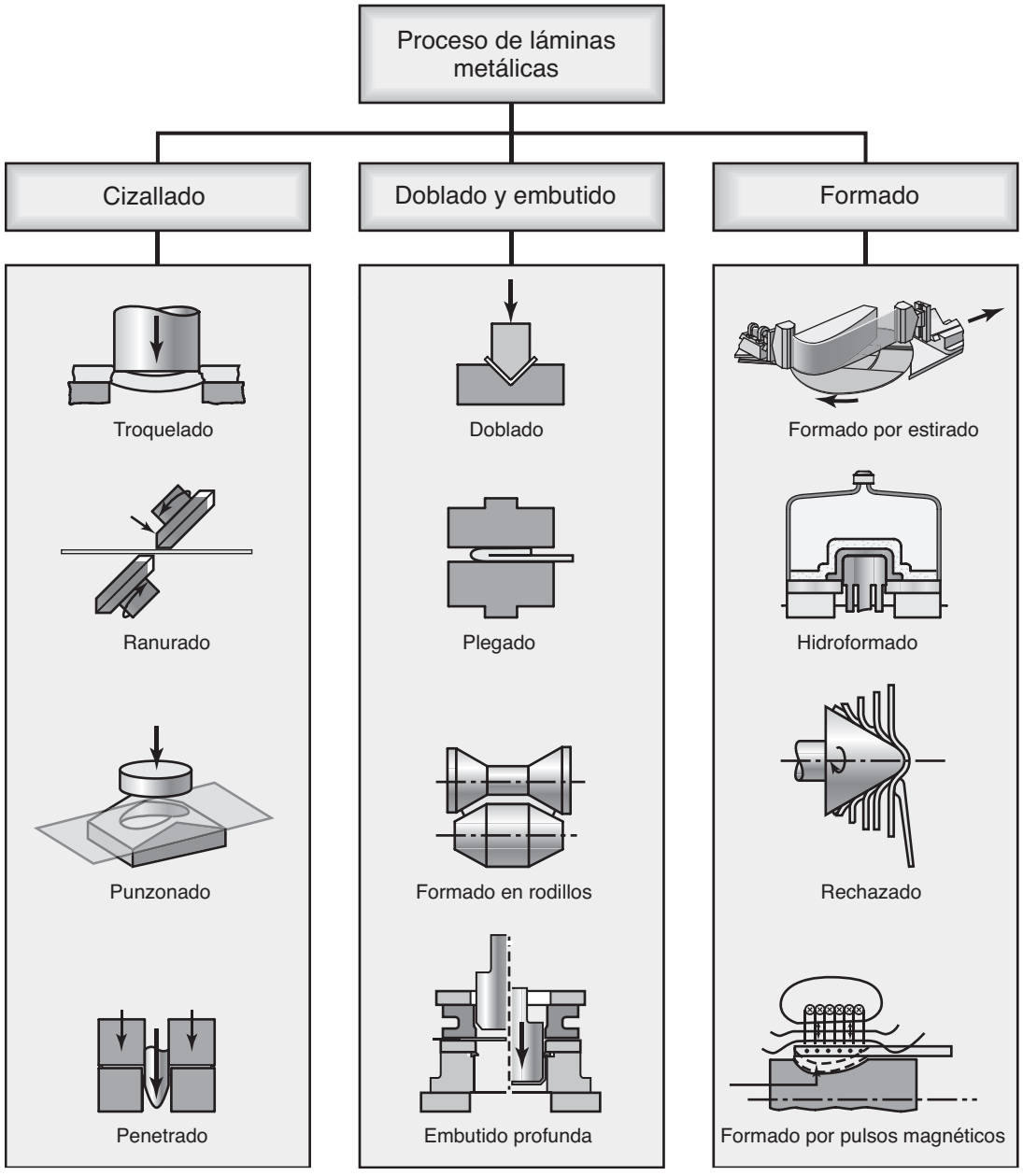


FIGURA I.7c Esquemas de diversos procesos de formado de hojas metálicas.

moldear y tampoco se les puede dar forma fácilmente, aunque se pueden fundir, maquinar o rectificar. Los metales a los que se ha dado forma a temperatura ambiente se vuelven más fuertes y menos dúctiles que como eran antes de procesarlos, y por lo tanto requieren mayores fuerzas y son menos formables durante el procesamiento posterior (secundario).

Como se describe a lo largo de este texto, cada proceso de manufactura tiene sus propias ventajas y limitaciones, capacidades de producción y costos de productos. A menudo los ingenieros de manufactura se ven obligados a buscar nuevas soluciones a problemas de manufactura y de reducción de costos. Por ejemplo, las partes fabricadas con

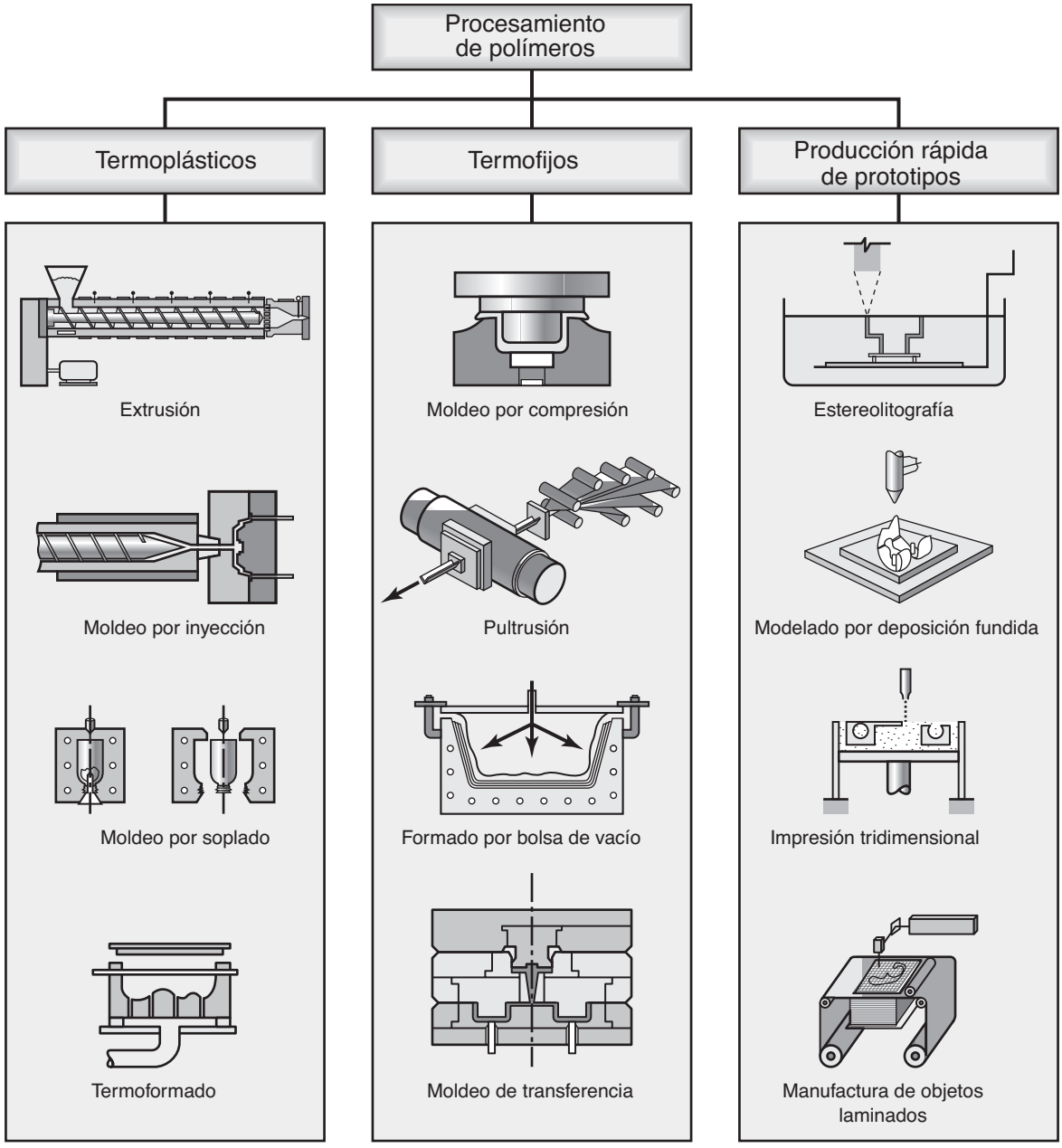


FIGURA I.7d Esquemas de diversos métodos de procesamiento de polímeros.

hojas metálicas suelen cortarse y fabricarse mediante herramientas mecánicas comunes, troqueles y matrices. Aunque aún se utilizan ampliamente, algunas de estas operaciones están siendo reemplazadas por técnicas de corte con láser (fig. I.8), cuya trayectoria se puede controlar, incrementando así la capacidad para producir una amplia variedad de formas con precisión, repetitiva y económicamente, y eliminando la necesidad de troqueles y matrices. Sin embargo, como era de esperarse, la superficie producida por el troquelado tiene características diferentes de las producidas por el corte con láser.

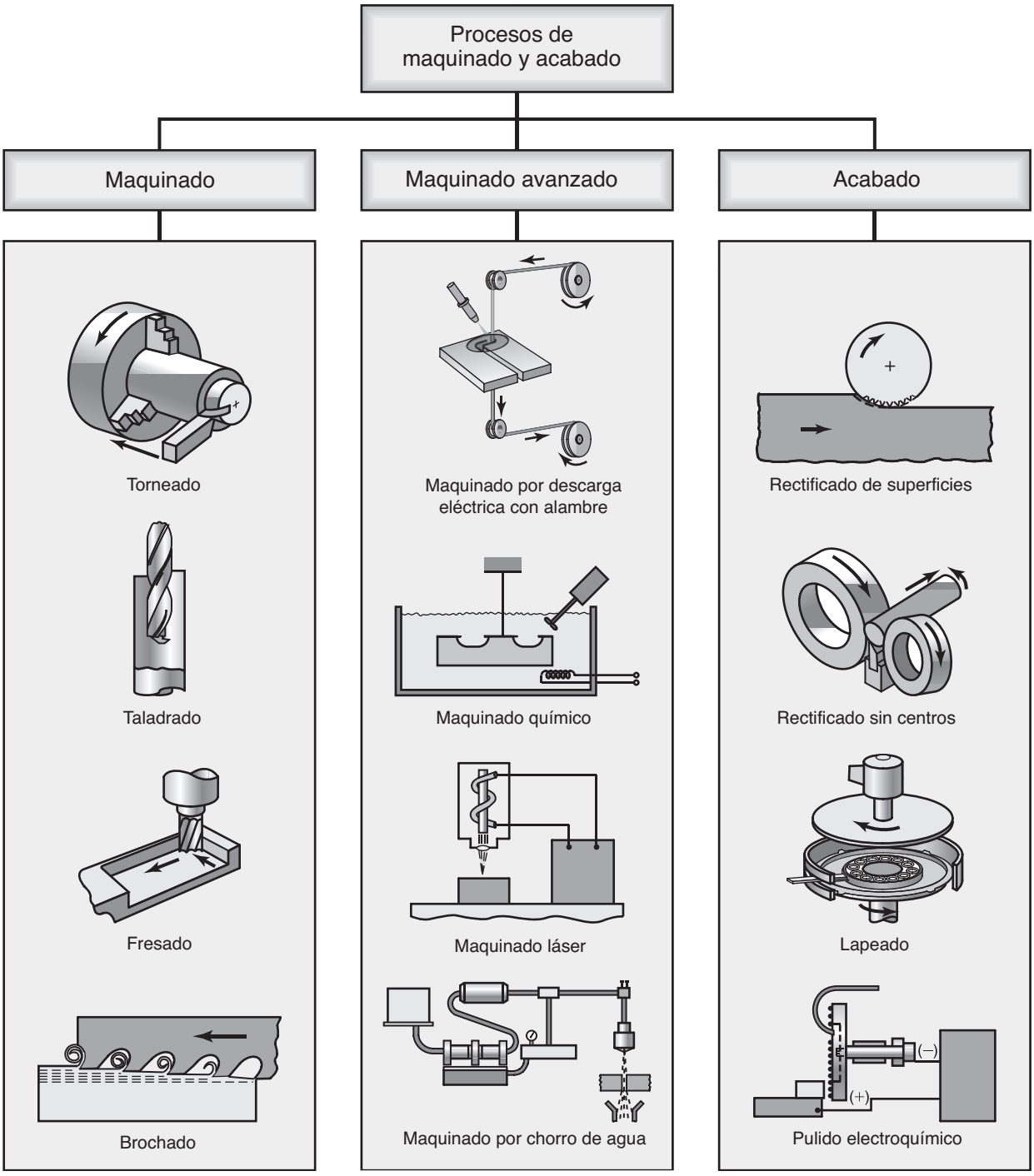


FIGURA I.7e Esquemas de diversos procesos de maquinado y acabado.

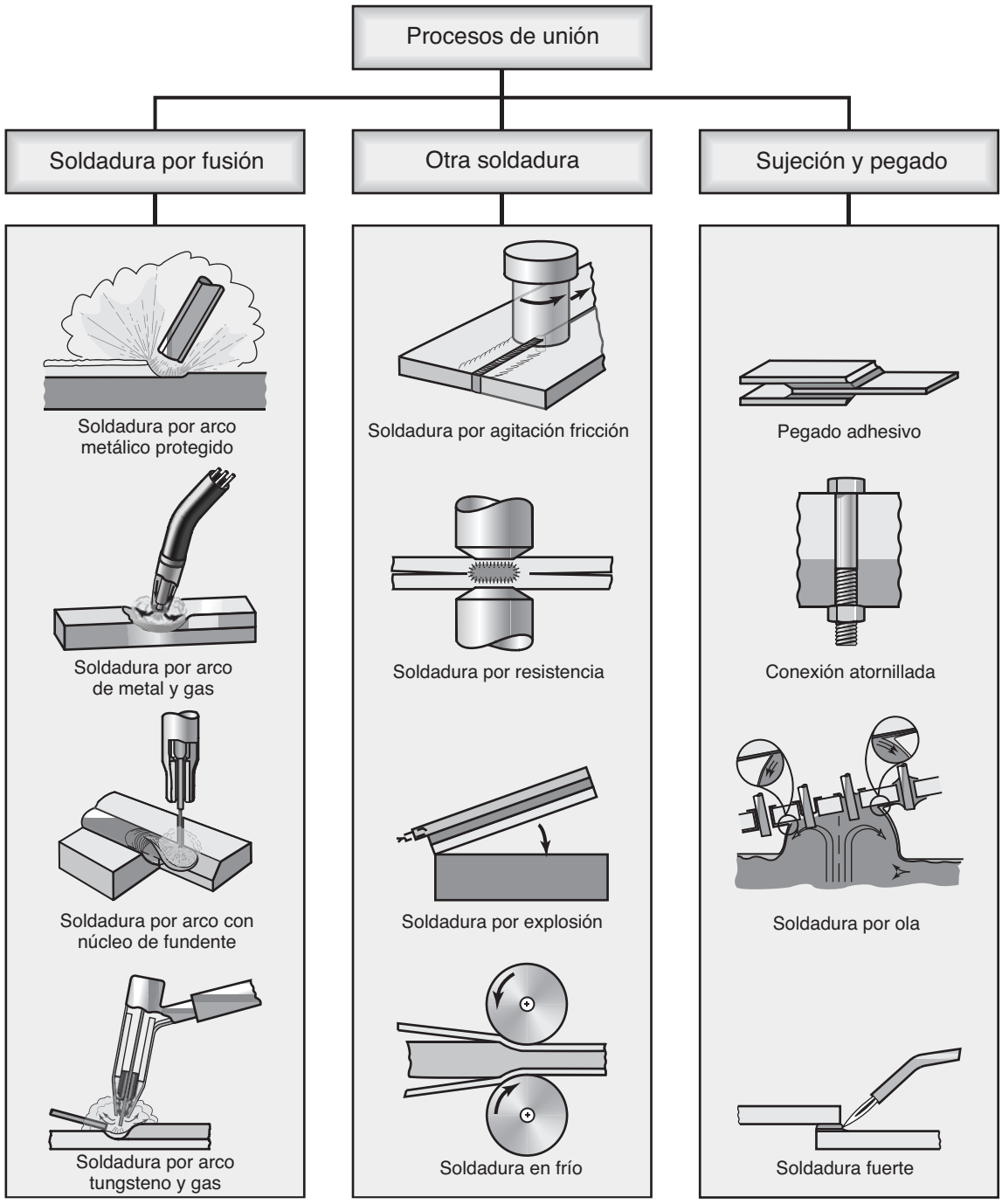


FIGURA I.7f Esquemas de diversos procesos de unión.

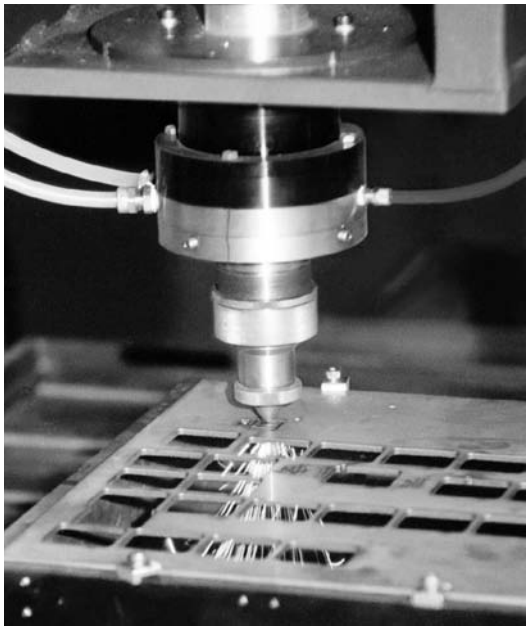


FIGURA I.8 Corte de una hoja metálica con rayo láser. *Fuente:* Cortesía de Rofin-Sinar, Inc. y *Manufacturing Engineering Magazine*, Society of Manufacturing Engineers.

EJEMPLO I.5 Manufactura de una prótesis de cadera

En este ejemplo describimos los retos y las opciones comprendidas en la manufactura de un producto de importancia creciente, como es la prótesis de cadera. Cada año se realizan más de dos millones de cirugías de reemplazo de cadera, para tratar condiciones dolorosas, y con frecuencia artríticas, los cuales permiten a sus usuarios mantener estilos de vida activos en las últimas etapas de su existencia. Una prótesis de cadera consta de varios componentes (fig. I.9), incluyendo un vástago, una bola, una cuenca y un recubrimiento. Este ejemplo se concentra en el vástago, y se restringe a los vástagos metálicos, como se muestra en la figura I.10.

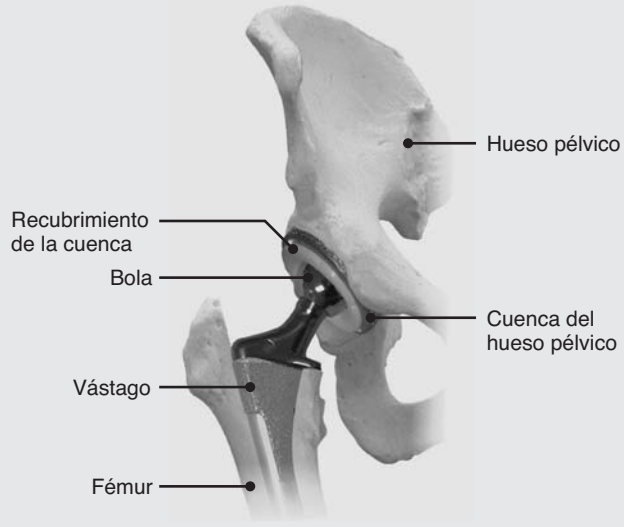


FIGURA I.9 Componentes de una prótesis de cadera. *Fuente:* Cortesía de Zimmer, Inc.

La prótesis de cadera se somete a un ambiente muy demandante. La carga normal de la prótesis en cada paso es de tres a cuatro veces el peso del cuerpo del usuario y cada año se dan aproximadamente dos millones de pasos, por lo que el implante se somete a una carga de fatiga (sección 2.7). Cuando se tropieza o se viaja, la carga puede ser de 10 a 15 veces el peso del cuerpo. Una vez implantada, la prótesis se rodea de tejido y fluidos, cuya interacción puede corroer el implante.

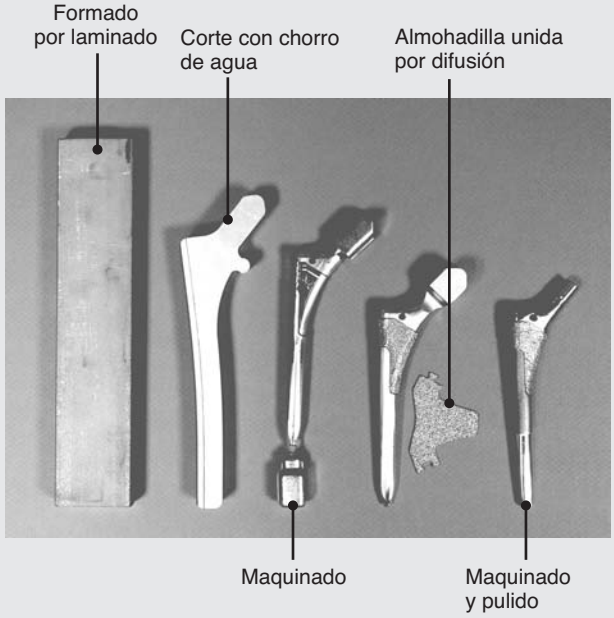


FIGURA I.10 *(a)* Pasos de la manufactura de una prótesis de cadera, formada por laminación y maquinado; *(b)* pasos de la manufactura de un vástago forjado. Las prótesis de cadera también se pueden producir mediante fundición de revestimiento, moldeo por inyección de metal y otros procesos varios. *Fuente:* Cortesía de Zimmer, Inc.

Se han utilizado exitosamente varios materiales y combinaciones de procesos en las prótesis de cadera. Los materiales se restringen a opciones aprobadas por las agencias gubernamentales para usarse dentro del cuerpo humano. Muchas prótesis de cadera se construyen con aleaciones de titanio (Ti-6Al-4V; sección 6.7) o de cobalto-cromo (sección 6.6), aunque también se utilizan el tantalio y los aceros inoxidables.

Existen varias estrategias de manufactura para producir las prótesis de cadera. Aquí se describen cuatro métodos.

Prótesis laminadas y maquinadas. En la figura I.10a se muestra un método de producción de prótesis para cadera, que comprende los pasos siguientes:

- Se utiliza titanio en la forma de barra laminada, a fin de producir tochos para la prótesis. La barra tiene excelentes propiedades materiales y es de fácil suministro. Una preforma se produce mediante el corte con chorro de agua (sección 27.8)
- La forma general de la prótesis se produce en una fresadora CNC (sección 24.2.8). Obsérvese que en esta etapa el vástago aún tiene algún material para soporte en la máquina; estas regiones se retiran posteriormente.
- Después se sujeta una almohadilla de fibra metálica a una parte del vástago mediante unión por difusión (sección 31.7). El objetivo de la almohadilla es promover el crecimiento del hueso dentro de ella y proporcionar una unión adecuada entre el implante y el hueso.
- El vástago se termina maquinándolo y puliéndolo (sección 26.7). El maquinado produce la cabeza cónica, que tiene tolerancias cerradas para que pueda coincidir apropiadamente con la bola. Obsérvese que algunas superficies exteriores se han pulido mucho para mejorar la resistencia a la fatiga y a la corrosión.
- Antes de quedar listo para insertarlo en un paciente, se realizan extensos procesos adicionales, como operaciones de limpieza, pasivación (sección 3.8), esterilización y empaque.

Prótesis forjadas y maquinadas. En la figura I.10b se muestra otro método de producción de prótesis para cadera, que comprende los pasos siguientes:

- Primero se produce una preforma mediante forjado en caliente de un tocho de una aleación de cobalto-cromo (sección 14.3). La rebaba o bigote producido en la forja de la preforma mostrada en la figura I.10b ha sido eliminada por troquelado y tiene dimensiones mayores, para permitir el maquinado posterior a tolerancias cerradas.
- Después el vástago es producido en una fresadora CNC, se retiran las proyecciones restantes y se obtienen los contornos y las tolerancias requeridos. Nótese que en este paso se ha maquinado un cono en la prótesis, pues no se necesitarán operaciones posteriores de maquinado o de soporte en un portapiezas.
- El forjado en caliente produce una capa significativa de óxido sobre la parte, que después se retira mediante electropulido (sección 26.7).
- Después la prótesis se pule para obtener la superficie lisa mostrada en la figura. Un análisis cuidadoso muestra algunas marcas adicionales realizadas mediante grabado con láser en el implante, para permitir al cirujano calibrar el grado de inserción dentro del fémur.

Prótesis fundidas. Un método común en la manufactura de prótesis para cadera consiste en producirlas a partir de una aleación cobalto-cromo, mediante el método de fundición de revestimiento (sección 11.2.6). En este proceso se elaboran modelos de cera de la prótesis, se ensamblan en un "árbol" y se recubren con cerámica. Se invierte el molde y se coloca dentro de un horno, en donde se funde y retira la cera y se funden las partículas cerámicas para aumentar la resistencia del molde. Éste se calienta y se coloca en una máquina de fundición, en donde se invierte y se llena con metal fundido. Después de que el molde se enfría, solidificando el metal, éste se retira del árbol y se maquina como se indicó antes, para alcanzar las tolerancias dimensionales deseadas y los acabados superficiales.

Metalurgia de polvos. También se pueden producir prótesis para cadera mediante el moldeo por inyección de metal. En este proceso (sección 17.3), un molde calentado tiene una cavidad que coincide con la geometría del vástago y se llena con una mezcla viscosa de polvo metálico y aglutinantes. El aglutinante se funde dentro de dicho molde, por lo que cuando se expele la parte tiene suficiente resistencia para propósitos de manipulación. Después la prótesis se pasa a un horno, donde se quema el aglutinante y se sinterizan (se unen) las partículas metálicas, para darle suficiente resistencia al implante.

Claramente, existen varios procesos de manufactura y combinaciones de materiales para fabricar estos implantes que han tenido éxito comercial. Muchos productos poseen más de una ruta de manufactura viable; seleccionar la adecuada es una de las tareas más creativas y desafiantes a las que se enfrentan los ingenieros de manufactura.

Fuente: Cortesía de M. Hawkins, Zimmer, Inc.

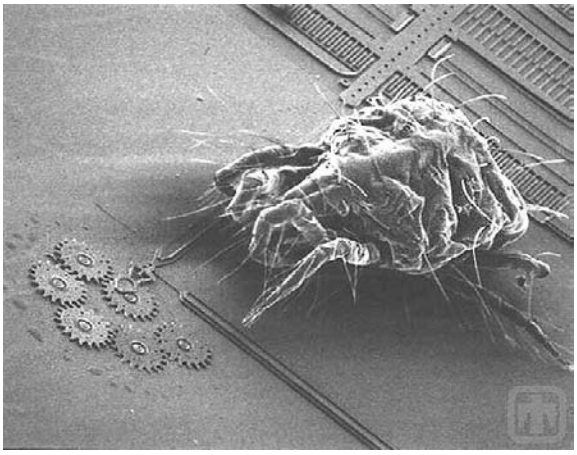
Precisión dimensional y acabado superficial. Las dimensiones y la complejidad de una parte tienen una influencia importante en el proceso de manufactura seleccionado para producirla. Por ejemplo, *(a)* las partes planas con secciones transversales delgadas no se pueden fundir de modo apropiado; *(b)* las partes complejas no se pueden conformar fácil y económicamente, en tanto que es posible fundirlas o fabricarlas de otra manera a partir de piezas individuales; *(c)* las tolerancias dimensionales y el acabado superficial obtenido en las operaciones de trabajo en caliente no pueden ser tan finas como las conseguidas en las operaciones de trabajo en frío (formado a temperatura ambiente), porque a temperaturas elevadas se presentan cambios dimensionales, distorsión y oxidación de la superficie; y *(d)* algunos procesos de fundición producen un mejor acabado superficial que otros, debido a los diferentes tipos de materiales de moldeo utilizados.

Los tamaños y las formas de los productos manufacturados varían ampliamente. Por ejemplo, el tren de aterrizaje principal del jet comercial de 400 pasajeros Boeing 777, de dos motores, tiene 4.3 m (14 pies) de alto, con tres ejes y seis ruedas; está fabricado mediante una combinación de procesos de forjado y maquinado. El diámetro de una rueda (cangilones y cubierta) de una turbina hidráulica es de 4.6 m (180 pulgadas) y pesa 50,000 kg (110,000 libras); se fabrica mediante fundido en arena. El rotor de una turbina de vapor grande se fabrica mediante forjado en caliente y maquinado y pesa 300,000 kg (700,000 libras).

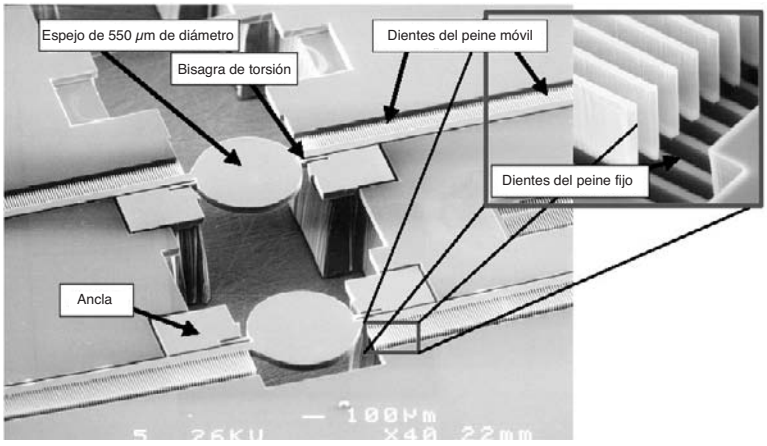
En el otro extremo dimensional se encuentran la producción de engranes microscópicos (fig. I.11a) y el producto mostrado en la figura I.11b. En este mecanismo se suspende un espejo de una viga giratoria y se puede inclinar mediante atracción electrostática, al aplicar un voltaje en cualquier lado del espejo (obsérvese la escala de 100 μm en la parte inferior de la figura). A estas operaciones de manufactura se les denomina *nanofabricación*.

Las técnicas y la maquinaria de **manufactura de ultraprecisión** se han desarrollado rápidamente y se están volviendo de uso más común. Por ejemplo, para maquinar superficies metálicas como espejos, la herramienta de corte es un diamante muy afilado y el equipo tiene una rigidez muy elevada; se acciona en un cuarto donde la temperatura se controla en 1 °C. Se están implantando técnicas muy sofisticadas, como la epitaxia de haz molecular y la ingeniería de exploración-perforación, para obtener precisiones del orden de la red atómica (0.1 nm; 10^{-8} pulgadas).

Costos operativos y de manufactura. El diseño y costo del herramental, el tiempo requerido para iniciar la producción y el efecto del material de la pieza de trabajo en la vida de la herramienta y de la matriz son otros factores que se deben considerar. Según el tamaño y la forma del producto, el costo del herramental puede ser sustancial. Por ejemplo, un juego de matrices de acero para estampar defensas de lámina metálica para automóviles podría costar alrededor de 2 millones de dólares. En las partes fabricadas con materiales costosos, cuanto menor sea el volumen de desperdicio, más económico resultará el proceso de producción; por ello, se debe hacer cualquier intento por *minimizar*



(a)



(b)

FIGURA I.11 *(a)* Engranes microscópicos con ácaro del polvo. *Fuente:* Cortesía de Sandia National Laboratory; *(b)* Microespejo móvil componente de un detector de luz. *Fuente:* Cortesía de Richard Mueller, University of California en Berkeley.

el desperdicio. En la medida en que genera virutas, el maquinado no puede ser económico en comparación con las operaciones de formado si se mantienen iguales todos los otros factores.

La disponibilidad de máquinas y equipo dentro de la instalación manufacturera, así como la experiencia del personal operativo, también son factores importantes del costo. Si no se cuenta con estas capacidades, algunas partes tienen que manufacturarse en compañías externas (*outsourcing*). Por ejemplo, los fabricantes de automóviles y aparatos domésticos compran muchas partes de proveedores externos, o piden a firmas externas que los fabriquen conforme a sus especificaciones.

La *cantidad* de partes a fabricar y la *capacidad de producción* (piezas por hora) son importantes para determinar los procesos que se utilizarán y la economía de la producción. Por ejemplo, las latas para bebidas, los engranes y las computadoras se producen en números y a velocidades mucho mayores que los motores para aviones, tractores

o embarcaciones. Las cantidades pequeñas (lotes de pequeño tamaño) se pueden manufacturar en **talleres** con máquinas de propósito general. La **producción de lotes pequeños**, de entre 10 y 100 al año, se realiza en máquinas similares, así como en máquinas con diversos controles computarizados. Usualmente, la **producción en lotes** comprende tamaños de lote de entre 100 y 5000, y con frecuencia la **producción en masa** es superior a 100,000, utilizando maquinaria de propósito especial (*máquinas dedicadas*) y diversos equipos automatizados para transferir materiales y partes.

El proceso de manufactura en particular y la operación de la maquinaria pueden afectar significativamente el medio ambiente y la seguridad. Eso sucede, por ejemplo, al usar lubricantes a base de petróleo en las operaciones de trabajo en caliente de los metales, o al emplear diferentes productos químicos en las operaciones de tratamiento por calor, recubrimiento y limpieza. A menos que se controlen de manera apropiada, estas y otras actividades pueden contaminar el aire o el agua, o causar ruido. El uso con seguridad de la maquinaria es una consideración adicional importante, que requiere precauciones para eliminar riesgos en el lugar de trabajo.

Consecuencia de la selección inapropiada de materiales y procesos. Se pueden proporcionar numerosos ejemplos de fallas de productos debidas a la selección inapropiada de materiales o procesos de manufactura, o al control insuficiente de las variables del proceso. Generalmente se considera que ha fallado un componente o un producto cuando:

- Deja de funcionar (rotura de flecha, engrane, tornillo, cable o álabe de turbina).
- No funciona apropiadamente o no satisface las especificaciones requeridas (desgaste de rodamientos, engranes, herramientas y matrices).
- Resulta poco confiable o inseguro para usos posteriores (grieta en una flecha, conexión deficiente en un tablero de circuito impreso o delaminación de un componente de plástico reforzado).

A lo largo de este texto, describiremos los tipos de falla de un componente o de un producto debido a posibles deficiencias de diseño, selección inapropiada de materiales, defectos de materiales, defectos inducidos por la manufactura, ensamble inapropiado de componentes y uso inapropiado del producto.

Manufactura de forma neta. Es posible que un proceso particular de manufactura no produzca una parte terminada, por lo que podrían necesitarse operaciones adicionales. Por ejemplo, una parte forjada puede no tener las dimensiones deseadas o el acabado superficial; en consecuencia, harían falta operaciones adicionales, como el maquinado o el rectificado. De igual manera, puede ser difícil, imposible o antieconómico producir una parte con orificios utilizando un solo proceso de manufactura, y por lo tanto podría requerirse algún proceso posterior, como el taladrado, o producir el orificio utilizando diversos métodos avanzados, como medios químicos o eléctricos. Además, es posible que los orificios producidos mediante un proceso particular de manufactura no tengan la redondez, la precisión dimensional o el acabado superficial apropiado, por lo que requieran una operación adicional, como el asentado.

Las operaciones adicionales en una parte pueden contribuir significativamente al costo de un producto. En consecuencia, el concepto de *forma neta*, o *manufactura cercana a la forma neta,* se ha vuelto muy importante, debido a que la parte se fabrica lo más cerca posible de las dimensiones finales deseadas, tolerancias, acabado superficial y especificaciones mediante la primera operación. Ejemplos característicos de dichos métodos de manufactura son el forjado (capítulo 13) y la fundición (capítulo 11), estampado de láminas metálicas (capítulo 16), moldeo de plásticos por inyección (capítulo 19) y componentes fabricados mediante técnicas de metalurgia de polvos (capítulo 17).

EJEMPLO I.6 Manufactura de un salero y molino de pimienta

Un producto utilizado comúnmente en el hogar es el juego de salero y molino para pimienta. El mostrado en la figura I.12 contiene componentes metálicos y no metálicos; los principales se producen mediante el moldeo por inyección de un termoplástico, como el acrílico, que tiene tanto transparencia como otras características deseables y además es fácil de moldear. La tapa del salero se fabrica con lámina metálica y se recubre para resaltar su apariencia. La perilla en la tapa del molino se fabrica mediante maquinado y se rosca en el interior para permitir atornillarla y desatornillarla. La varilla cuadrada que conecta la tapa del molino a las dos piezas mostradas en la parte inferior de la figura se produce mediante laminado. Los dos componentes de molienda están hechos de acero inoxidable por medio de técnicas de metalurgia de polvos. Un análisis indicó que fundirlos o maquinarlos habría sido muy costoso.



FIGURA I.12 Juego de salero y molino de pimienta. Las dos piezas metálicas (en la parte inferior) del molino se fabrican mediante técnicas de metalurgia de polvos. *Fuente:* Reproducido con permiso de *Success Stories on P/M Parts*, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, 1998.

I.6 Diseño y manufactura consciente del medio ambiente

Sólo en Estados Unidos, cada año se desechan nueve millones de automóviles de pasajeros y aproximadamente 300 millones de llantas, de las cuales cerca de 100 millones se reutilizan de diversas maneras. Cada año se desechan más de cinco mil millones de kilogramos de productos plásticos, y cada tres meses las industrias y los consumidores desechan aluminio suficiente para reconstruir la flota aérea comercial del país. Además, *(a)* se utilizan lubricantes y refrigerantes en la mayoría de las operaciones de manufactura; *(b)* diversos fluidos y solventes que se utilizan en productos manufacturados para limpieza contaminan el aire y las aguas durante su uso; *(c)* muchos artículos derivados de las plantas de manufactura se han desechado por años (por ejemplo, arena con aditivos empleada en los procesos de fundición de metales; agua, aceite y otros fluidos de las instalaciones de tratamiento por calor y de las operaciones de recubrimiento; escoria de las fundiciones y de las operaciones de soldadura); y *(d)* una amplia variedad de chatarra metálica y no metálica, producida en operaciones como el formado de hojas, fundición y moldeo.

Los efectos adversos de estas actividades, el daño que provocan a nuestro ambiente y al ecosistema de la Tierra, y, finalmente, su efecto sobre la calidad de la vida humana, son bien reconocidos. Las mayores preocupaciones son la contaminación del agua y del aire, la lluvia ácida, la reducción de la capa de ozono, el efecto invernadero, los residuos peligrosos, la filtración de los rellenos sanitarios y el calentamiento global. En respuesta a estas inquietudes, en Estados Unidos y en otros países industrializados se han promulgado numerosas leyes y reglamentos.

Se puede ganar mucho mediante un análisis detallado y cuidadoso de los productos, su diseño, los tipos de materiales que se utilizan en su fabricación, los procesos de manufactura y las prácticas empleadas para elaborarlos, así como los desperdicios producidos. Para dicho análisis, se pueden seguir algunos lineamientos:

- Reducir el desperdicio de materiales mediante el refinamiento del diseño del producto y la reducción de la cantidad de materiales utilizados.
- Reducir el uso de materiales peligrosos en productos y procesos.
- Realizar investigación y desarrollo en productos ambientalmente seguros y en tecnologías de manufactura.
- Asegurar el adecuado manejo y disposición de todo desecho.
- Realizar mejoras en el reciclamiento, tratamiento de residuos y reutilización de materiales.

A menudo tienen lugar desarrollos importantes relacionados con estas materias y ahora es común el uso del concepto **diseño y manufactura consciente del medio ambiente** en las industrias manufactureras. Se hace un énfasis importante en el **diseño para el medio ambiente** (DFE) o **diseño verde**. Este método se anticipa al posible impacto adverso de materiales, productos y procesos en el ambiente, para que pueda tenerse en cuenta en las etapas iniciales de diseño y producción. Los principales objetivos son evitar la contaminación en la fuente y promover el reciclamiento y la reutilización en lugar de la disposición. Estas metas han llevado al concepto de **diseño para reciclamiento** (DFR). El diseño verde tiene implicaciones de largo alcance para muchos de los procesos de manufactura. Por ejemplo, en la industria automotriz se desea mejorar la economía del combustible sin comprometer el desempeño, la seguridad o el lujo. Una manera de alcanzar simultáneamente estas metas es utilizar materiales con una alta relación de resistencia a peso, que ha promovido la consideración de aleaciones de aluminio, compósitos de polímeros de matriz metálica y reforzados con fibras, y la optimización de diseños en todos los automóviles.

En la industria automotriz de Estados Unidos, por ejemplo, aproximadamente 75% de las partes automotrices, en su mayoría metales, ahora se recicla, y existen planes para reciclar el resto también, incluyendo plásticos, vidrio, hule y espuma. Los beneficios del reciclamiento también son evidentes en un estudio donde se muestra que producir aluminio a partir de chatarra, en lugar de mineral de bauxita, cuesta sólo una tercera parte y reduce el consumo de energía y la contaminación en más de 90%. Por otra parte, los cartuchos para copiadoras e impresoras son retornables al fabricante, quien los repara, les reemplaza algunas partes y los vende nuevamente. Esto significa que los cartuchos deben diseñarse para facilitar el desensamble, usando ajustes a presión en lugar de tornillos, que requieren mayor tiempo para ser retirados.

Las normas ISO 14000 se refieren a la administración del medio ambiente. Establecen lo que una compañía puede hacer para minimizar los daños ambientales provocados por sus actividades y lograr una mejora continua de su desempeño ambiental.

I.7 Manufactura integrada por computadora

Luego de comenzar con las gráficas computarizadas, el modelado, el diseño y la manufactura asistidos por computadora, el uso de estas máquinas se ha extendido a la **manufactura asistida por computadora** (CIM), en la que se integran el software y el hardware desde

la concepción del producto hasta su distribución en el mercado. La manufactura asistida por computadora es particularmente efectiva debido a su capacidad para hacer posible:

- Responder a los rápidos cambios en la demanda del mercado y las modificaciones del producto.
- Utilizar mejor los materiales, la maquinaria y el personal, y reducir inventarios.
- Controlar mejor la producción y la administración de la operación total de manufactura.
- La manufactura de productos de alta calidad a bajo costo.

La siguiente es una descripción de las aplicaciones importantes de las computadoras en la manufactura, que se describen con detalle en los capítulos 38 y 39:

a. **Control numérico computarizado** (CNC). Implantado al comenzar la década de 1950, es un método que controla los movimientos de los componentes de una máquina mediante la inserción de instrucciones codificadas en forma de datos numéricos.
b. **Control adaptable** (AC). Los parámetros de un proceso de manufactura se ajustan automáticamente tanto para optimizar la velocidad de producción y la calidad del producto como para minimizar el costo. Se supervisan con frecuencia parámetros tales como fuerzas, temperaturas, acabado superficial y dimensiones de la parte; si se salen de un rango aceptable, el sistema ajusta las variables del proceso hasta que los parámetros caen otra vez dentro del rango especificado.
c. **Robots industriales.** Introducidos al comenzar la década de 1960, los robots industriales (fig. I.13) han reemplazado a los seres humanos en operaciones repetitivas, peligrosas y aburridas, reduciendo la posibilidad de errores humanos y la variabilidad en la calidad del producto, además de mejorar la productividad. Se han desarrollado robots con capacidades de percepción sensorial (*robots inteligentes*), con movimientos que simulan los de los hombres.
d. **Manejo automatizado de materiales**. Las computadoras han hecho posible un manejo muy eficiente de materiales y componentes en diversas etapas de terminación (*trabajo en proceso*), por ejemplo, cuando se transportan del almacenamiento a las máquinas, de máquina a máquina y a puntos de inspección, inventario y embarque.

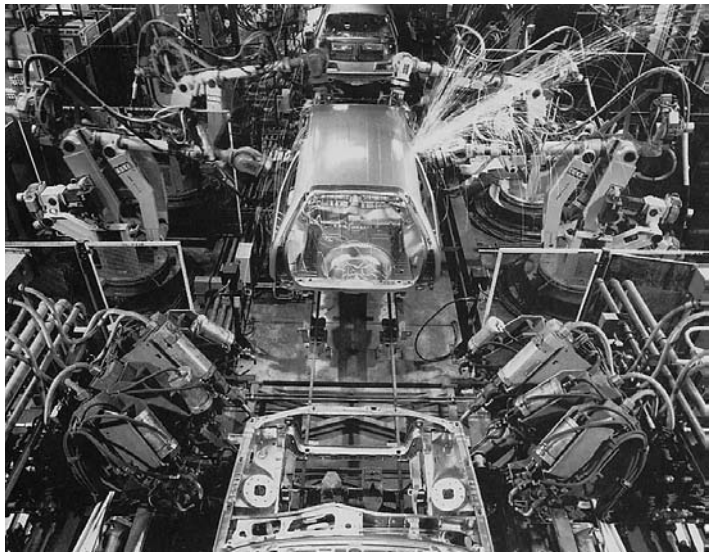


FIGURA I.13 Soldadura por puntos automatizada para cuerpos de automóviles en una línea de producción en masa. *Fuente:* Cortesía de Ford Motor Company.

e. **Sistemas de ensamble automatizado y robóticos**. Han reemplazado principalmente el costoso ensamble efectuado por operadores humanos, quienes, sin embargo, aún tienen que realizar algunas de estas operaciones. Ahora los productos se diseñan, o rediseñan, para que se puedan ensamblar de modo más fácil y rápido mediante máquinas.

f. **Planeación de procesos asistida por computadora** (CAPP). Este sistema puede mejorar la productividad optimizando los planes de procesos, reduciendo los costos de planeación y mejorando la consistencia de la calidad y confiabilidad del producto. También incorpora funciones como la estimación de costos y la supervisión de las normas de trabajo (tiempo requerido para realizar cierta operación).

g. **Tecnología de grupos** (GT). Este concepto significa que las partes se pueden agrupar y producir clasificándolas en familias, de acuerdo con las similitudes tanto de diseño como de los procesos de manufactura utilizados para fabricarlas. De esta manera, es posible estandarizar los diseños y los planes de proceso de las partes, con lo cual las familias o partes similares se pueden producir de modo eficiente y económico.

h. **Producción justo a tiempo** (JIT). Su característica principal es que las materias primas, las partes y los componentes se suministran al fabricante justo en el momento en que se van a utilizar; las partes y los componentes se producen justo cuando se van a integrar a subensambles y ensambles, y los productos se terminan justo a tiempo para entregarse al cliente. El resultado es que los costos de manejo de inventarios son bajos, los defectos de las partes se detectan de inmediato, se aumenta la productividad y se fabrican productos de alta calidad a bajo costo.

i. **Manufactura celular** (CM). Este sistema utiliza estaciones de trabajo (*celdas de manufactura*) que, por lo general, contienen varias máquinas de producción controladas por un robot central; cada máquina realiza una operación distinta sobre la parte.

j. **Sistemas de manufactura flexible** (FMS). Estos sistemas integran celdas de manufactura en una unidad mayor, donde se conectan a una computadora central. Aunque resultan muy costosos, los FMS son capaces de producir eficientemente partes en corridas pequeñas y de cambiar con rapidez las secuencias de manufactura en diferentes partes; esta flexibilidad les permite satisfacer cambios rápidos en la demanda del mercado para todo tipo de productos.

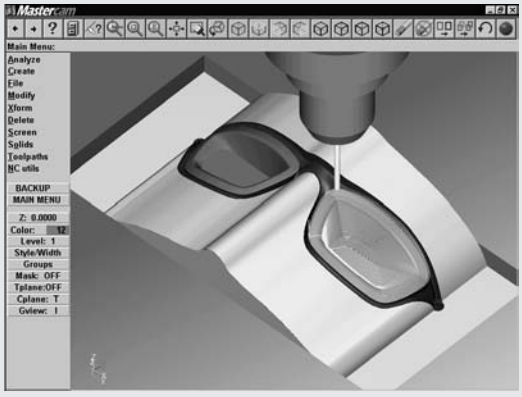
k. **Sistemas expertos** (ES). Estos sistemas son básicamente complejos programas de computadora que pueden realizar diversas tareas y resolver difíciles problemas de la vida real, de manera muy parecida a como lo harían humanos expertos.

l. **Inteligencia artificial** (AI). Este importante campo comprende el uso de máquinas y computadoras para reemplazar la inteligencia humana. Hoy los sistemas controlados por computadora son capaces de aprender de la experiencia y de tomar decisiones que optimicen las operaciones y minimicen los costos. Las **redes neuronales artificiales** (ANN), que se diseñan para simular los procesos del pensamiento humano, pueden modelar y simular instalaciones de producción, supervisar y controlar procesos de manufactura, diagnosticar problemas en el desempeño de la máquina, conducir una planeación financiera y administrar la estrategia de manufactura de una compañía.

En vista de estos continuos avances y de su potencial, algunos expertos han visualizado la **fábrica del futuro**. Aunque polémico y, para muchos, irreal, éste es un sistema en el que la producción tendrá lugar con muy poca o ninguna intervención humana directa. Se espera que el papel del ser humano se confine finalmente a la supervisión, mantenimiento y modernización de las máquinas, computadoras y software.

EJEMPLO I.7 Aplicación de CAD/CAM para fabricar un molde de anteojos para el sol

El molde metálico que se utiliza en el moldeo por inyección de anteojos de plástico para el sol se fabrica en una fresadora CNC, mediante una fresa radial con nariz esférica, como se ilustra en la figura I.14. Primero se fabrica un modelo de los anteojos para el sol en un paquete de software de diseño asistido por computadora, el cual genera automáticamente el molde. La información geométrica se envía a la fresadora de control numérico computarizado y se planean los pasos de maquinado.



(a)



(b)

FIGURA I.14 Maquinado de una cavidad de molde para fabricar anteojos para el sol. *(a)* Modelo de computadora de los anteojos para el sol como se diseñó y como se ve en el monitor. *(b)* Maquinado de la cavidad de la matriz utilizando una fresadora de control numérico computarizado. *(c)* Producto final. *Fuente:* Cortesía de Mastercam/CNC Software, Inc.



(c)

FIGURA I.14 (*continúa*)

Posteriormente se agrega una compensación en cada superficie para considerar el radio de la nariz de la fresa, determinando así la trayectoria de esta última (la trayectoria del centro del husillo de la máquina). El software de programación NC ejecuta después este programa de corte en una fresadora CNC, produciendo la cavidad de la matriz con las dimensiones y la precisión apropiadas. También se puede utilizar maquinado de descarga eléctrica o electroerosión (sección 27.5) para fabricar este molde; sin embargo, se encontró que el EDM era dos veces más costoso que el maquinado CNC del molde y que tenía menor precisión dimensional. *Fuente:* Cortesía de Mold Threads Inc.

I.8 Producción esbelta y manufactura ágil

Las tendencias descritas hasta aquí han llevado al concepto de producción esbelta (o manufactura esbelta). Aunque no se trata de un concepto novedoso, la *producción esbelta* es una metodología que comprende una evaluación profunda de cada una de las actividades de la compañía, a fin de minimizar el desperdicio en todos sus niveles. Éstos incluyen la eficacia y efectividad de todas sus operaciones, la eficacia de la maquinaria y del equipo, el número de personas involucradas en cada operación y la posible eliminación de algunas de sus operaciones y gerentes. Este método continúa con un análisis completo de los costos de cada actividad, incluyendo aquéllos debidos a la mano de obra productiva y no productiva.

Esta estrategia requiere un cambio fundamental en la cultura corporativa, así como un entendimiento de la importancia de la *cooperación y el trabajo en equipo* entre la gerencia y la fuerza laboral. Sus resultados no necesariamente exigen el recorte de los recursos; su objetivo es mejorar continuamente la eficacia y la rentabilidad de la compañía, eliminando todo desperdicio y lidiando con los problemas tan pronto como aparecen.

La *manufactura ágil* es un concepto que indica la implantación de los principios de la producción esbelta en una escala amplia. El principio detrás de la manufactura ágil es

el aseguramiento de la agilidad (de ahí la *flexibilidad*) en la empresa manufacturera, para que pueda responder rápidamente a los cambios en la demanda del producto y en las necesidades de los clientes. Esta flexibilidad se logra mediante la gente, el equipo, el hardware y software de cómputo y los sistemas avanzados de comunicaciones. Como ejemplo, se ha predicho que la industria automotriz podría configurar y construir un automóvil en tres días, y que, finalmente, la línea de ensamble tradicional será reemplazada por un sistema en el que se producirá un vehículo casi hecho a pedido del cliente conectando módulos individuales.

Estos planteamientos requieren que un fabricante *establezca referencias* (benchmarking) para sus operaciones, es decir, la posición competitiva de otros fabricantes con respecto a él mismo y metas realistas hacia el futuro. Por tanto, esa referenciación se convierte en un punto a partir del cual se pueden hacer diversas mediciones y contra el cual se pueden establecer comparaciones.

I.9 Aseguramiento de la calidad y administración de la calidad total

La calidad del producto es uno de los aspectos más importantes de la manufactura, ya que influye directamente en la capacidad de mercadeo del artículo y en la satisfacción del cliente. La práctica de inspeccionar los productos luego de fabricados ha sido reemplazada en gran medida por una visión más amplia, consistente en que la *calidad debe integrarse en el producto* desde la etapa de diseño y a lo largo de todas las fases subsecuentes de manufactura y ensamble. Debido a que los productos suelen fabricarse mediante varios procesos de manufactura, cuyo desempeño puede variar de modo significativo incluso en un periodo corto, el control de los procesos es un factor crítico en la calidad del producto. Por ello, el objetivo debe ser *controlar procesos, no productos*.

Producir artículos defectuosos puede ser muy costoso para un fabricante, al crear dificultades en las operaciones de ensamble, necesitar reparaciones en el campo y provocar la insatisfacción del cliente. La **integridad del producto** es un término que generalmente se utiliza para definir el grado en que un artículo: *(a)* es adecuado para el propósito que se busca; *(b)* responde a la demanda real del mercado; *(c)* funciona de manera confiable durante su esperanza de vida; y *(d)* puede recibir mantenimiento con relativa facilidad.

La **administración de la calidad total** (TQM) y el **aseguramiento de la calidad** deben ser responsabilidad de todos los involucrados en el diseño y la manufactura de un producto. Pioneros en el control de la calidad, fundamentalmente Deming, Taguchi y Juran, han enfatizado la importancia de que el gerente se comprometa con la calidad del producto, la mano de obra plasme su orgullo en todos los niveles de producción y se usen el **control estadístico de proceso** (SPC) y las **cartas de control estadístico** (capítulo 36) para supervisar en línea la producción de las partes e identificar con rapidez fuentes de problemas de calidad. La meta más importante es evitar defectos, más que detectar y rechazar productos defectuosos después de haberlos fabricado.

Ahora es posible producir chips para computadora en los que sólo unas cuantas partes entre un millón pueden salir defectuosas. Los niveles de defectos se identifican como sigma tres y sigma cuatro, por ejemplo, siendo el más alto **seis sigma**. Tres sigmas en la manufactura producirían 2700 partes defectuosas por millón, que es un índice inaceptable en la industria moderna. De hecho, se estima que en este nivel ninguna computadora podría funcionar confiablemente. En sigma seis, los defectos se reducen a sólo 3.4 por millón.

Importantes desarrollos en el aseguramiento de la calidad incluyen la implantación del **diseño experimental**, una técnica en la que se estudian simultáneamente los factores comprendidos en un proceso de manufactura y sus interacciones. Por ejemplo, se pueden identificar con facilidad las variables que afectan la precisión dimensional o el acabado

superficial en una operación de maquinado, y por tanto permitir que se emprendan las acciones preventivas apropiadas.

La manufactura y competitividad globales han creado una necesidad obvia de conformidad internacional, y por consenso, para establecer métodos de control de calidad. Productos de esta necesidad son las normas ISO 9000 sobre administración de la calidad y sobre aseguramiento de la calidad, así como las normas QS 9000 (capítulo 37). El registro de una compañía en esta norma, que es la *certificación de un proceso de calidad* y no la certificación de un producto, significa que esa compañía se apega a prácticas consistentes especificadas por su propio sistema de calidad. ISO 9000 y QS 9000 han influido permanentemente en la manera en que las empresas conducen los negocios en el comercio mundial y se han convertido en la norma mundial para la calidad.

Responsabilidad del producto. Todos sabemos que un funcionamiento erróneo o la falla de un producto podría provocar lesiones corporales (e incluso la muerte) y pérdidas financieras a una persona o a una organización. A este importante tema se le llama *responsabilidad del producto*. Generalmente, las leyes varían de estado a estado y de país a país. Diseñar y manufacturar artículos seguros es un aspecto esencial e integral de las responsabilidades de un fabricante. Todos los involucrados con el diseño, la manufactura y el mercadeo de un producto deben reconocer plenamente las consecuencias de las fallas del mismo, entre ellas las derivadas de un posible uso indebido. Se pueden citar numerosos ejemplos de productos que causarían responsabilidad, como: *(a)* un disco para rectificación que se astilla y deja ciego a un trabajador; *(b)* un cable que se rompe, ocasionando que caiga una plataforma; *(c)* frenos que se vuelven inoperantes debido a la falla de un componente; *(d)* máquinas sin guardas o con guardas inapropiadas; y *(e)* herramientas eléctricas y neumáticas sin las precauciones apropiadas.

La **ingeniería de factores humanos** y la **ergonomía** tratan de la interacción del ser humano con las máquinas y por ello son aspectos importantes del diseño y la manufactura de productos seguros. Los ejemplos incluyen: *(a)* un banco de trabajo o una silla incómoda o inestable; *(b)* un mecanismo difícil de operar manualmente que produce lesiones en la espalda; y *(c)* un teclado mal diseñado que provoca dolor en manos y brazos del usuario después de su uso repetido.

I.10 Competitividad global y costos de manufactura

La economía de la manufactura siempre ha tenido gran importancia, y se ha vuelto aún más relevante conforme la **competitividad global** por productos de alta calidad (**manufactura de clase mundial**) y *precios bajos* se hace indispensable en los mercados mundiales. A partir de 1960 se desarrollaron las siguientes tendencias, que han tenido un fuerte impacto en la manufactura:

- La competencia global aumentó rápidamente y los mercados se volvieron multinacionales y dinámicos.
- Las condiciones del mercado fluctuaron ampliamente.
- Los clientes demandaron productos de alta calidad, bajo costo y entrega oportuna.
- La variedad de los productos se incrementó sustancialmente, por lo que se volvieron complejos y con ciclos de vida más cortos.

A finales de la década de 1990, una tendencia importante consistió en la disparidad de los costos de mano de obra para manufactura (por un orden de magnitud) entre diferentes países. En la tabla I.4 se muestra la compensación por hora estimada relativa para trabajadores de producción en manufactura, con base en una escala de 100 para Estados Unidos.

No sorprende que muchos de los productos que uno compra hoy sean hechos en China o ensamblados en México, donde los costos de la mano de obra son, hasta ahora, los

TABLA I.4

Compensación por hora aproximada relativa para trabajadores manufactureros, 2003. Estados Unidos = 100. Los costos de compensación varían dependiendo de los beneficios y las prestaciones

Dinamarca	147	Irlanda, Italia	85
Noruega	144	España	67
Alemania	136	Israel	53
Bélgica, Suiza	127	Nueva Zelanda, Corea	48
Finlandia, Holanda	123	Singapur	33
Austria, Suecia	116	Portugal, Taiwán	27
Estados Unidos	100	República Checa	20
Francia	96	Brasil, México	11
Reino Unido	93	China, India	10
Australia, Canadá, Japón	90		
Países europeos	111		
Países asiáticos	33		

Fuente: Cortesía del Departament of Labor de Estados Unidos, noviembre de 2004.

más bajos, pero están propensos a aumentar conforme se elevan los estándares de vida en esos países. Asimismo, implantar el desarrollo del software y la tecnología de la información es ahora mucho más económico en la India que en los países occidentales. Mantener los costos al mínimo es un reto constante para las compañías manufactureras y un aspecto crucial para su supervivencia. El costo de un artículo es a menudo el factor que prevalece en su capacidad de mercadeo y en la satisfacción general del cliente. Los costos de manufactura suelen representar aproximadamente 40% del precio de venta de un producto.

El concepto de diseño para manufactura y ensamble y el de la ingeniería concurrente, descritos en la sección I.4, también incluyen principios de diseño para la producción económica:

- El diseño debe hacer que tanto la manufactura como el ensamble, desensamble y reciclamiento del producto sean lo más simples posible.
- Deben elegirse materiales cuyas características de manufactura sean las apropiadas.
- La precisión dimensional y el acabado superficial deben especificarse de la manera más amplia permisible para minimizar los costos de manufactura.
- Debe enfatizarse la manufactura neta de las partes y evitarse o minimizarse las operaciones secundarias y de acabado.

El **costo total** de manufactura de un producto consiste en los costos de los materiales, el herramental y la mano de obra, así como los costos fijos y los del capital. Cada categoría comprende varios factores. Los costos de manufactura se pueden minimizar analizando el diseño del producto para determinar si el tamaño y la forma de la parte son los óptimos, si los materiales seleccionados son los menos costosos y también si poseen las propiedades y características de manufactura deseadas. La posibilidad de sustituir un material por otro es un factor importante para minimizar los costos.

Los costos fijos y los costos de capital dependen del fabricante y de las instalaciones de la planta. Aunque la maquinaria controlada por computadora (un costo de capital) puede ser muy costosa, los análisis económicos indican continuamente que, la mayoría de las veces, este gasto está garantizado en vista de sus beneficios de largo plazo. Por lo general, los costos de mano de obra directa son sólo una pequeña porción (entre 10% y 15%) del costo total. La automatización creciente, el control computarizado de todos los aspectos de la manufactura, la implantación de tecnologías modernas y la eficiencia creciente de las operaciones han ayudado en gran medida a reducir el compo-

nente de la mano de obra directa en los costos de manufactura. En consecuencia, las compañías en los países más industrializados comienzan a ser más competitivas.

I.11 Tendencias generales en la manufactura

Con avances en todos los aspectos de los materiales, procesos y control de la producción, ha habido algunas tendencias importantes en la manufactura, como se indica brevemente a continuación.

Materiales y procesos. Se tiende hacia un mejor control de las composiciones de los materiales, pureza y defectos (impurezas, inclusiones, imperfecciones) para reforzar sus propiedades globales, características de manufactura, confiabilidad, vida útil y reciclamiento, mientras se mantienen bajos los costos de los materiales. Los desarrollos continúan en superconductores, semiconductores, nanomateriales, nanopolvos, aleaciones amorfas, aleaciones con memoria de forma (materiales inteligentes) y recubrimientos. Se están mejorando los métodos y los equipos de prueba, incluyendo el uso de computadoras y software avanzados, en particular para materiales como los cerámicos, carburos y compósitos.

Factores como el ahorro de materiales y de energía han llevado a una capacidad de reciclamiento superior, así como a ahorros de peso mediante el mejoramiento del diseño y consideraciones de ingeniería, entre ellas proporciones mayores de resistencia a peso y rigidez a peso. Los tratamientos térmicos de los materiales se conducen con un mejor control de variables relevantes, a fin de obtener resultados más predecibles y confiables, en tanto que los métodos de tratamiento superficial avanzan con rapidez. También hay avances en materiales para herramientas, matrices y moldes para mejorar su desempeño. Desafiantes desarrollos recientes en procesamiento comprenden la ultraprecisión, micro y nanomanufactura, donde se aproximan a los niveles atómicos.

La simulación y el modelado en computadora siguen utilizándose ampliamente en diseño y manufactura, para optimizar procesos y sistemas de producción y predecir mejor los efectos de las variables correspondientes a la integridad del producto. Como resultado de tales esfuerzos, mejoran grandemente la velocidad y la eficacia del diseño y la manufactura de los productos; esto afecta también la economía global de la producción y reduce el costo de los artículos en un mercado crecientemente global y competitivo.

Sistemas de manufactura. Los desarrollos continuos en los sistemas de control, los robots industriales, la inspección automatizada, el manejo y ensamble y la tecnología de los detectores tienen un efecto importante en la eficacia y confiabilidad de todos los procesos y equipos de manufactura. Los avances en el hardware y software de las computadoras, los sistemas de comunicaciones, el control adaptable, los sistemas expertos, la inteligencia artificial y las redes neuronales han ayudado a hacer posible la implantación efectiva de conceptos como tecnología de grupos, manufactura celular y sistemas de manufactura flexible, así como prácticas modernas en la administración eficiente de las empresas manufactureras.

Tendencias organizacionales. Han aparecido tendencias importantes en la filosofía operacional de las empresas manufactureras. Tradicionalmente se ponía énfasis en la comunicación de arriba abajo en la organización y en un fuerte control por parte de la gerencia, cuyas prioridades eran un retorno financiero rápido (*primero las ganancias*), crecimiento y tamaño (*economía de escala*). Ahora la tendencia básica es una amplia comunicación de base *a través* de toda la organización.

Con la **competencia global** y los requisitos para una **manufactura de clase mundial**, las estrategias corporativas sufren continuamente cambios mayores. La manufactura se ha convertido en una parte integral de la planeación de negocios de largo alcance para

las compañías que deben mantener sus posiciones competitivas y aumentar su parte del mercado. Estos son asuntos complejos, ya que comprenden un amplio rango de factores como tipo de producto, tamaño de la compañía, mercados cambiantes, leyes y prácticas de negocios en diversas naciones, tarifas y restricciones de importación, geopolítica y, en particular, las tendencias fundamentales en actividades manufactureras rápidamente crecientes en países donde los costos de la mano de obra son una décima parte de los de países tradicionalmente más industrializados. El campo de la **tecnología de la información** (IT), que crece con celeridad, puede aportar las herramientas para ayudar a satisfacer estos importantes retos globales.

Se ha reconocido crecientemente que para ser exitosa, una empresa manufacturera debe responder a los puntos siguientes:

- Ver a la *gente* de la organización como activos importantes, además de enfatizar la importancia y *necesidad del trabajo en equipo* y la participación en la resolución de problemas y en los procesos de toma de decisiones, en todos los aspectos de las operaciones.
- Promover la *innovación de productos* y las mejoras en la *productividad*.
- Relacionar la innovación de los productos y la manufactura con el *cliente* y el *mercado*, viendo el producto como *satisfactor de una necesidad*.
- Incrementar la *flexibilidad* de operación para responder rápidamente a las demandas de productos, tanto en el mercado doméstico como en el global.
- Promover los esfuerzos para la *mejora continua de la calidad*.
- Finalmente, y lo más importante, concentrarse en la *satisfacción del cliente* en una escala global.

Fundamentos de materiales: comportamiento y propiedades de manufactura

PARTE I

La parte I de este texto comienza presentando el comportamiento y las propiedades de ingeniería de los materiales, cuyas características, aplicaciones, ventajas y limitaciones influyen en la elección de materiales que se efectúa en el diseño y la manufactura de productos.

Para enfatizar la importancia de los temas que se analizarán echemos un vistazo a un automóvil, ejemplo de un producto común que utiliza una amplia variedad de materiales (fig. I.1). Estos últimos se seleccionaron fundamentalmente porque, entre los materiales que poseen las propiedades y características deseadas para las funciones que se pretenden en las partes específicas del vehículo, son los que pueden manufacturarse al menor costo.

El acero se eligió para la mayor parte de la carrocería porque es fuerte, dúctil y económico. Los plásticos se utilizaron en muchos componentes debido a su variedad de colores, ligeros y facilidad de manufactura a diferentes formas a bajo costo. El vidrio se eligió para las ventanas no sólo porque es transparente, sino porque también es duro, fácil de formar, limpio y resistente al rayado. Se pueden hacer observaciones a cada componente del automóvil, el cual es, por lo común, un ensamblaje de alrededor de 15,000 partes, que van desde alambre delgado hasta defensas.

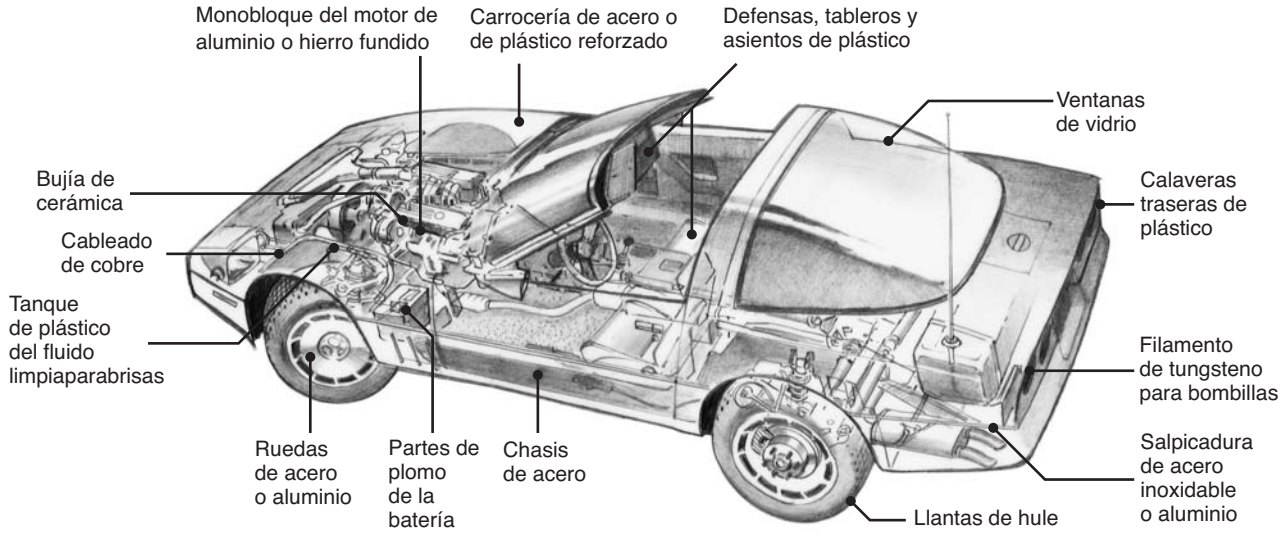


FIGURA I.1 Algunos de los materiales metálicos y no metálicos utilizados en un automóvil típico.

Como se indicó en la Introducción general, la selección de materiales para los componentes individuales de un producto requiere un entendimiento completo de sus propiedades, funciones y costos. Nótese que al ahorrar sólo un centavo en el costo promedio por parte, mediante la selección de un material o de una técnica de manufactura diferente, el fabricante puede reducir 150 dólares al costo de un automóvil. La tarea de los ingenieros de manufactura se vuelve entonces verdaderamente desafiante, en especial con la cada vez más amplia variedad de materiales disponibles (fig. I.2).

En la figura I.3 se da una descripción general de los diferentes temas expuestos en la parte I. El conocimiento fundamental que se presenta sobre el comportamiento, las propiedades y las características de los materiales ayudará al lector a entender su importancia en los procesos de manufactura descritos en las partes II a VI de este libro. Este conocimiento también hará posible analizar las frecuentemente complejas relaciones entre materiales, procesos de manufactura, maquinaria y herramental, así como la economía de las operaciones de manufactura.

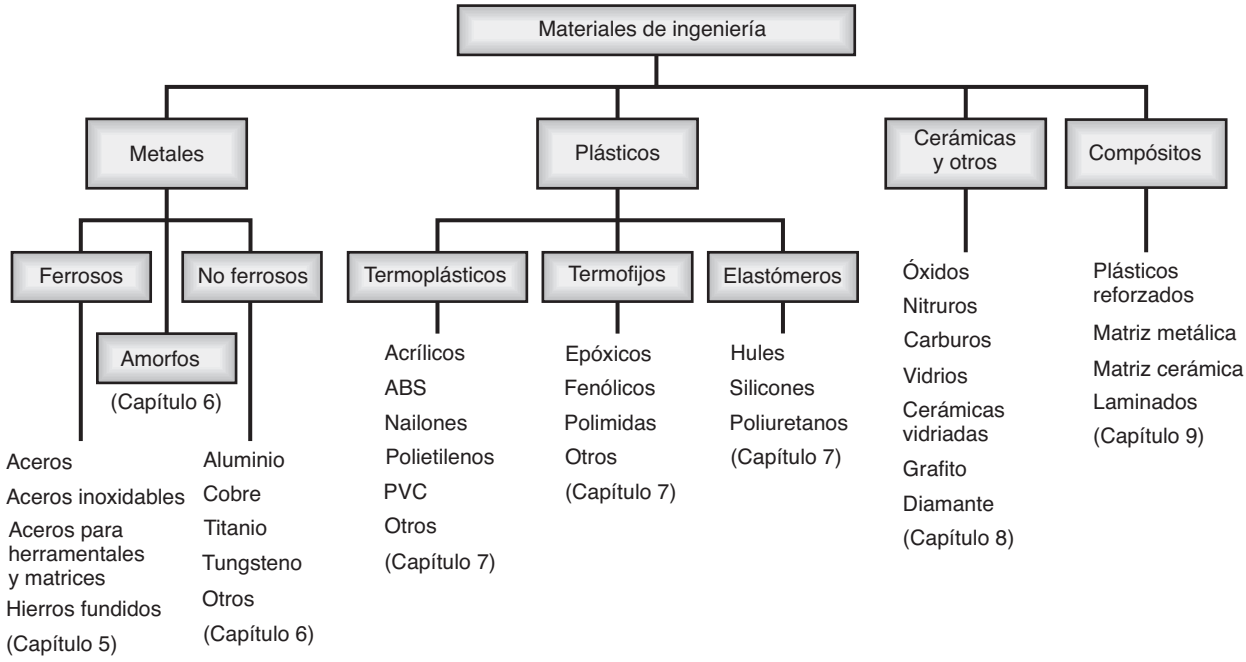


FIGURA I.2 Diagrama de los materiales de ingeniería descritos en la parte I.

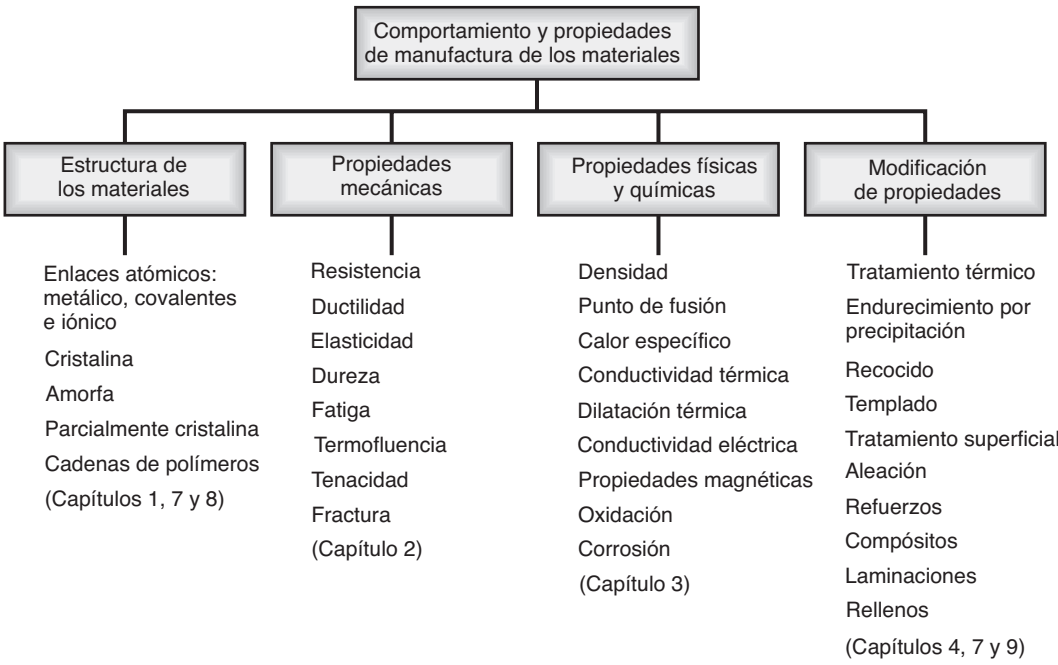
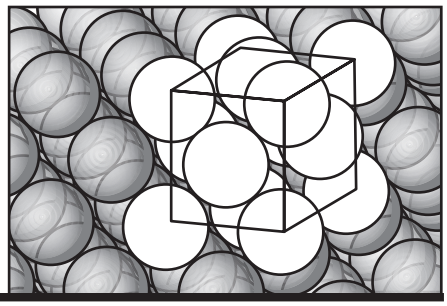


FIGURA I.3 Diagrama del comportamiento y las propiedades de manufactura de los materiales descritos en la parte I.

CAPÍTULO

1

La estructura de los metales



1.1 Introducción 46
1.2 Estructura cristalina de los metales 47
1.3 Deformación y resistencia de los monocristales 50
1.4 Granos y límites de granos 54
1.5 Deformación plástica de los metales policristalinos 57
1.6 Recuperación, recristalización y crecimiento de grano 58
1.7 Trabajado en frío, a temperatura media y en caliente 60

EJEMPLO:

1.1 Número de granos en la bola de un bolígrafo 56

En este capítulo se presenta el tema de la estructura cristalina de los metales y se explica por qué es importante su estudio:

- Cómo se arreglan los átomos en una estructura metálica.
- Tipos de imperfecciones existentes en las estructuras cristalinas y sus efectos.
- Cómo se desarrollan los granos y los límites de los granos.
- Mecanismos de endurecimiento por deformación y anisotropía.
- Qué efectos tienen estos arreglos atómicos, imperfecciones, límites de granos y temperatura en las propiedades de los metales importantes para la manufactura.

1.1 Introducción

¿Por qué algunos metales son duros y otros suaves? ¿Por qué algunos son frágiles, mientras que otros son dúctiles y se les puede dar forma fácilmente sin fracturarse? ¿Por qué algunos pueden soportar altas temperaturas y otros no? Éstas y otras numerosas preguntas se pueden contestar estudiando la **estructura atómica** de los metales (esto es, el arreglo de los átomos en su interior), ya que influye grandemente en sus propiedades y comportamiento. Este conocimiento hace posible controlar y predecir el comportamiento y desempeño de los metales en diversos procesos de manufactura. Entender su estructura también nos permite predecir y evaluar sus **propiedades**; esto nos ayuda a hacer las selecciones apropiadas para aplicaciones específicas en condiciones particulares externas, físicas y ambientales. Además de la estructura atómica, diversos factores influyen en las propiedades y el comportamiento de los metales, como su composición, las impurezas y las vacantes en la estructura atómica, el tamaño y los límites de grano, el ambiente, el tamaño y la condición superficial del metal, así como los métodos por medio de los cuales, metales y aleaciones se convierten en productos útiles.

Los temas cubiertos en este capítulo, y su secuencia, se describen en la figura 1.1. La estructura y las propiedades generales de materiales distintos a los metales se describen en los capítulos 7 (polímeros), 8 (cerámicos y vidrios) y 9 (materiales compósitos).

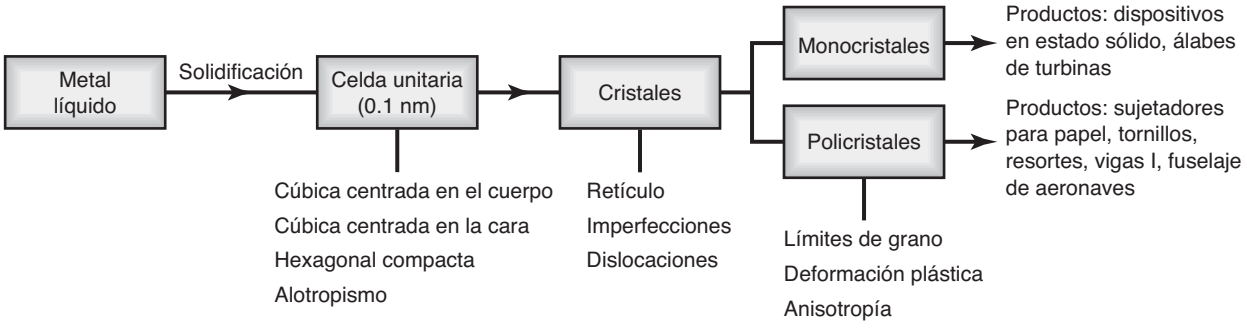


FIGURA 1.1 Diagrama de los temas descritos en el capítulo 1.

La estructura de las aleaciones metálicas, el control de su estructura y los procesos de tratamiento térmico se describen en el capítulo 4.

1.2 Estructura cristalina de los metales

Cuando los metales se solidifican a partir de un estado fundido, los átomos se arreglan por sí mismos en diversas configuraciones ordenadas, denominadas **cristales**, y a este arreglo se le llama estructura cristalina. Al grupo más pequeño de átomos que muestran la **estructura de red** característica de un metal en particular se le conoce como **celda unitaria**. Es el bloque primario de un cristal, y un monocristal puede tener varias celdas unitarias.

Los tres arreglos atómicos básicos en los metales son:

1. **Estructura cúbica centrada en el cuerpo** (bcc): hierro alfa, cromo, molibdeno, tantalio, tungsteno y vanadio.
2. **Estructura cúbica centrada en las caras** (fcc): hierro gama, aluminio, cobre, níquel, plomo, plata, oro y platino.
3. **Estructura hexagonal compacta** (hcp): berilio, cadmio, cobalto, magnesio, titanio alfa, zinc y zirconio.

En las ilustraciones de las figuras 1.2 a 1.4, donde se representan estas estructuras, cada esfera representa un átomo. El orden de magnitud de la distancia entre los átomos en estas estructuras cristalinas es de 0.1 nm (10^{-8} pulgadas). A estos modelos se les conoce como modelos de bolas o de esferas; se asemejan a pelotas de tenis arregladas en diferentes configuraciones dentro de una caja.

Como se muestra en la figura 1.2, cada átomo en la estructura bcc tiene ocho átomos circundantes. De las tres estructuras ilustradas, los cristales fcc y hcp tienen las configuraciones compactadas con mayor densidad. En la estructura hcp, a los planos superior e inferior se les llama **planos basales**. La manera en que estos átomos se arreglan determina las propiedades de un metal particular. Tales arreglos se pueden modificar agregando átomos de algún otro metal o metales, conocidos como **aleantes**, lo cual se realiza con frecuencia para mejorar diversas propiedades del metal.

Los metales forman diferentes estructuras cristalinas para *minimizar* la energía requerida para agruparse en un patrón regular. Por ejemplo, el tungsteno forma una estructura bcc porque ésta requiere menos energía que las otras; de manera similar, el

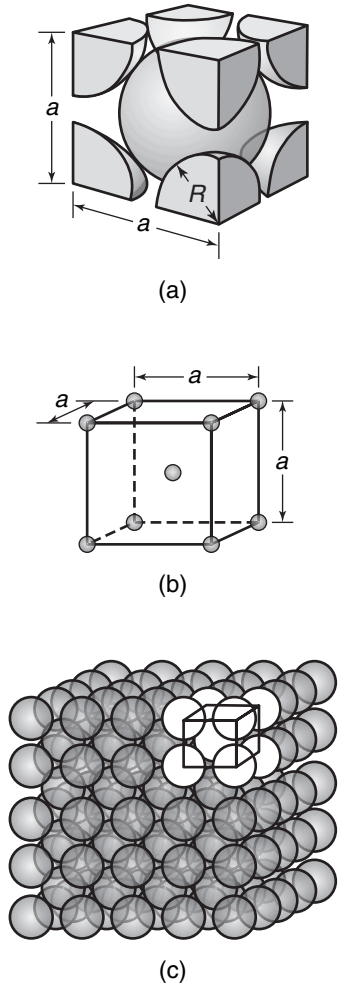


FIGURA 1.2 Estructura cúbica centrada en el cuerpo (bcc): *(a)* modelo de bolas; *(b)* celda unitaria, y *(c)* monocristal con muchas celdas unitarias.

aluminio forma una estructura fcc. Sin embargo, a diferentes temperaturas, el mismo metal puede formar diferentes estructuras debido a un requerimiento menor o mayor de energía. Por ejemplo, el hierro forma una estructura bcc (hierro alfa) debajo de 912 °C (1674 °F) y arriba de 1394 °C (2541 °F), pero forma una estructura fcc (hierro gama) entre 912 °C y 1394 °C.

A la aparición de más de un tipo de estructura cristalina se le conoce como **alotropismo** o **polimorfismo** (que significa "muchas formas"). Debido a que las propiedades y el comportamiento de un metal dependen en gran medida de su estructura cristalina, el alotropismo es un factor importante en el tratamiento térmico de los metales, así como en el trabajo de los mismos y en las operaciones de soldadura (partes III y V). Actualmente se producen monocristales de metales en lingotes de 1 m (40 pulgadas) de largo y hasta de 300 mm (12 pulgadas) de diámetro, con aplicaciones como álabes para turbinas y semiconductores (ver secciones 11.4 y 28.3). Sin embargo, como se señala en la sección 1.4, la mayoría de los cristales utilizados en la manufactura son policristalinos.

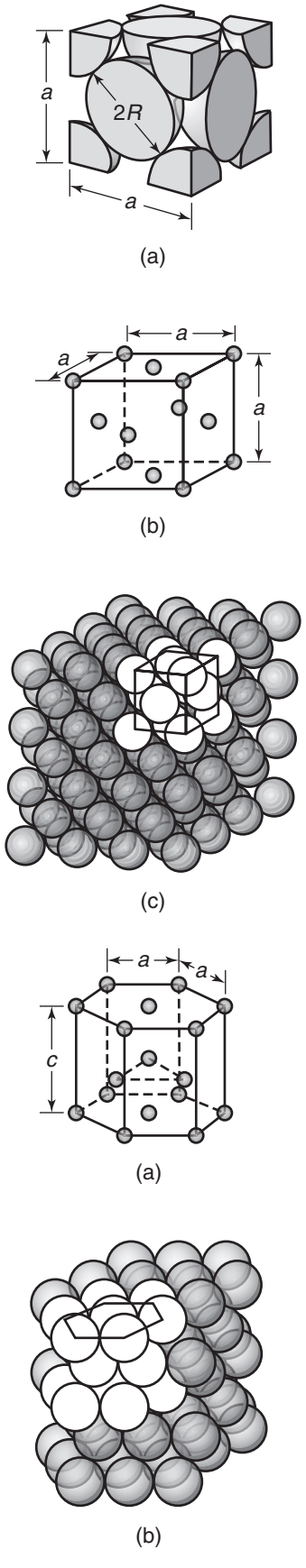


FIGURA 1.3 Estructura cristalina cúbica centrada en las caras (fcc): *(a)* modelo de bolas; *(b)* celda unitaria, y *(c)* monocristal con varias celdas unitarias.

FIGURA 1.4 Estructura cristalina hexagonal compacta (hcp): *(a)* modelo de bolas; *(b)* celda unitaria, y monocristal con varias celdas unitarias.

1.3 Deformación y resistencia de los monocristales

Cuando un monocristal se somete a una fuerza externa, primero sufre una **deformación elástica,** esto es, regresa a su forma original al retirar la fuerza. Una analogía de este tipo de comportamiento es un resorte helicoidal que se estira cuando se le agrega carga y que vuelve a su forma original al retirarse aquélla. Sin embargo, si la fuerza sobre la estructura cristalina se aumenta lo suficiente, el cristal sufre una **deformación plástica** o **deformación permanente,** esto es, ya no regresa a su forma original cuando se retira la fuerza.

Existen dos mecanismos básicos por los que la deformación plástica ocurre en las estructuras cristalinas. Uno es el deslizamiento de un plano de átomos sobre un plano adyacente (llamado **plano de deslizamiento**, figura 1.5a) por un **esfuerzo cortante** (figura 1.5b). El esfuerzo cortante se define como la razón de la fuerza cortante aplicada al área de la sección transversal que se cizalla. La deformación de un espécimen monocristalino por deslizamiento se muestra de manera esquemática en la figura 1.6a. Nótese que este comportamiento es muy parecido al deslizamiento de los naipes uno sobre otro.

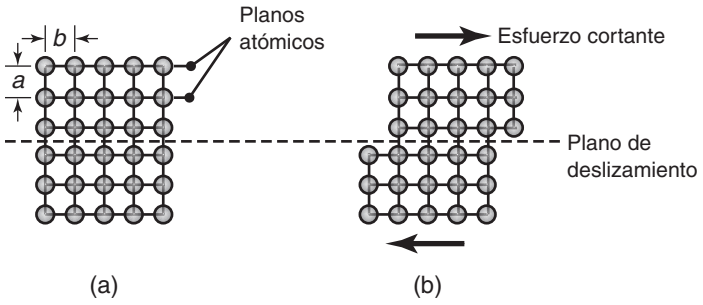


FIGURA 1.5 Deformación permanente (también llamada deformación plástica) de un monocristal sometido a un esfuerzo cortante: *(a)* estructura antes de la deformación, y *(b)* deformación permanente mediante deslizamiento. La relación *b*/*a* influye en la magnitud del esfuerzo cortante requerido para provocar el deslizamiento.

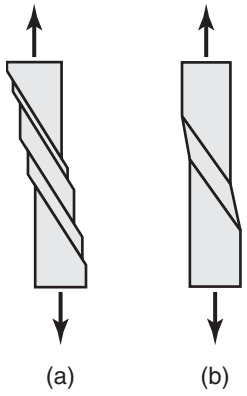


FIGURA 1.6 *(a)* Deformación permanente de un monocristal por una carga de tensión. Nótese que los planos de deslizamiento tienden a alinearse por sí mismos en la dirección de la fuerza que jala. Este comportamiento se puede simular mediante un paquete de naipes con una banda de hule alrededor de ellos. *(b)* El maclaje en un monocristal en tensión.

Al igual que se requiere cierta cantidad de fuerza para deslizar los naipes entre sí, un cristal exige cierta cantidad de esfuerzo cortante (**esfuerzo crítico cortante**) para sufrir una deformación permanente. Por ello, debe existir un esfuerzo cortante de magnitud suficiente dentro de un cristal para que ocurra una deformación plástica; en caso contrario, la deformación sólo es elástica.

El esfuerzo cortante requerido para provocar el deslizamiento en los monocristales es directamente proporcional a la relación *b/a* en la figura 1.5a, donde *a* es el espaciamiento de los planos atómicos y *b* es inversamente proporcional a la densidad atómica en el plano atómico. Al disminuir *b/a*, disminuye el esfuerzo cortante requerido para provocar el deslizamiento. Por lo tanto, se puede establecer que el deslizamiento en un monocristal ocurre a lo largo de los planos de *máxima densidad atómica* o, en otras palabras, ese deslizamiento ocurre en los planos más compactos y en las direcciones más compactas.

Debido a que la relación *b/a* varía para diferentes direcciones dentro del cristal, un monocristal tiene distintas propiedades cuando se somete a prueba en diferentes direcciones; a este comportamiento se le conoce como **anisotrópico**. Un sencillo ejemplo de anisotropía es el comportamiento de la tela tejida, que se estira de manera distinta cuando se jala en diferentes direcciones; otro ejemplo común es la madera laminada, que es mucho más fuerte en la dirección planar que a lo largo de la dirección del espesor (nótese, por ejemplo, cómo se divide fácilmente el laminado de madera).

El segundo, y menos común, de los mecanismos de deformación plástica en los cristales es el **maclaje**, en la que una parte del cristal forma una imagen a espejo de sí misma del otro lado del *plano de maclaje* (figura 1.6b). Las maclas se forman abruptamente y son la causa del sonido de agrietamiento ("chillido de metal"), que se presenta cuando una varilla de estaño o de zinc se dobla a temperatura ambiente. El maclaje ocurre por lo común en los metales hcp.

Sistemas de deslizamiento. A la combinación de un plano de deslizamiento y su dirección de deslizamiento se le conoce como *sistema de deslizamiento*. En general, los metales con cinco o más de estos sistemas son dúctiles, en tanto que los que tienen menos no lo son.

1. En los cristales **cúbicos centrados en el cuerpo** existen 48 sistemas de deslizamiento posibles. Por lo tanto, es alta la probabilidad de que un esfuerzo cortante externo aplicado actúe sobre uno de estos sistemas y provoque deslizamiento. Sin embargo, debido a que la relación *b/a* es relativamente alta, el esfuerzo cortante requerido es alto. En general, los metales con estructuras bcc tienen buena resistencia y ductilidad moderada.
2. En los cristales **cúbicos centrados en las caras** existen 12 sistemas de deslizamiento. La probabilidad de deslizamiento es moderada y el esfuerzo al corte requerido es bajo, debido a la relación *b/a* relativamente baja. En general, estos metales tienen una resistencia moderada y buena ductilidad.
3. El cristal **hexagonal compacto** tiene tres sistemas de deslizamiento y por lo tanto su probabilidad de deslizamiento es baja; sin embargo, a temperaturas elevadas se activan más sistemas. Los metales con estructura hcp son generalmente frágiles a temperatura ambiente.

Nótese en la figura 1.6a que las partes de un monocristal que se han deslizado, han girado desde su posición angular original en la dirección de la fuerza de tensión; obsérvese también que el deslizamiento ha ocurrido a lo largo de ciertos planos. Con el uso de un microscopio electrónico se puede mostrar que lo que parece un solo plano de deslizamiento es, en realidad, una **banda de deslizamiento** que consta de varios planos de deslizamiento (figura 1.7).

1.3.1 Imperfecciones en la estructura cristalina de los metales

La resistencia real de los metales es aproximadamente uno a dos órdenes de magnitud menor que los niveles de resistencia obtenida a partir de cálculos teóricos; esta discre-

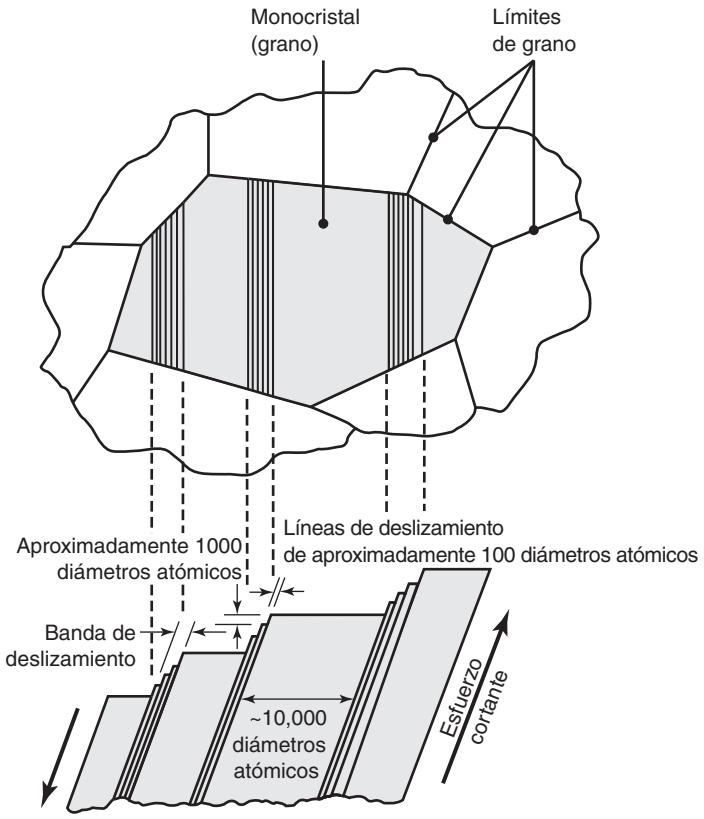


FIGURA 1.7 Esquema de las líneas y bandas de deslizamiento en un monocristal (grano) sometido a un esfuerzo al corte. Una banda de deslizamiento consta de varios planos de deslizamiento. El cristal en el centro de la ilustración superior es un grano individual rodeado de varios otros

pancia se ha explicado en términos de **defectos** e **imperfecciones** en la estructura cristalina. A diferencia de los modelos ideales ya descritos, los cristales metálicos reales contienen un gran número de defectos e imperfecciones que se clasifican como sigue:

1. *Defectos puntuales*, como una **vacante** (átomo faltante), un **átomo intersticial** (átomo adicional en el retículo) o una impureza (átomo extraño que ha reemplazado el átomo de metal puro), (fig. 1.8).

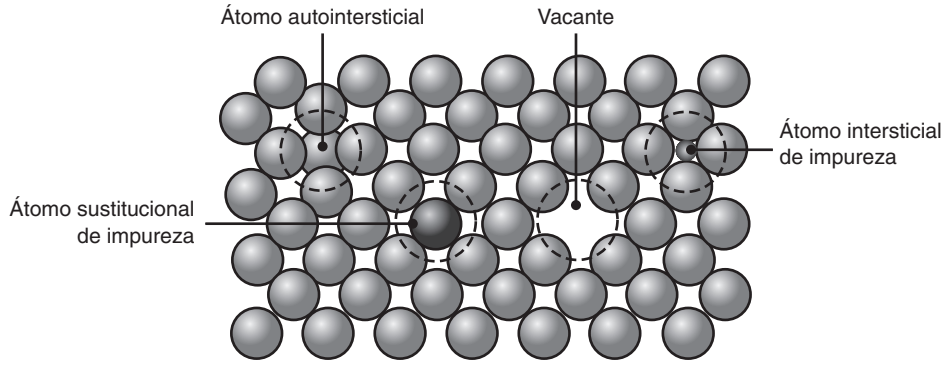


FIGURA 1.8 Esquema de tipos de defectos en un retículo monocristalino: autointersticial, vacante, intersticial y sustitucional.

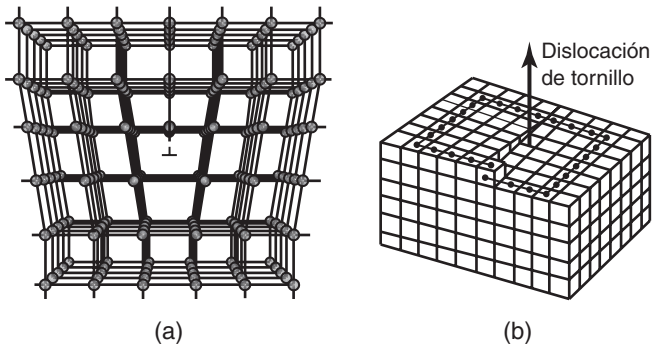


FIGURA 1.9 Tipos de dislocaciones en un monocristal: *(a)* dislocación de borde, y *(b)* dislocación de tornillo.

2. *Defectos lineales* o *unidimensionales*, denominados dislocaciones (figura 1.9).
3. *Imperfecciones planares* o *bidimensionales*, como los **límites de grano** y **límites de fase** (ver sección 1.4).
4. *Imperfecciones volumétricas* o *de masa*, como **huecos**, **inclusiones** (elementos no metálicos como óxidos, sulfuros y silicatos), **otras fases** o **grietas**.

Estos defectos afectan de manera adversa las propiedades mecánicas y eléctricas de los metales, como el esfuerzo de fluencia, la resistencia a la fractura y la conductividad eléctrica; a éstas se les conoce como propiedades **sensibles a la estructura**. Por otro lado, las propiedades físicas y químicas, como el punto de fusión, el calor específico, el coeficiente de dilatación térmica y las constantes elásticas (por ejemplo, los módulos de elasticidad y de rigidez) no son sensibles a estos defectos; se les conoce como propiedades **insensibles a la estructura**.

Dislocaciones. Observadas por primera vez en la década de 1930, las *dislocaciones* son defectos del arreglo ordenado de la estructura atómica de un metal. Un plano de deslizamiento que contiene una dislocación (figura 1.10) requiere, para permitir el deslizamiento, un esfuerzo cortante menor que un plano en una red perfecta. Las dislocaciones son los defectos más significativos y ayudan a explicar la discrepancia entre las resistencias reales y las teóricas en los metales.

Existen dos tipos de dislocaciones: **de borde** y **de tornillo** (figura 1.9). Una analogía utilizada para describir el movimiento de una dislocación de borde es la del gusano de tierra, que se mueve hacia delante por medio de una ondulación que inicia en la cola y se mueve hacia la cabeza. Otra analogía de dicha dislocación ocurriría al mover una alfombra grande formando una ondulación en un extremo y moviéndola hacia el otro extremo. La fuerza requerida para mover una alfombra de esta manera es mucho menor

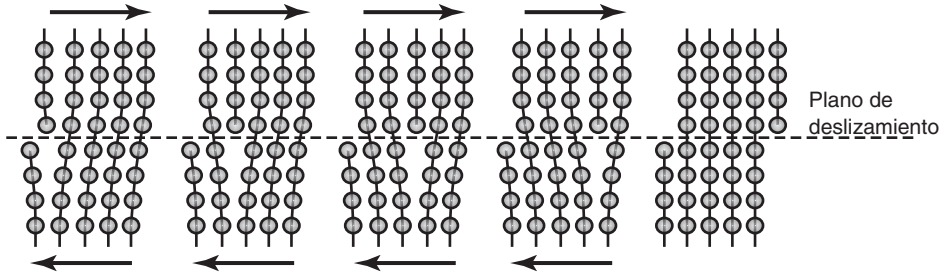


FIGURA 1.10 Movimiento de una dislocación de borde a través del retículo cristalino por un esfuerzo cortante. Las dislocaciones ayudan a explicar por qué la resistencia real de los metales es mucho menor que la predicha por la teoría.

que la exigida para deslizarla toda sobre el piso. A las dislocaciones de tornillo se les llama así porque los planos atómicos forman una rampa espiral.

1.3.2 Endurecimiento por trabajo (endurecimiento por deformación)

Aunque la presencia de una dislocación reduce el esfuerzo cortante requerido para provocar el deslizamiento, las dislocaciones pueden:

1. Trabarse y obstruir una a otra; y
2. verse impedidas por barreras, como límites de grano e impurezas, e inclusiones en el material.

Las obstrucciones e impedimentos aumentan el esfuerzo cortante requerido para el deslizamiento. Un ejemplo de obstrucción sería mover dos ondulaciones a diferentes ángulos a través de una alfombra: en donde se cruzan, interfieren sus movimientos y su efecto combinado hace más difícil el movimiento de la alfombra.

Al aumento en el esfuerzo cortante, que incrementa la resistencia total y la dureza del metal, se le conoce como **endurecimiento por trabajado** o **endurecimiento por deformación**. Cuanto mayor sea la deformación, mayor será el número de obstrucciones, y de ahí un aumento en la resistencia del metal. El endurecimiento por trabajado se utiliza ampliamente para aumentar la resistencia de los metales en los procesos de trabajo de los mismos a temperatura ambiente. Ejemplos característicos son la producción de hojas metálicas para carrocerías automotrices y fuselajes de aviones mediante el laminado en frío, la fabricación de las cabezas de los tornillos mediante forjado, y el endurecimiento de cables mediante la reducción de su sección estirándolos a través de un dado.

1.4 Granos y límites de granos

Los metales que se utilizan comúnmente en la manufactura de diversos productos constan de muchos cristales individuales orientados al azar (**granos**); por lo tanto, las estructuras metálicas no son monocristalinas sino **policristalinas** ("muchos cristales"). Cuando una masa de metal fundido comienza a solidificar, los cristales empiezan a formarse independientemente unos de otros en varios lugares dentro de la masa líquida; tienen orientaciones al azar y sin relación unas con otras (figura 1.11). Después, cada uno de ellos crece en una estructura cristalina o grano.

El número y los tamaños de los granos desarrollados en una unidad de volumen del metal dependen de la *velocidad* a la que tiene lugar la **nucleación** (etapa inicial de formación de cristales). El número de lugares diferentes en los que se comienzan a formar los cristales individuales (siete en la figura 1.11a) y la velocidad a la que éstos crecen, influyen

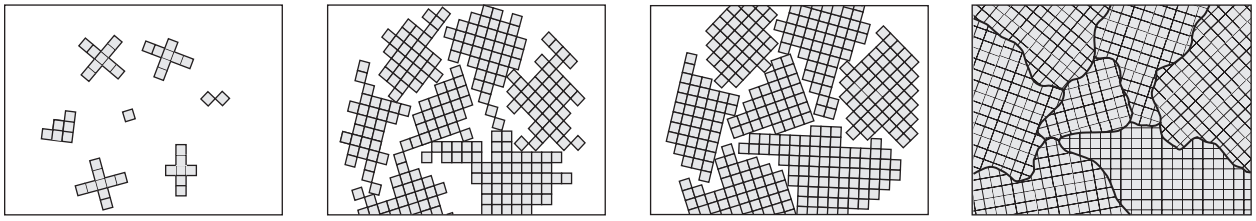


FIGURA 1.11 Esquema de las etapas durante la solidificación del metal fundido; cada cuadrado pequeño representa una celda unitaria. *(a)* Nucleación de cristales en sitios al azar en el metal fundido; obsérvese que la orientación cristalográfica de cada sitio es diferente. *(b)* y *(c)* Crecimiento de los cristales conforme continúa la solidificación. *(d)* Metal solidificado, mostrando granos individuales y límites de granos; nótese los diferentes ángulos en los que se encuentran los granos circundantes unos respecto de otros.

en el tamaño medio de los granos desarrollados. Si la velocidad de nucleación es alta, el número de granos en una unidad de volumen del metal será grande y, por lo tanto, el tamaño de grano será pequeño. Por el contrario, si la velocidad de crecimiento de los cristales es elevada (en comparación con su velocidad de nucleación), habrá menos granos por unidad de volumen y su tamaño será mayor. Generalmente, el enfriamiento rápido produce granos más pequeños, mientras que el lento produce granos más grandes.

Obsérvese, en la figura 1.11d, cómo el crecimiento de los granos al final obliga a que incidan unos en otros; las superficies que separan estos granos individuales se llaman **límites de grano**. Cada grano consta de un monocristal (en el caso de los metales puros) o un agregado policristalino (en el caso de las aleaciones). Nótese también que la orientación cristalográfica cambia abruptamente de un grano al siguiente a través de los límites de los granos. (En la sección 1.3 se vio que el comportamiento de un solo cristal o de un solo grano es anisotrópico). Entonces, ya que sus granos tienen orientaciones cristalográficas al azar, el comportamiento ideal de una pieza de metal policristalino es **isotrópico**: sus propiedades no varían con la dirección de prueba.

1.4.1 Tamaño de grano

El **tamaño de grano** influye de modo significativo en las propiedades mecánicas de los metales. A la temperatura ambiente, por ejemplo, el tamaño grande del grano se asocia en general con resistencia, dureza y ductilidad bajas. Los granos grandes, particularmente en las hojas metálicas, también provocan una superficie de apariencia rugosa después de estirar el material (ver el efecto **piel de naranja**, sección 1.6). Los granos pueden ser tan grandes que es posible verlos a simple vista, como los de zinc en la superficie galvanizada de las hojas de acero.

Usualmente, el tamaño de grano se mide contando el número de granos en un área dada o el número de granos que cruzan la longitud de una línea dibujada al azar sobre una fotografía agrandada de los granos (tomada en un microscopio a un espécimen pulido y atacado). El tamaño de grano también se puede determinar comparándolo con un estándar. El número del tamaño de grano de ASTM (American Society for Testing and Materials), n, se relaciona con el número de granos (N) por pulgada cuadrada a una ampliación de 100× (igual a 0.0645 mm^2 del área real) mediante la fórmula

$$N = 2^{n-1} \tag{1.1}$$

Debido a que los granos suelen ser extremadamente pequeños, muchos pueden ocupar una pieza metálica (tabla 1.1). Por lo común, los tamaños de grano entre 5 y 8 se conside-

TABLA 1.1

Tamaños de grano

No. ASTM	Granos/mm^2	Granos/mm^3
−3	1	0.7
−2	2	2
−1	4	5.6
0	8	16
1	16	45
2	32	128
3	64	360
4	128	1,020
5	256	2,900
6	512	8,200
7	1,024	23,000
8	2,048	65,000
9	4,096	185,000
10	8,200	520,000
11	16,400	1,500,000
12	32,800	4,200,000

ran granos finos. Un tamaño de grano 7 es generalmente aceptable para las hojas metálicas con que se fabrican carrocerías automotrices, electrodomésticos y utensilios de cocina.

1.4.2 Influencia de los límites de los granos

Los límites de los granos tienen una influencia importante sobre la resistencia y ductilidad de los metales, y como interfieren con el movimiento de las dislocaciones, también influyen en el endurecimiento por deformación. Estos efectos dependen de la temperatura, velocidad de deformación, tipo y cantidad de impurezas presentes *a lo largo* de los límites de los granos.

Los límites de granos son más reactivos que los propios granos, ya que los átomos, a lo largo de dichos límites, están empacados de manera menos eficaz y se encuentran más desordenados; el resultado es que tienen menor energía que los átomos en el retículo ordenado dentro de los granos y se pueden retirar con mayor facilidad, o unirse químicamente a otro átomo. En consecuencia, la superficie se vuelve más rugosa cuando se ataca o se somete a ambientes corrosivos u hostiles.

A temperaturas elevadas y en materiales cuyas propiedades dependen de la velocidad a la que se deforman (se trabajan), la deformación plástica ocurre por medio del **deslizamiento de los límites de los granos**. El mecanismo de **termofluencia** (esto es, la elongación por esfuerzo durante cierto periodo, usualmente a temperaturas elevadas) es el resultado del deslizamiento de los límites de los granos (sección 2.8).

Fragilización de los límites de grano. Al ponerse en contacto atómico estrecho con algunos metales de bajo punto de fusión, un metal normalmente dúctil y fuerte puede agrietarse cuando se somete a esfuerzos externos muy bajos. Ejemplos de estos comportamientos son *(a)* el aluminio humedecido con una amalgama de mercurio-zinc o con galio líquido, y *(b)* el cobre (a temperatura elevada) humedecido con plomo o bismuto. Estos elementos fragilizadores debilitan los límites de los granos del metal mediante *fragilización*. El concepto **fragilización de metal líquido** se utiliza para describir dichos fenómenos, ya que el elemento fragilizador se encuentra en un estado líquido. Sin embargo, la fragilización puede ocurrir a temperaturas muy por abajo del punto de fusión del elemento citado, fenómeno al que se conoce como **fragilización de metal sólido**.

La **fragilización en caliente** es el resultado de la fusión local de un constituyente o de una impureza en el límite del grano a una temperatura por debajo del punto de fusión del propio metal. Cuando se somete a deformación plástica a temperaturas elevadas (*trabajo en caliente*), la pieza metálica se desmorona y se desintegra a lo largo de los límites de sus granos; ejemplos de ello son el antimonio en cobre, aceros emplomados y bronce emplomado. Usualmente, para evitar la fragilización en caliente, el metal se trabaja a baja temperatura para evitar la suavización y la fusión a lo largo de los límites de los granos. Otra forma de fragilización es la **fragilización por revenido** en los aceros aleados, provocada por la segregación (movimiento) de impurezas a los límites de los granos.

EJEMPLO 1.1 Número de granos en la bola de un bolígrafo

Supóngase que la bola de un bolígrafo tiene 1 mm de diámetro y un tamaño de grano ASTM de 10. Calcúlese el número de granos en la bola.

Solución Un metal con un tamaño de grano ASTM de 10 tiene 520,000 granos por milímetro cúbico (ver tabla 1.1). El volumen de la bola de 1 mm de diámetro está dado por

$$V = \frac{4\pi r^3}{3} = \frac{4\pi(0.5\text{ mm})^3}{3} = 0.5236\text{ mm}^3$$

Para obtener el número total de granos, el volumen se multiplica por los granos por milímetro cúbico, o

$$\text{Núm. de granos} = (0.5236\text{ mm}^3)(520{,}000\text{ granos/mm}^3) = 272{,}300\text{ granos}$$

1.5 Deformación plástica de los metales policristalinos

Si un metal policristalino con *granos equiaxiales* uniformes (que tienen dimensiones iguales en todas direcciones, como se muestra en el modelo en la figura 1.12a) se somete a deformación plástica a temperatura ambiente (trabajo en frío), los granos se deforman y se alargan. El proceso de deformación se puede efectuar comprimiendo el metal, como se realiza en la forja para elaborar un disco para turbina, o sometiéndolo a tensión, como se hace al estirar una hoja metálica para fabricar una carrocería automotriz. La deformación dentro de cada grano tiene lugar conforme a los mecanismos descritos en la sección 1.3 para un monocristal.

Durante la deformación plástica, los límites de los granos permanecen intactos y la continuidad de la masa se mantiene. El metal deformado muestra una resistencia mayor debido a la obstrucción de las dislocaciones con los límites de los granos. El aumento de resistencia depende del grado de deformación (*esfuerzo*) al que se somete el metal; cuanto mayor sea la deformación, más fuerte será el metal. El aumento de resistencia es mayor para metales con granos más pequeños porque tienen un área superficial de límites de grano mayor por unidad de volumen de metal y, de ahí, mayor obstrucción de las dislocaciones.

Anisotropía (textura). Obsérvese en la figura 1.12b que, como resultado de la deformación plática, los granos se han alargado en una dirección y contraído en la otra. En consecuencia, esta pieza de metal se ha vuelto anisotrópica, y por lo tanto, sus propiedades en la dirección vertical son diferentes de aquéllas en la dirección horizontal. Muchos productos desarrollan anisotropía de propiedades mecánicas después de haberse procesado mediante técnicas de trabajo de los metales (fig. 1.13). El grado de anisotropía depende de cuán uniformemente se deforma el metal; obsérvese en la dirección de la grieta en la figura 1.13a, por ejemplo, que la ductilidad de la hoja laminada en frío en la dirección transversal (vertical) es menor que aquélla en su dirección de laminado (longitudinal).

La anisotropía influye tanto en las propiedades mecánicas como en las físicas. Por ejemplo, las hojas de acero para transformadores eléctricos se lamina de tal manera que la deformación resultante imparta propiedades magnéticas anisotrópicas a la hoja. Este arreglo reduce las pérdidas magnéticas por histéresis y mejora la eficiencia de los transformadores. (Ver también *aleaciones amorfas*, sección 6.14). Existen dos tipos generales de anisotropía en los metales: la *orientación preferida* y la *fibración mecánica*.

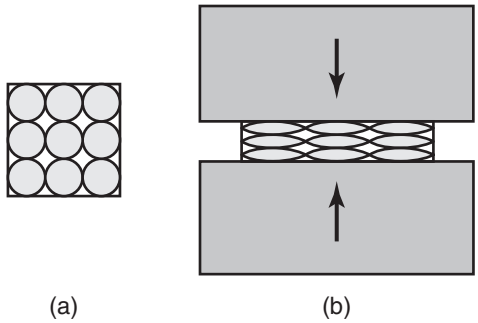


FIGURA 1.12 Deformación plástica de granos ideales (equiaxiales) en un espécimen sometido a compresión (como la que ocurre en el forjado o laminado de los metales): *(a)* antes de la deformación, y *(b)* después de la deformación. Obsérvese la alineación de los límites de los granos a lo largo de la dirección horizontal; a este efecto se le conoce como orientación preferencial.

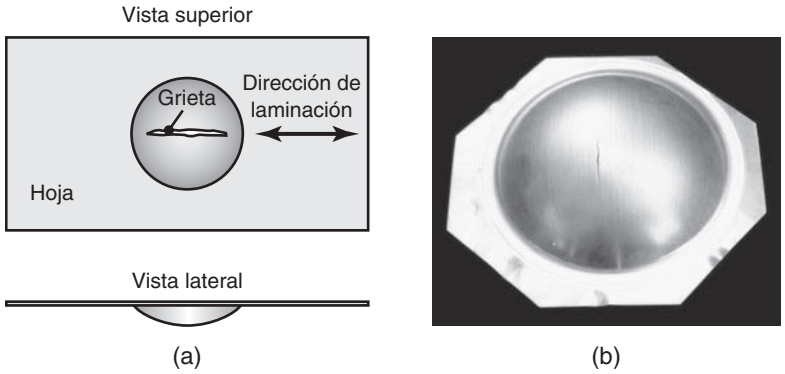


FIGURA 1.13 *(a)* Esquema de una grieta que se ha sometido a abombado (provocado, por ejemplo, por empujar una bola de acero contra la hoja). Obsérvese la orientación de la grieta con respecto a la dirección de laminación de la hoja; esta hoja es anisotrópica. *(b)* Hoja de aluminio con una grieta (línea vertical oscura en el centro) desarrollada en una prueba de abombado; la dirección de laminación de la hoja era vertical. *Fuente:* Cortesía de J. S. Kallend, Illinois Institute of Technology.

Orientación preferencial. También llamada **anisotropía cristalográfica**, la *orientación preferencial* se describe mejor en la figura 1.6a. Cuando se somete a tensión un cristal metálico, los bloques deslizantes giran hacia la dirección de la fuerza de tensión; el resultado es que los planos y las bandas de deslizamiento tienden a alinearse por sí mismas con la dirección de deformación. De manera similar, para un agregado policristalino con granos en orientaciones al azar, todas las direcciones de deslizamiento tienden a alinearse a sí mismas con la dirección de la fuerza de tensión. Por el contrario, los planos de deslizamiento bajo compresión tienden a alinearse por sí mismos en una dirección perpendicular a la dirección de la fuerza de compresión.

Fibración mecánica. Este tipo de anisotropía es el resultado de la alineación de las inclusiones (**rigidizadores**), impurezas y huecos en el metal durante la deformación. Obsérvese que si los granos esféricos en la figura 1.12a estuvieran recubiertos con impurezas, éstas se alinearían generalmente por sí mismas en una dirección horizontal después de la deformación. Debido a que las impurezas debilitan los límites de los granos, esta pieza de metal sería débil y menos dúctil si se probara en la dirección vertical. Una analogía de esto es la madera laminada, que es fuerte a la tensión a lo largo de su dirección planar, pero que se descascara con facilidad (se divide) cuando se somete a tensión en la dirección de su espesor.

1.6 Recuperación, recristalización y crecimiento de grano

Se dijo que la deformación plástica a temperatura ambiente provoca la deformación de los granos y de sus límites, un incremento general de la resistencia y un decremento de la ductilidad; también causa un comportamiento anisotrópico. Estos efectos se pueden revertir (y las propiedades del metal pueden regresar a sus niveles originales) calentando el metal a un rango de temperatura específica por cierto periodo; a este proceso se le llama **recocido** (sección 4.11). El rango de temperatura y la cantidad requerida de tiempo de-

penden del material y de otros factores. Durante el proceso de calentamiento, tres eventos tienen lugar consecutivamente:

1. **Recuperación**. Durante la *recuperación*, que ocurre a cierto rango de temperatura debajo de la temperatura de recristalización del metal, se relevan los esfuerzos en las regiones altamente deformadas. Se comienzan a formar límites de subgranos (a este proceso se le llama **poligonización**) sin un cambio significativo en las propiedades mecánicas, como la dureza y la resistencia (figura 1.14).

2. **Recristalización**. Al proceso en el cual (dentro de un cierto rango de temperatura) se forman granos equiaxiales y libres de esfuerzos (que reemplazan a los granos anteriores) se le llama *recristalización*. La temperatura para recristalización varía aproximadamente entre 0.3 y 0.5 T_m, donde T_m es el punto de fusión del metal en la escala absoluta.

En general, la temperatura de recristalización se define como la temperatura a la que ocurre la recristalización total dentro de aproximadamente una hora. La recristalización disminuye la densidad de las dislocaciones, reduce la resistencia y eleva la ductilidad del metal (figura 1.14). Plomo, estaño, cadmio y zinc recristalizan casi a la temperatura ambiente; el resultado es que no se endurecen por trabajo cuando se trabajan en frío.

La recristalización depende del grado de trabajado en frío previo (endurecimiento por trabajado): cuanto más trabajo en frío haya, menor será la temperatura requerida para que ocurra la recristalización. La razón es que al aumentar la cantidad de trabajo en frío, el número de dislocaciones y la cantidad de energía almacenada en las mismas (**energía almacenada**) también aumenta. Esta energía proporciona algo del trabajo requerido para la recristalización. Ésta también es una función del tiempo, porque com-

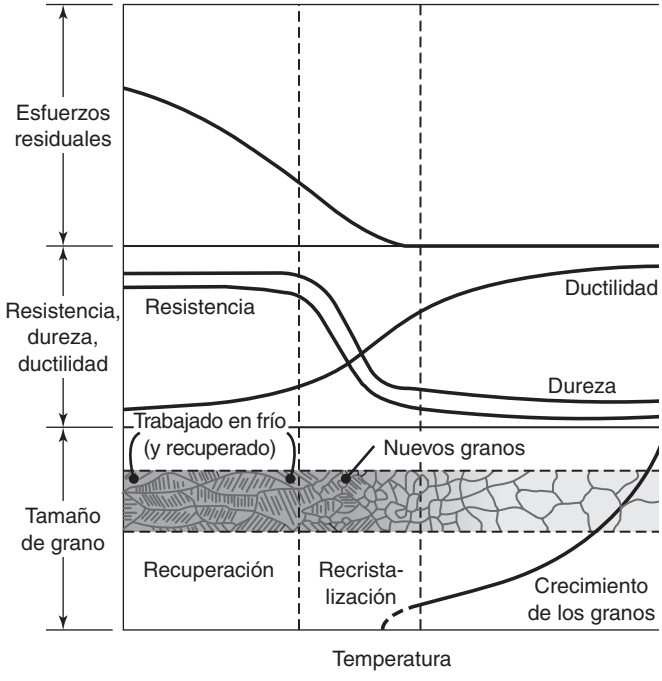


FIGURA 1.14 Esquema de los efectos de la recuperación, recristalización y crecimiento de los granos en las propiedades mecánicas y en la forma y el tamaño de los granos. Obsérvese la formación de nuevos granos pequeños durante la recristalización. *Fuente:* G. Sachs.

prende la difusión: el movimiento e intercambio de átomos a través de los límites de los granos.

Los efectos de la temperatura, el tiempo y la deformación plástica por el trabajo en frío sobre la recristalización son los siguientes:

- Para una cantidad constante de deformación por trabajado en frío, disminuye el tiempo requerido para que la recristalización ocurra con temperatura creciente.
- Cuanto mayor sea el trabajado previo en frío, menor será la temperatura requerida para recristalización.
- Cuanto mayor sea el grado de deformación, más pequeño se volverá el tamaño del grano durante la recristalización. Este efecto es un método común para convertir una estructura de grano grueso en una que tenga un grano más fino, y en consecuencia, propiedades mejoradas.
- Por lo general, la anisotropía debida a la orientación preferencial persiste después de la recristalización. Para restaurar la isotropía, puede ser necesaria una temperatura más elevada que la requerida para la recristalización.

3. **Crecimiento del grano.** Si continuamos elevando la temperatura del metal, los granos comienzan a crecer y finalmente su tamaño podría exceder el tamaño original de los granos; a este fenómeno se le llama crecimiento del grano y afecta las propiedades mecánicas (figura 1.14). Los granos grandes producen una apariencia superficial rugosa en las hojas metálicas llamada **piel de naranja** cuando se estiran para formar una parte, o cuando una pieza metálica se somete a compresión (como en el forjado).

1.7 Trabajado en frío, a temperatura media y en caliente

El **trabajado en frío** se refiere a la deformación plástica que (en general, pero no necesariamente) se lleva a cabo a temperatura ambiente. Cuando la deformación se realiza arriba de la temperatura de recristalización, se le llama **trabajado en caliente**. "En frío" y "en caliente" son términos relativos, como se puede ver en el hecho de que deformar plomo a la temperatura ambiente es un proceso de trabajo en caliente, ya que la temperatura de recristalización del plomo es aproximadamente la temperatura ambiente. Como su nombre implica, el **trabajo a temperatura media** se efectúa a temperaturas intermedias, por lo que el trabajo a temperatura media es una convención entre el trabajado en frío y el trabajado en caliente.

Los rangos de temperatura para estas tres categorías de deformación plástica se dan en la tabla 1.2 en términos de una relación T/T_m, donde T es la temperatura de trabajo y T_m es la temperatura de fusión del metal, ambos en escala absoluta. Aunque se trata de una cantidad adimensional, a esta relación se le conoce como **temperatura homóloga**. En la parte III se describen las importantes diferencias tecnológicas en los productos que se procesan mediante trabajo en frío, a temperatura media y en caliente.

TABLA 1.2

Rangos de temperatura homóloga para diferentes procesos

Proceso	T/T_m
Trabajado en frío	<0.3
Trabajado a temperatura media	0.3 a 0.5
Trabajado en caliente	>0.6

RESUMEN

- Existen tres estructuras cristalinas básicas en los metales: cúbica centrada en el cuerpo (bcc), cúbica centrada en las caras (fcc) y hexagonal compacta (hcp). Los granos formados de estos cristales no son perfectos, porque contienen diferentes defectos e imperfecciones, como dislocaciones, vacantes, impurezas, inclusiones y límites de grano. Los metales policristalinos están compuestos de muchos cristales o granos en orientaciones al azar.
- La deformación plástica en los metales ocurre mediante un mecanismo de desplazamiento. Aunque el esfuerzo teórico cortante requerido para provocar el deslizamiento es muy alto, los esfuerzos reales son mucho menores debido a la presencia de dislocaciones (del tipo de extremo o tornillo). Éstas se obstruyen una a otra o se ven impedidas por barreras como los límites de granos, impurezas e inclusiones. El resultado es que aumenta el esfuerzo al corte requerido para provocar un mayor deslizamiento. En consecuencia, la resistencia total y la dureza del metal también aumentan (endurecimiento por trabajo o endurecimiento por deformación).
- El tamaño del grano tiene un efecto significativo en la resistencia de los metales: cuanto menor sea el tamaño, más fuerte será el metal.
- Los límites de los granos tienen una influencia importante en el comportamiento del metal. Pueden sufrir fragilización, que reduce severamente la ductilidad a temperaturas elevadas (fragilización en caliente); también son responsables del deslizamiento progresivo, que se debe a los límites de los granos.
- Los metales se pueden deformar plásticamente (trabajar) a temperatura ambiente, media o elevada. Su comportamiento y la capacidad para trabajarlos depende en gran medida de si la deformación ocurre abajo o arriba de la temperatura de recristalización. La deformación a temperatura ambiente (trabajado en frío) produce mayor resistencia, pero ductilidad reducida en el metal; en general también causa anisotropía (orientación preferida o fibración mecánica), un estado en el que las propiedades son diferentes en distintas direcciones.
- Los efectos del trabajado en frío se pueden revertir recociendo el metal: calentándolo a cierto rango de temperatura por un periodo y permitiendo después que ocurran procesos sucesivos de recuperación, recristalización y crecimiento de grano.

TÉRMINOS CLAVE

Alotropismo
Anisotropía
Banda de deslizamiento
Celda unitaria
Crecimiento del grano
Cristales
Cúbica centrada en el cuerpo
Cúbica centrada en las caras
Deformación elástica
Deformación plástica
Dislocaciones
Endurecimiento por deformación
Endurecimiento por trabajado
Esfuerzo cortante
Estructura de red
Fibración mecánica
Fragilización
Fragilización en caliente
Granos
Hexagonal compacta
Insensible a la estructura
Límites de grano
Maclaje
Orientación preferencial
Piel de naranja
Plano basal
Plano de deslizamiento
Policristalinas
Poligonización
Polimorfismo
Recristalización
Recuperación
Sensible a la estructura
Sistema de deslizamiento
Tamaño de grano
Temperatura homóloga
Termofluencia
Trabajado en caliente
Trabajado en frío
Trabajo a temperatura media
Vacante

BIBLIOGRAFÍA

Asbhy, M. F. y Jones, D. R. H., *Engineering Materials*, Vol. 1, *An Introduction to Their Properties and Applications*, 2ª. ed., 1996; Vol. 2, *An Introduction to Microstructures, Processing and Design*, 1986, Pergamon Press.

Callister, W. D., Jr., *Materials Science and Engineering*, 6ª. ed., Wiley, 2002.

Shackelford, J. F., *Introduction to Materials Science for Engineers*, 5ª. ed., Prentice Hall, 2000.

Shackelford, J. F. y Alexander, W., *CRC Materials Science and Engineering Handbook*, 3ª. ed., Lewis Pub., Inc., 2000.

PREGUNTAS DE REPASO

1.1 Explique la diferencia entre una celda unitaria y un monocristal.

1.2 ¿Qué efectos tiene la recristalización en las propiedades de los metales?

1.3 ¿Qué es el endurecimiento por deformación y qué efectos tiene sobre las propiedades de los metales?

1.4 Explique qué significa propiedades de los metales sensibles a la estructura e insensibles a la estructura.

1.5 ¿Qué influencia tiene el tamaño de grano en las propiedades mecánicas de los metales?

1.6 ¿Cuál es la relación entre la velocidad de nucleación y el número de granos por unidad de volumen de un metal?

1.7 ¿Qué es un sistema de deslizamiento y cuál es su importancia?

1.8 Explique la diferencia entre recuperación y recristalización.

1.9 ¿Qué es fragilización en caliente y cuál es su importancia?

1.10 Explique las diferencias entre trabajo en frío, a temperatura media y en caliente, de los metales.

1.11 Describa el efecto de piel de naranja.

1.12 ¿Por qué algunos metales, como el plomo, no se pueden volver más fuertes cuando se trabajan en frío?

1.13 Describa la diferencia entre orientación preferencial y fibración mecánica.

1.14 ¿Qué es el maclaje? ¿Cómo difiere del deslizamiento?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

1.15 ¿Cuál es la importancia de que algunos metales sufran alotropismo?

1.16 ¿Es posible que dos piezas del mismo metal tengan temperaturas diferentes de recristalización? ¿Es posible que la recristalización ocurra en algunas regiones de una parte antes de hacerlo en otras regiones de la misma parte? Explique su respuesta.

1.17 Se ha recristalizado una pieza de metal trabajado en frío. Cuando se somete a prueba, se encuentra que es anisotrópica. Explique la razón probable.

1.18 Explique las ventajas y limitaciones del trabajado en frío, a temperatura media y en caliente, respectivamente.

1.19 ¿Usted cree que podría ser importante saber si una materia prima de un proceso de manufactura tiene propiedades anisotrópicas? ¿Qué sucede con la anisotropía en el producto terminado? Explique su respuesta.

1.20 Explique por qué disminuye la resistencia de un metal policristalino a temperatura ambiente al aumentar su tamaño de grano.

1.21 ¿Cuál es la importancia de que metales como el plomo y el estaño tengan temperaturas de recristalización aproximadamente iguales a la temperatura ambiente?

1.22 Se ha observado que cuanto más se trabaje en frío un metal, menos se endurecerá por deformación. Explique por qué.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

1.23 Grafique los datos presentados en la tabla 1.1 en términos de granos/mm^2 contra granos/mm^3 e indique sus observaciones.

1.24 Una tira de metal se reduce de 40 mm de espesor a 20 mm mediante trabajado en frío. Una tira similar se reduce, de manera semejante, de 40 a 30 mm. ¿Cuál de estas tiras trabajadas en frío se recristalizará a una temperatura menor? ¿Por qué?

1.25 Un sujetador para papel está fabricado con alambre de 5 pulgadas de largo y 1/32 de pulgada de diámetro. Si el tamaño de grano ASTM es 9, ¿cuántos granos existen en el sujetador de papel?

1.26 ¿Cuántos átomos existen en la superficie de una cabeza de alfiler? Supóngase que la cabeza del alfiler es esférica con 1 mm de diámetro y tiene un tamaño de grano ASTM de 2.

1.27 Un técnico determina que el tamaño de grano de cierto espécimen atacado químicamente es 8. Después de verificarlo, se encuentra que la ampliación utilizada fue 180× en lugar de la 100× requerida por las normas ASTM. Determine el tamaño correcto de grano.

1.28 Si el diámetro del átomo de aluminio es 0.5 nm, ¿cuántos átomos existen en un grano con un tamaño de grano ASTM de 5?

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

1.29 Estirando una tira delgada de metal pulido (como en una máquina de prueba de tensión), demuestre y comente lo que sucede con su reflectividad conforme se estira.

1.30 Plantee algunas analogías de la fibración mecánica (por ejemplo, capas de masa delgada espolvoreadas con harina o mantequilla entre cada capa).

1.31 Plantee algunas analogías del fenómeno de la fragilización en caliente.

1.32 Obtenga varias bolas pequeñas de plástico, madera, canicas y similares, arréglelas con sus manos o péguelas para representar las estructuras cristalinas mostradas en las figuras 1.2 a 1.4. Haga comentarios sobre sus observaciones.

1.33 Tome un paquete de naipes, coloque una banda de hule alrededor de ellos y deslícelos uno con respecto a otro para representar las figuras 1.6a y 1.7. Si repite el mismo experimento con más y más bandas de hule alrededor del mismo paquete, ¿qué estará logrando en relación con el comportamiento del material?

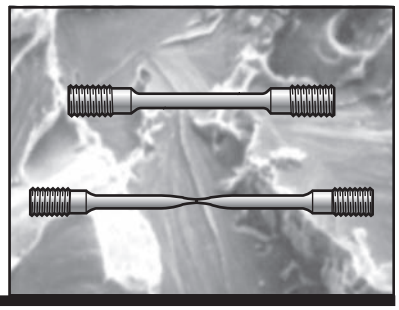
1.34 Dé ejemplos en los que la anisotropía dependa de la escala. Por ejemplo, un cable de alambre contiene alambres recocidos que son isotrópicos a escala microscópica, pero el cable completo es anisotrópico.

1.35 En la sección 1.3, el movimiento de una dislocación de borde se describió en términos de una analogía que comprendía una ondulación en una alfombra y cómo se podía mover toda la alfombra moviendo la ondulación hacia delante. La obstrucción de las dislocaciones se describió en términos de dos ondulaciones a diferentes ángulos. Demuestre este fenómeno utilizando un pedazo de tela colocado en una superficie plana.

CAPÍTULO

2

Comportamiento mecánico, ensayos y propiedades de manufactura de los materiales



2.1 Introducción 64
2.2 Tensión 65
2.3 Compresión 76
2.4 Torsión 78
2.5 Flexión 78
2.6 Dureza 79
2.7 Fatiga 83
2.8 Termofluencia 86
2.9 Impacto 87
2.10 Falla y fractura de los materiales en la manufactura y servicio 87
2.11 Esfuerzos residuales 94
2.12 Trabajo, calor y temperatura 96

EJEMPLOS:

2.1 Cálculo de la resistencia máxima a la tensión 73
2.2 Fractura frágil de las placas de acero del casco del *R.M.S. Titanic* 94

Los metales se pueden procesar y moldear deformándolos plásticamente mediante la aplicación de fuerzas externas. En este capítulo se describen los efectos de estas fuerzas sobre el comportamiento de los materiales, incluyendo:

- Los tipos de pruebas para determinar el comportamiento mecánico de los materiales.
- Características elásticas y plásticas de las curvas esfuerzo-deformación y su importancia.
- Relaciones entre esfuerzo y deformación y su importancia respecto de la influencia de la temperatura y la velocidad de deformación.
- Características de dureza, fatiga, termofluencia, impacto y esfuerzos residuales y su participación en el procesamiento de los materiales.
- Efectos de las inclusiones y defectos en el comportamiento frágil y dúctil de los metales.
- Por qué y cómo fallan los materiales cuando se someten a fuerzas externas.

2.1 Introducción

En las operaciones de manufactura, numerosas partes y componentes se han *formado* con diferentes formas mediante la aplicación de fuerzas externas a la pieza de trabajo, típicamente por medio de diversas herramientas y matrices. Ejemplos comunes son el forjado de discos para turbinas, la extrusión de diversos componentes de escaleras de aluminio, el estirado de alambres para fabricar clavos, y la laminación de metales para fabricar láminas utilizadas en utensilios de cocina y carrocerías de automóviles. Las operaciones de formado se pueden efectuar a temperatura ambiente o a temperaturas elevadas y con una velocidad de deformación baja o alta. Estas operaciones también se utilizan en el formado y modelado de materiales no metálicos, como los plásticos y las cerámicas.

Como se indicó en la figura I.2, hoy en día existe una extensa variedad de materiales metálicos y no metálicos que tienen un rango de propiedades igualmente amplio, como se muestra cualitativamente en la tabla 2.1. Este capítulo cubre los aspectos de las propiedades mecánicas y el comportamiento de los metales que son importantes para el diseño y la manufactura de partes e incluye métodos de prueba muy utilizados, empleados para la evaluación de diversas propiedades de los materiales.

TABLA 2.1

Propiedades mecánicas relativas de diversos metales a temperatura ambiente, en orden decreciente. Los metales se encuentran en forma de aleación

Resistencia	Dureza	Tenacidad	Rigidez	Resistencia/densidad
Fibras de vidrio	Diamante	Metales dúctiles	Diamante	Plásticos reforzados
Fibras de grafito	Nitruro cúbico de boro	Plásticos reforzados	Carburos	Titanio
Fibras de kevlar	Carburos	Termoplásticos	Tungsteno	Acero
Carburos	Aceros endurecidos	Madera	Acero	Aluminio
Molibdeno	Titanio	Termofijos	Cobre	Magnesio
Aceros	Hierros fundidos	Cerámicas	Titanio	Berilio
Tantalio	Cobre	Vidrio	Aluminio	Cobre
Titanio	Termofijos		Cerámicas	Tantalio
Cobre	Magnesio		Plásticos reforzados	
Termofijos reforzados	Termoplásticos		Madera	
Termoplásticos reforzados	Estaño		Termofijos	
Termoplásticos	Plomo		Termoplásticos	
Plomo			Hules	

2.2 Tensión

El ensayo **de tensión** es el más común para determinar *propiedades mecánicas* de los materiales, como resistencia, ductilidad, tenacidad, módulos elásticos y **capacidad de endurecimiento por deformación**. Primero, requiere la preparación de un **espécimen de prueba** como se muestra en la figura 2.1a. En Estados Unidos el espécimen se prepara de acuerdo con las especificaciones de la ASTM. En caso contrario, se le dispone según los criterios de la organización correspondiente en otros países. Aunque la mayoría de los especimenes de ensayo de tensión son sólidos y redondos, también pueden ser planos o tubulares.

Típicamente, el espécimen tiene una **longitud original calibrada** (l_o) en general de 50 mm (2 pulgadas), y una sección transversal (A_o) por lo común con un diámetro de 12.5 mm (0.5 pulgadas). El espécimen se monta entre las mordazas de una máquina de ensayo de tensión. Estas máquinas están equipadas con diversos accesorios y controles para probar el espécimen a diferentes temperaturas y velocidades de deformación.

2.2.1 Curvas esfuerzo-deformación

En las figuras 2.1a y 2.2 se muestra una secuencia típica de deformación del espécimen de ensayo de tensión. Cuando se aplica la carga por primera vez, el espécimen se alarga en proporción a ella; a este comportamiento se le llama **elástico lineal**. Si se retira la carga, el espécimen recupera su longitud y forma originales de manera elástica, como una banda de hule cuando se estira y se suelta.

El **esfuerzo ingenieril** (**esfuerzo nominal**) se define como la relación de la carga aplicada (P) al área transversal original (A_o) del espécimen:

$$\text{Esfuerzo ingenieril, } \sigma = \frac{P}{A_o} \tag{2.1}$$

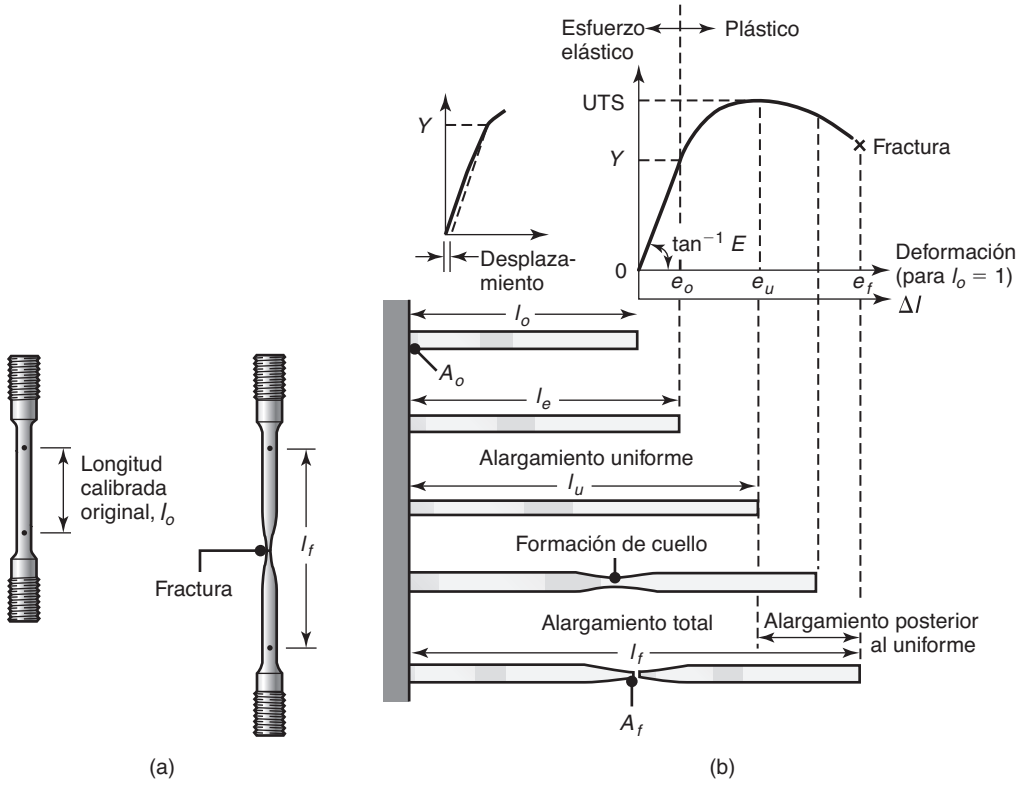


FIGURA 2.1 *(a)* Espécimen estándar de tensión antes y después de la tracción, mostrando las longitudes calibradas original y final. *(b)* Secuencia de ensayo de tensión que muestra diferentes etapas en el alargamiento del espécimen.

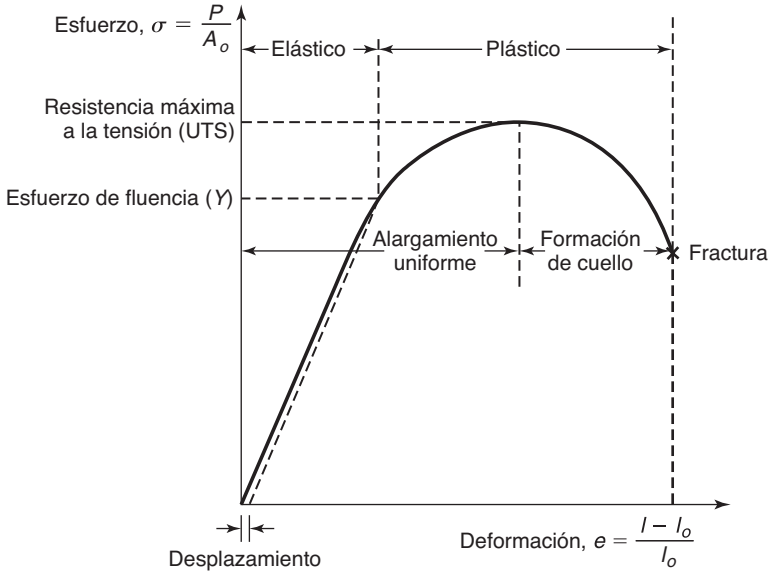


FIGURA 2.2 Curva típica esfuerzo-deformación obtenida de un ensayo de tensión, que muestra varias características.

La **deformación ingenieril** se define como

$$\text{Deformación ingenieril, } e = \frac{(l - l_o)}{l_o} \tag{2.2}$$

donde l es la longitud instantánea del espécimen.

Al aumentar la carga, el espécimen (en cierto nivel de esfuerzo) empieza a sufrir una **deformación permanente (plástica)**. Más allá de ese nivel, el esfuerzo y la deformación ya no son proporcionales, como lo eran en la región elástica. El esfuerzo con que ocurre este fenómeno se conoce como **esfuerzo de fluencia** (o **esfuerzo de cedencia**) (***Y***) del material. En la tabla 2.2 se muestran este último y otras propiedades para diversos materiales metálicos y no metálicos.

En el caso de los materiales blandos y dúctiles, puede no ser fácil ubicar con exactitud dónde ocurre la fluencia sobre la curva esfuerzo-deformación, pues la pendiente de la porción recta (elástica) de la curva comienza a disminuir lentamente. Por lo tanto, *Y* suele definirse como el punto sobre la curva esfuerzo-deformación que se **desplaza** por una deformación de 0.002 o 0.2% de elongación. En el lado izquierdo de la figura 2.2 se muestra este simple procedimiento.

Conforme el espécimen comienza a alargarse (bajo una carga continuamente creciente), el área de su sección transversal disminuye **permanente** y **uniformemente** a toda su longitud calibrada. Si se retira la carga del espécimen en un nivel de esfuerzo superior

TABLA 2.2

Propiedades mecánicas de diversos materiales a temperatura ambiente

Metales (maleables)	*E* (GPa)	*Y* (MPa)	UTS (MPa)	Alargamiento en 50 mm (%)	Relación de Poisson (ν)
Aluminio y sus aleaciones	69–79	35–550	90–600	45–4	0.31–0.34
Cobre y sus aleaciones	105–150	76–1100	140–1310	65–3	0.33–0.35
Plomo y sus aleaciones	14	14	20–55	50–9	0.43
Magnesio y sus aleaciones	41–45	130–305	240–380	21–5	0.29–0.35
Molibdeno y sus aleaciones	330–360	80–2070	90–2340	40–30	0.32
Níquel y sus aleaciones	180–214	105–1200	345–1450	60–5	0.31
Aceros	190–200	205–1725	415–1750	65–2	0.28–0.33
Titanio y sus aleaciones	80–130	344–1380	415–1450	25–7	0.31–0.34
Tungsteno y sus aleaciones	350–400	550–690	620–760	0	0.27
Zinc y sus aleaciones	50	25–180	240–550	65–5	0.27
Materiales no metálicos					
Cerámicas	70–1000	—	140–2600	0	0.2
Diamante	820–1050	—	—	—	—
Vidrio y porcelana	70–80	—	140	0	0.24
Carburo de silicio (SiC)	200–500	—	310–400	—	0.19
Nitruro de silicio (Si_2N_4)	280–310	—	160–580	—	0.26
Hules	0.01–0.1	—	—	—	0.5
Termoplásticos	1.4–3.4	—	7–80	1000–5	0.32–0.40
Termoplásticos reforzados	2–50	—	20–120	10–1	—
Termofijos	3.5–17	—	35–170	0	0.34
Fibras de boro	380	—	3500	0	—
Fibras de carbono	275–415	—	2000–3000	0	—
Fibras de vidrio	73–85	—	3500–4600	0	—
Fibras de kevlar	62–117	—	2800	0	—
Fibras de spectra	73–100	—	2400–2800	3	—

Nota: En la tabla superior, los menores valores de E, Y y UTS, y los mayores valores para alargamiento son para metales puros. Multiplíquense gigapascales (GPa) por 145,000 para obtener libras por pulgada cuadrada (psi) y megapascales (MPa) por 145 para obtener psi.

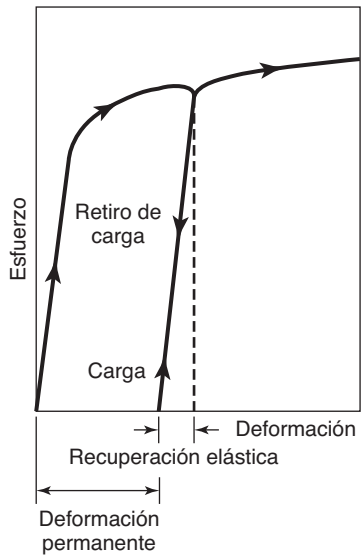


FIGURA 2.3 Esquema de la carga y descarga de un espécimen de ensayo de tensión. Obsérvese que, durante la descarga, la curva sigue una trayectoria paralela a la pendiente elástica original.

al esfuerzo de fluencia, la curva sigue una línea recta hacia abajo y paralela a la pendiente original de la curva (fig. 2.3). Al aumentar aún más la carga, el esfuerzo ingenieril finalmente alcanza un máximo y después comienza a decrecer (fig. 2.2). Al esfuerzo ingenieril máximo se le llama **resistencia a la tensión**, o **resistencia máxima de tensión** (UTS) del material. En la tabla 2.2 se dan valores de UTS para diversos materiales.

Si se agrega carga al espécimen más allá de su resistencia máxima de tensión, comienza a **estrecharse,** es decir, la formación de cuello. El área de la sección transversal del espécimen ya no es uniforme a lo largo de la longitud calibrada y es menor en la región del cuello. Al avanzar la prueba, el esfuerzo ingenieril se reduce más y el espécimen finalmente se fractura en la región del cuello (fig. 2.1a). Al esfuerzo de ingeniería en el punto de fractura se le conoce como esfuerzo de **ruptura** o de **fractura**.

La relación de esfuerzo a deformación en la región elástica es el **módulo de elasticidad** (*E*) o **módulo de Young** (llamado así en honor de T. Young, 1773-1829):

$$\text{Módulo de elasticidad, } E = \frac{\sigma}{e} \tag{2.3}$$

A esta relación lineal se le conoce como **ley de Hooke** (llamada así en honor de R. Hooke, 1635-1703).

Obsérvese en la ecuación 2.3 que, como la deformación en ingeniería es adimensional, *E* tiene las mismas unidades que el esfuerzo. El módulo de elasticidad es fundamentalmente una medida de la pendiente de la porción elástica de la curva, y en consecuencia, de la **rigidez** del material. Cuanto mayor sea el valor de *E*, mayor será la carga requerida para alargar el espécimen en la misma medida y, por lo tanto, más rígido será el material. Por ejemplo, compárese la rigidez del alambre metálico con la de una banda de hule o una hoja de plástico al tratar de alargarlas en la misma medida.

El alargamiento del espécimen sometido a tensión se acompaña de una contracción lateral; este efecto se puede observar fácilmente alargando una banda de hule. Al valor absoluto de la relación de deformación lateral a la deformación longitudinal se le conoce como **relación de Poisson** (llamada así en honor de S. D. Poisson, 1781-1840) y se identifica mediante el símbolo ν.

2.2.2 Ductilidad

Un comportamiento importante observado durante un ensayo de tensión es la **ductilidad**, es decir, la medida de la deformación plástica que sufre el material antes de romperse. Existen dos medidas comunes de ductilidad. La primera es el **alargamiento total** del espécimen:

$$\text{Alargamiento} = \frac{(l_f - l_o)}{l_o} \times 100 \tag{2.4}$$

donde l_f y l_o se miden, como se muestra en la figura 2.1a. Obsérvese que el alargamiento se basa en la longitud *original* calibrada del espécimen y que se calcula como un porcentaje.

La segunda medida de ductilidad es la **reducción del área**:

$$\text{Reducción del área} = \frac{(A_o - A_f)}{A_o} \times 100 \tag{2.5}$$

donde A_o y A_f son las áreas transversales original y final (a la fractura), respectivamente, del espécimen de prueba. En general, la reducción del área y el alargamiento se relacionan entre sí, como se muestra en la figura 2.4 para algunos metales característicos. Por ello, la ductilidad de una pieza de gis es cero, porque no se alarga ni reduce su sección transversal. En contraste, un espécimen dúctil, como la goma de mascar, se alarga y estrecha de modo considerable antes de romperse.

2.2.3 Esfuerzo real y deformación real

El esfuerzo ingenieril se basa en el área transversal original A_o del espécimen. Sin embargo, el área transversal instantánea del espécimen se reduce conforme se alarga éste, como lo hace el área de una banda de hule; entonces, el esfuerzo ingenieril no representa el esfuerzo *verdadero* al que se somete el espécimen.

El **esfuerzo real** se define como la relación de la carga (P) al área transversal real (A) —instantánea, y por lo tanto verdadera— del espécimen.

$$\text{Esfuerzo real, } \sigma = \frac{P}{A} \tag{2.6}$$

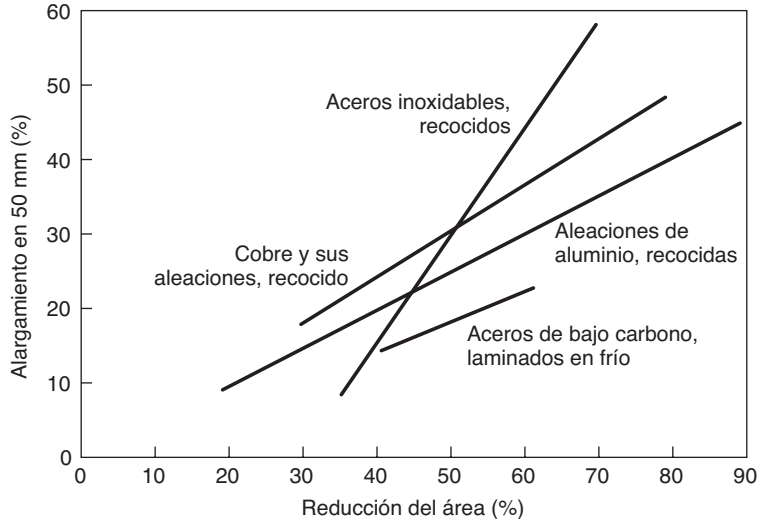


FIGURA 2.4 Relación aproximada entre el alargamiento y la reducción del área por tensión para diferentes grupos de metales.

Para obtener la deformación real, primero se considera que el alargamiento del espécimen consiste en incrementos de cambio instantáneo de su longitud. Después, utilizando el cálculo, se puede demostrar que la **deformación real** (*deformación natural* o *logarítmica*) se calcula como:

$$\text{Deformación real, } \varepsilon = \ln\left(\frac{l}{l_o}\right). \tag{2.7}$$

Obsérvese que, de las ecuaciones 2.2 y 2.7, para valores pequeños de deformación, las deformaciones ingenieril y real son aproximadamente iguales. Sin embargo, divergen con rapidez conforme aumenta la carga. Entonces, por ejemplo, cuando $e = 0.1$, $\varepsilon = 0.095$, y cuando $e = 1$, $\varepsilon = 0.69$.

A diferencia de las deformaciones ingenieriles, las deformaciones reales son consistentes con los fenómenos físicos reales en la deformación de los materiales. Por ejemplo, supóngase una situación hipotética. Un espécimen de 50 mm (2 pulgadas) de altura se comprime entre dos platinas planas hasta una altura final de cero; en otras palabras, lo hemos deformado infinitamente. De acuerdo con sus definiciones, la deformación ingenieril que sufre el espécimen es $(0 - 50)/50 = -1$, pero la deformación real es $-\infty$. Obsérvese que la respuesta será la misma independientemente de la altura original del espécimen. Es obvio que la deformación real describe de modo correcto la medida de la deformación, ya que, de hecho, ésta es infinita.

2.2.4 Construcción de las curvas esfuerzo-deformación

El procedimiento para construir una curva esfuerzo-deformación ingenieril consiste en tomar la curva carga-alargamiento (figs. 2.2 y 2.5a) y dividir después la carga (eje vertical) entre el área transversal original (A_o) y el alargamiento (eje horizontal) entre la longitud medida original (l_o). Debido a que estas dos cantidades se dividen entre constantes, la curva esfuerzo-deformación de ingeniería obtenida (que se muestra en la fig. 2.5b) tiene la misma forma que la curva carga-alargamiento de la figura 2.5a. (En este ejemplo, $A_o = 0.056$ pulg^2 y $A_f = 0.016$ pulg^2).

Las curvas de esfuerzo real-deformación real se consiguen de manera similar, dividiendo la carga entre el área transversal instantánea, para obtener la deformación verdadera de la ecuación 2.7. El resultado se muestra en la figura 2.5c. Obsérvese la *corrección* a la curva; ésta refleja que la región del cuello del espécimen está sometida a esfuerzos tridimensionales de tensión, como se describe en textos más avanzados. Este estado da valores de esfuerzo mayores que el esfuerzo real verdadero; de ahí que, para compensar, la curva debe corregirse hacia abajo.

La curva esfuerzo-deformación real de la figura 2.5c se puede representar por la ecuación

$$\sigma = K\varepsilon^n \tag{2.8}$$

en donde K se conoce como **coeficiente de resistencia** y n como **exponente de endurecimiento por deformación** (o **endurecimiento por trabajo**). En la tabla 2.3 se dan valores característicos de K y n para varios metales.

Cuando se grafica la curva mostrada en la figura 2.5c en una gráfica logarítmica-logarítmica, se encuentra que la curva es aproximadamente una línea recta (fig. 2.5d). La pendiente de la curva es igual al exponente n. Por lo tanto, cuanto mayor sea la pendiente, mayor será la capacidad de endurecimiento por deformación del material: esto es, se vuelve más fuerte y duro al deformarse.

En la figura 2.6 se dan las curvas esfuerzo real-deformación real para varios metales. (Si se revisa con detalle, se observan algunas diferencias entre la tabla 2.3 y la figura 2.6, debido a que comprenden diferentes fuentes de datos y distintos especímenes). Nótese que se han eliminado las regiones elásticas, porque la pendiente en esta región es muy alta. En consecuencia, se puede considerar que el punto de intersección de cada curva con el eje vertical en esta figura es el esfuerzo de fluencia (Y) del material.

El área bajo la curva esfuerzo-deformación real en una deformación en particular es la *energía por unidad de volumen del material deformado* (**energía específica**) e indica

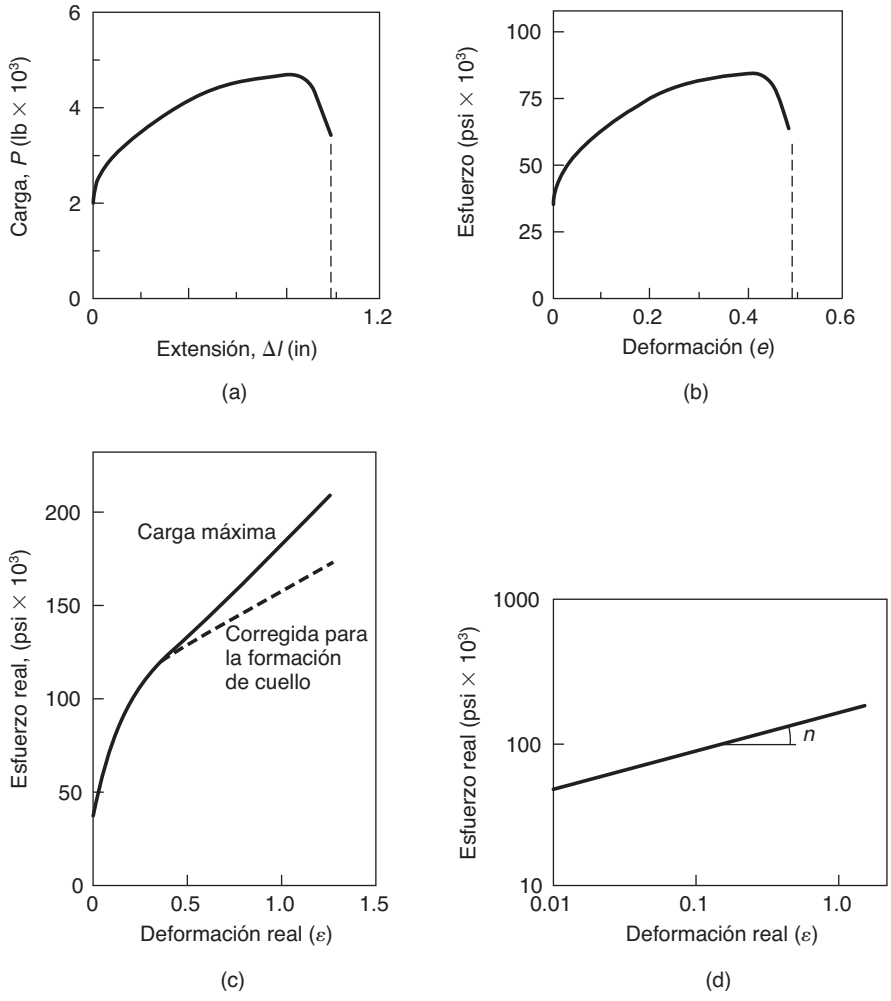


FIGURA 2.5 *(a)* Curva carga-alargamiento en el ensayo de tensión de un espécimen de acero inoxidable. *(b)* Curva esfuerzo-deformación real, dibujada a partir de los datos de la figura 2.5a. *(c)* Curva esfuerzo-deformación real, dibujada a partir de los datos de la figura 2.5b. Obsérvese que esta curva tiene una pendiente positiva, la cual indica que el material se está volviendo más fuerte al ser deformado. *(d)* Curva esfuerzo-deformación real, graficada en un papel logarítmico-logarítmico con base en la curva corregida en la figura 2.5c. La corrección se debe al estado triaxial del esfuerzo que existe en la región del cuello del espécimen.

el trabajo requerido para deformar plásticamente una unidad de volumen del material hacia esa deformación. Al área bajo la curva esfuerzo-deformación real hasta el punto de la fractura se le conoce como **tenacidad** del material (esto es, la cantidad de energía por unidad de volumen que disipa el material antes de la fractura). Obsérvese que esa tenacidad comprende tanto la altura como el ancho de la curva esfuerzo-deformación del material; mientras que la resistencia sólo se relaciona con la *altura* de la curva, y la ductilidad, con el *ancho* de la curva.

2.2.5 Deformación en la formación de cuello en un ensayo de tensión

Como ya se indicó, el inicio de la formación de cuello en un espécimen de ensayo de tensión corresponde a la resistencia máxima a la tensión del material. Obsérvese que la pendiente de la curva carga-alargamiento en este punto es cero, y es aquí donde el espécimen

TABLA 2.3

Valores característicos para *K* y *n* a temperatura ambiente

	K (MPa)	*n*
Aluminio		
1100–O	180	0.20
2024–T4	690	0.16
6061–O	205	0.20
6061–T6	410	0.05
7075–O	400	0.17
Latón		
70–30, recocido	900	0.49
85–15, laminado en frío	580	0.34
Aleación con base cobalto, tratado térmicamente	2070	0.50
Cobre recocido	315	0.54
Acero		
Bajo carbono recocido	530	0.26
4135 recocido	1015	0.17
4135 laminado en frío	1100	0.14
4340 recocido	640	0.15
Inoxidable 304 recocido	1275	0.45
Inoxidable 410 recocido	960	0.10

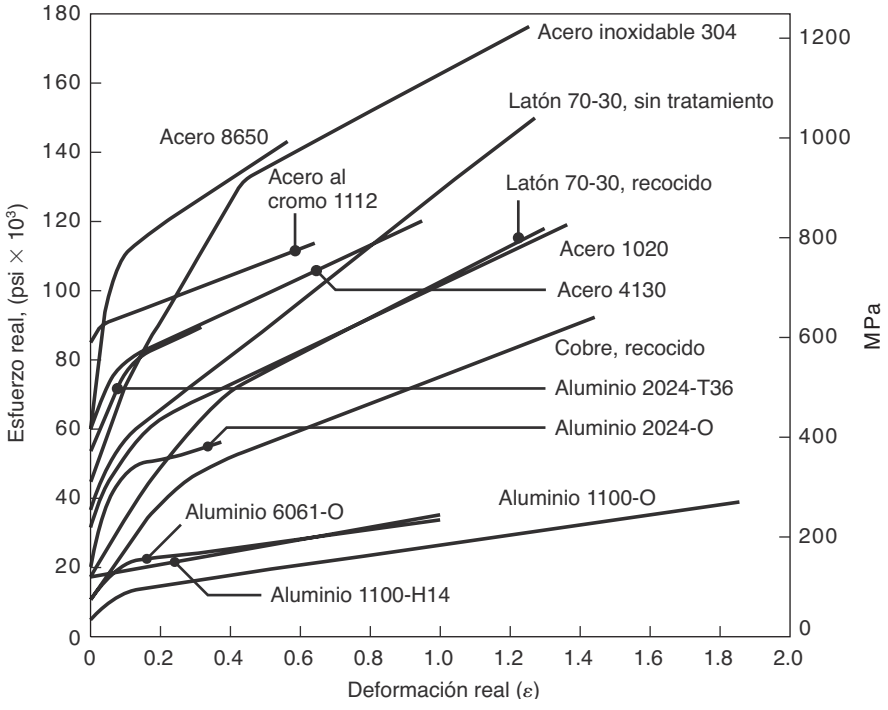


FIGURA 2.6 Curvas esfuerzo-deformación reales en tensión a temperatura ambiente para diversos metales. Las curvas inician a un nivel finito de esfuerzo: las regiones elásticas tienen una pendiente muy pronunciada para mostrarse en esta figura, por lo que cada curva comienza en el esfuerzo de fluencia (*Y*) del material.

comienza la formación de cuello. El espécimen no puede soportar la carga porque el área de la sección transversal de la formación de cuello se vuelve más pequeña a una velocidad mayor que la del material que se vuelve más fuerte (se endurece por deformación).

La deformación real al inicio de la formación de cuello es numéricamente igual al exponente de endurecimiento por deformación (n) del material. Por ello, cuanto mayor sea el valor de n, mayor será la deformación que puede experimentar una pieza de material *uniformemente* antes de que comience el cuello. Esta observación es importante, en particular respecto de las operaciones de formado de láminas metálicas que comprenden el estiramiento del material de la pieza de trabajo (capítulo 16). En la tabla 2.3 es posible ver que el cobre, latón y acero inoxidable recocidos tienen valores altos de n; esto significa que se pueden estirar de modo uniforme en una medida mucho mayor que los otros metales listados.

EJEMPLO 2.1 Cálculo de la resistencia máxima a la tensión

En este ejemplo se muestra que la UTS de un material se puede calcular a partir de sus valores K y n. Supóngase que un material tiene una curva esfuerzo real-deformación real dada por

$$\sigma = 100{,}000\varepsilon^{0.5} \text{ psi}$$

Calcúlese la verdadera resistencia máxima a la tensión y la UTS ingenieril de este material.

Solución Debido a que la deformación justo cuando se forma el cuello corresponde a la carga máxima y la deformación para este material es

$$\varepsilon = n = 0.5$$

la *verdadera* resistencia máxima a la tensión es

$$\sigma = Kn^n = 100{,}000(0.5)^{0.5} = 70{,}710 \text{ psi}$$

El área real al inicio de la formación de cuello se obtiene de

$$\ln\left(\frac{A_o}{A_{estr}}\right) = 0.5$$

Entonces,

$$A_{estr} = A_o\varepsilon^{-0.5}$$

y la máxima carga (P) es

$$P = \sigma A_{estr} = \sigma A_o e^{-0.5}$$

donde σ es la resistencia máxima a la tensión. Por lo que,

$$P = (70{,}710)(0.606)(A_o) = 42{,}850A_o \text{ lb}$$

Ya que UTS $= P/A_o$,

$$\text{UTS} = 42{,}850 \text{ psi}$$

2.2.6 Efectos de la temperatura

Generalmente, incrementar la temperatura tiene los siguientes efectos en las curvas esfuerzo-deformación (fig. 2.7):

a. Eleva la ductilidad y la tenacidad.

b. Reduce el esfuerzo de fluencia y el módulo de elasticidad.

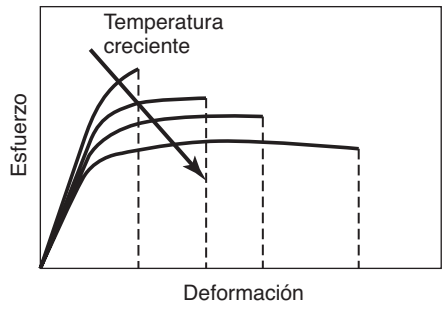


FIGURA 2.7 Efectos característicos de la temperatura en las curvas esfuerzo-deformación. Obsérvese que la temperatura afecta el módulo de elasticidad, el esfuerzo de fluencia, la resistencia máxima a la tensión y la tenacidad (área bajo la curva) de los materiales.

La temperatura también afecta el exponente de endurecimiento por deformación de muchos metales, en los que n decrece con la temperatura creciente. Sin embargo, la influencia de la temperatura se describe mejor en conjunto con la velocidad de deformación.

2.2.7 Efectos de la velocidad de deformación

Así como podemos inflar un globo o estirar una banda de hule a diferentes velocidades, también podemos dar forma a un material en un proceso de manufactura a distintas velocidades. Algunas máquinas, como las prensas hidráulicas, forman materiales a bajas velocidades; otras, como las prensas mecánicas, lo hacen a alta velocidad. Para simular tales diferencias, el espécimen de prueba se puede deformar a una velocidad que corresponda a la que experimentará el metal en el proceso real de manufactura.

La **velocidad de alargamiento** (**por unidad de tiempo**) se define como la velocidad a la que se efectúa el ensayo de tensión en unidades de, digamos, m/s o ft/min. Por otro lado, la **velocidad de deformación** es una función de la longitud del espécimen. Un espécimen corto se elonga más proporcionalmente durante el mismo periodo que uno largo. Por ejemplo, tomemos dos bandas de hule, una de 20 mm y la otra de 100 mm de largo, y estirémoslas 10 mm cada una en un periodo de 1 segundo. La deformación ingenieril en el espécimen más corto es $\frac{10}{20} = 0.5$ y en el más largo es $\frac{10}{100} = 0.1$. Entonces, las velocidades de deformación son 0.5 s^{-1} y 0.1 s^{-1}, respectivamente, siendo sometida la banda más corta a una velocidad de carga cinco veces mayor que la de la larga (aunque ambas son elongadas a la misma velocidad de alargamiento).

En la tabla 2.4 se dan velocidades de alargamiento empleadas típicamente en diversos procesos de prueba y de trabajo de los metales y las deformaciones reales involucradas. Obsérvese la diferencia considerable de magnitudes. Debido a este amplio rango, las velocidades de deformación suelen establecerse en términos de magnitud, como 10^2 s^{-1}, 10^4 s^{-1}, y así sucesivamente.

Los efectos característicos que la temperatura y la velocidad de deformación ejercen en conjunto sobre la resistencia de los metales se muestran en la figura 2.8. Obsérvese que el aumento de dicha velocidad aumenta la resistencia del material (**endurecimiento por velocidad de deformación**). A la pendiente de estas curvas se le llama **exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación** (m). El valor de m se obtiene de gráficas logarítmica-logarítmica, en la inteligencia de que las escalas vertical y horizontal son las mismas (a diferencia de las de la fig. 2.8). Por lo tanto, una pendiente de 45° indicaría un valor de $m = 1$. La relación está dada por la ecuación

$$\sigma = C\dot{\varepsilon}^m \tag{2.9}$$

donde C es el **coeficiente de resistencia**, similar a (pero no confundir con) el coeficiente de resistencia K en la ecuación 2.8. La constante C tiene las unidades de esfuerzo, mientras que $\dot{\varepsilon}$ es la velocidad de deformación real, definida como la verdadera deformación que sufre el material por unidad de tiempo.

Obsérvese, en la figura 2.8, que la sensibilidad de la relación resistencia a deformación se incrementa con la temperatura; en otras palabras, m aumenta con el incremento

TABLA 2.4

Rangos característicos de deformación real y de velocidad de deformación en procesos de manufactura

Proceso	Deformación real	Velocidad de deformación (m/s)
Trabajado en frío [Datos]		
Forjado, laminado	0.1–0.5	0.1–100
Estirado de alambre y tubo	0.05–0.5	0.1–100
Formado explosivo	0.05–0.2	10–100
Trabajado en caliente y temperatura media		
Forjado, laminado	0.1–0.5	0.1–30
Extrusión	2–5	0.1–1
Maquinado	1–10	0.1–100
Formado de hoja metálica	0.1–0.5	0.05–2
Formado superplástico	0.2–3	10^{-4}–10^{-2}

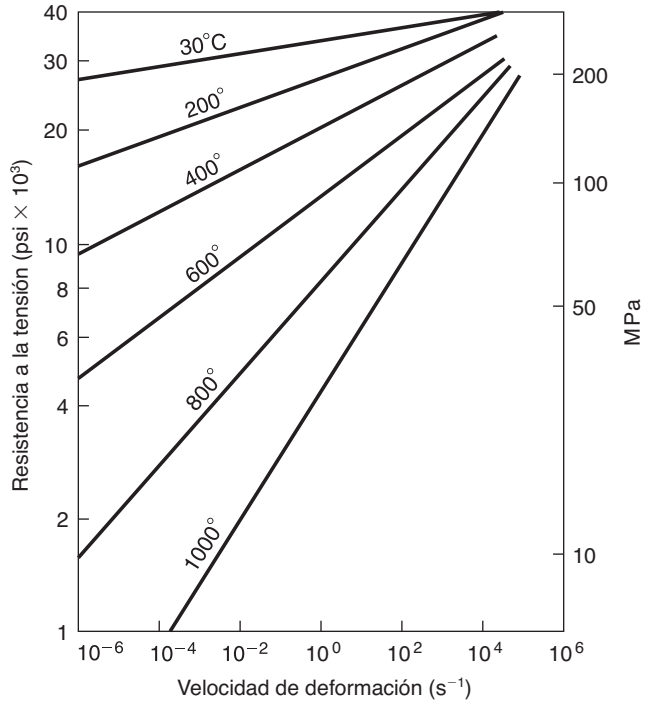


FIGURA 2.8 Efecto de la velocidad de deformación sobre la resistencia máxima a la tensión para el aluminio. Obsérvese que, al aumentar la temperatura, las pendientes de las curvas aumentan; por lo tanto, la resistencia se vuelve más sensible a la velocidad de deformación conforme aumenta la temperatura. *Fuente:* J. H. Hollomon.

en la temperatura. Sin embargo, nótese que la pendiente es relativamente plana a temperatura ambiente, esto es, m es muy baja ahí. Esta condición es cierta para la mayoría de los metales, pero no para los que se recristalizan a temperatura ambiente, como el plomo y el estaño. Algunos rangos característicos de m son los siguientes:

Trabajado en frío: hasta 0.05
Trabajado en caliente: 0.05 a 0.4
Materiales superplásticos: 0.3 a 0.85

La magnitud del exponente de sensibilidad a la velocidad de carga influye de modo significativo en la formación de cuello en un ensayo de tensión. Al aumentar m, el material se alarga más antes de romperse; en consecuencia, el aumento de m retrasa la formación de cuello. El mejoramiento en la ductilidad provocado por la alta sensibilidad a la velocidad de deformación de algunos materiales se ha explotado en el **formado superplástico** de las láminas metálicas (sección 16.10).

Superplasticidad. Este término se refiere a la capacidad de algunos materiales para sufrir alargamientos grandes y uniformes antes del cuello y la fractura en tensión. El alargamiento puede ser desde un pequeño porcentaje hasta 2000%. Los materiales no metálicos comunes que muestran un comportamiento superplástico son la goma de mascar, el vidrio (a temperaturas elevadas) y los termoplásticos. Estos dos últimos se pueden conformar en formas complejas, como botellas para bebidas y anuncios publicitarios iluminados, respectivamente. Entre los metales que muestran comportamiento superplástico se encuentran las aleaciones de titanio de grano muy fino (10 a 15 mm) y las aleaciones de zinc-aluminio; al calentarse, pueden alargar muchas veces su longitud original.

2.2.8 Efectos de la presión hidrostática

Se han realizado diversas pruebas bajo presión hidrostática para determinar el efecto de ésta en las propiedades mecánicas de los materiales. Los resultados de las pruebas a presiones hasta de 3.5 GPa (500 ksi) indican que el aumento de la presión hidrostática incrementa sustancialmente la deformación a la fractura, tanto para los materiales dúctiles como para los frágiles. Este efecto benéfico de la presión hidrostática se ha explotado en los procesos de trabajo de los metales, particularmente en la extrusión hidrostática (sección 15.4) y la compactación de los polvos metálicos (sección 17.3).

2.2.9 Efectos de la radiación

En vista del uso de muchos metales y aleaciones en aplicaciones nucleares, se han realizado extensos estudios sobre los efectos de la radiación en las propiedades metálicas. Los cambios característicos en las propiedades de los aceros y de otros metales expuestos a la radiación de alta energía son el incremento en el esfuerzo de fluencia, resistencia a la tensión y dureza, y la disminución de la ductilidad y la tenacidad. La radiación tiene efectos degradantes similares en el comportamiento de los plásticos.

2.3 Compresión

Muchas operaciones de manufactura, particularmente procesos como el forjado, laminado y extrusión (parte III), se realizan con la pieza de trabajo sujeta a fuerzas compresivas. La **prueba de compresión**, en la que el espécimen se somete a carga de compresión, proporciona información útil para estimar las fuerzas y los requisitos de potencia en estos procesos. Es común que esta prueba se realice comprimiendo un espécimen sólido cilíndrico entre dos matrices planas (platinas) bien lubricadas. Debido a la fricción entre el

espécimen y las platinas, la superficie cilíndrica del espécimen se abomba; a este efecto se le llama **abarrilamiento** (ver fig. 14.3). La fricción evita que las superficies superior e inferior se expandan con libertad. Nótese que los especímenes esbeltos se pueden *pandear* durante esta prueba; por eso, típicamente, la proporción altura a diámetro del espécimen sólido cilíndrico debe ser menor a 3:1.

Debido a que el área de sección transversal del espécimen ahora cambia a lo largo de su altura (siendo máxima en el centro), podría ser difícil obtener curvas esfuerzo-deformación en compresión. Además, la fricción disipa energía, por lo que la fuerza compresiva es mayor de lo que sería al proporcionar el trabajo requerido para superar la fricción. Con lubricación efectiva, se puede minimizar la fricción y mantener un área de sección transversal razonablemente constante durante la prueba.

Si se comparan los resultados de las pruebas de tensión y de compresión de metales *dúctiles*, se advertirá que las curvas esfuerzo-deformación reales coinciden en las dos pruebas. Esta comparación no es válida para los materiales *frágiles*, que generalmente son más fuertes y dúctiles a compresión que a tensión (ver tabla 8.2).

Cuando un metal con cierto esfuerzo tensil de fluencia se somete a tensión dentro del rango plástico y después se libera la carga y se aplica en compresión, se verá que el esfuerzo de fluencia a compresión es menor que el de tensión. A este fenómeno se le conoce como **efecto Bauschinger** (llamado así en honor de J. Bauschinger, quien informó de él en 1881) y aparece en grados variables en todos los metales y aleaciones. Debido al esfuerzo de fluencia reducido en la dirección opuesta a la de aplicación original de la carga, a este fenómeno también se le llama **reblandecimiento por deformación** o **reblandecimiento por trabajo**.

Ensayo del disco. Para los materiales frágiles, como las cerámicas y los vidrios, se ha desarrollado un **ensayo del disco** en el que éste se somete a compresión entre dos platinas planas endurecidas (fig. 2.9). Cuando el material se somete a carga como se muestra, se desarrollan esfuerzos a la tensión perpendiculares al eje vertical a lo largo del disco, se inicia la fractura y el disco se parte en dos verticalmente. El *esfuerzo a la tensión* (σ) en el disco es uniforme a lo largo del eje y se puede calcular a partir de la fórmula

$$\text{Esfuerzo de tensión, } \sigma = \frac{2P}{\pi dt} \tag{2.10}$$

donde P es la carga a la fractura, d el diámetro del disco y t su espesor. Para evitar la falla prematura en los puntos de contacto, se colocan tiras delgadas de metal blando entre el disco y las platinas, que también son protegidas del daño durante la prueba. La fractura en el centro del espécimen se utiliza en la manufactura de *tubería sin costura* (sección 13.5).

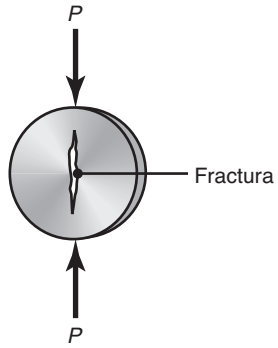


FIGURA 2.9 Ensayo de disco en un material frágil, mostrando la dirección de carga y la trayectoria de la fractura.

2.4 Torsión

Una pieza de trabajo se puede someter no sólo a tensión y a compresión, sino también a deformaciones cortantes (fig. 2.10), como en el troquelado de agujeros en láminas metálicas y en el corte de metales (sección 21.2). El método de prueba que suele utilizarse para determinar las propiedades de los materiales a corte es el **ensayo de torsión**. Obtener una distribución uniforme del esfuerzo y de la deformación a lo largo de la sección transversal requiere que esta prueba se realice en un espécimen tubular.

Generalmente, el espécimen de torsión tiene una sección transversal reducida para confinar la deformación a una zona angosta. El **esfuerzo al corte** se puede calcular a partir de la fórmula

$$\text{Esfuerzo al corte, } \tau = \frac{T}{2\pi r^2 t} \tag{2.11}$$

donde T es el torque, r el radio promedio del tubo y t el espesor del tubo en su sección reducida.

La **deformación al corte** se puede calcular a partir de la fórmula

$$\text{Deformación al corte, } \gamma = \frac{r\phi}{l} \tag{2.12}$$

donde l es la longitud del tubo sometido a torsión y ϕ el **ángulo de torsión** en radianes.

A la relación del esfuerzo cortante con respecto a la deformación cortante en el rango elástico se le conoce como **módulo de rigidez en cortante**, G (una cantidad relacionada con el módulo de elasticidad, E). El ángulo de torsión (ϕ) a la fractura en torsión de barras redondas sólidas a temperaturas elevadas también es útil para estimar la forjabilidad de los metales. Cuanto mayor sea el número de rotaciones antes de la falla, mejor será la forjabilidad (sección 14.5).

2.5 Flexión

Es difícil preparar especímenes para materiales frágiles, como cerámicos y carburos, debido a los problemas surgidos en el moldeado y maquinado de los mismos a las dimensiones apropiadas. Además, debido a su sensibilidad a los defectos superficiales y

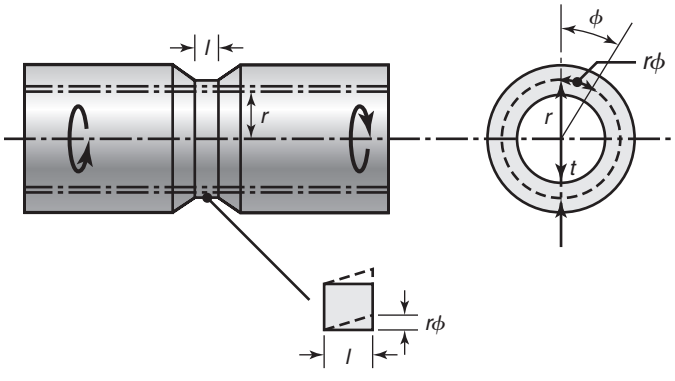


FIGURA 2.10 Espécimen característico para el ensayo de torsión; se monta entre las dos cabezas de la máquina y se tuerce. Obsérvese la deformación al corte de un elemento en la sección reducida del espécimen.

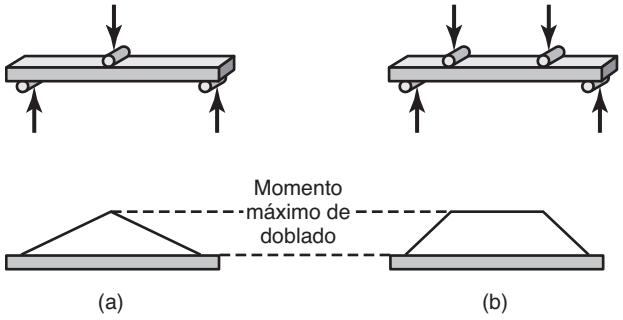


FIGURA 2.11 Dos métodos de ensayo para materiales frágiles: *(a)* doblez en tres puntos; *(b)* doblez en cuatro puntos. Las áreas sobre las vigas representan los diagramas de los momentos flectores descritos en los textos sobre mecánica de sólidos. Obsérvese la región del momento flector máximo constante en *(b)*; en contraste, el momento flector máximo ocurre sólo en el centro del espécimen en *(a)*.

melladuras, es difícil sujetar especímenes frágiles para el ensayo. De igual manera, una alineación inapropiada del espécimen de ensayo puede producir una distribución no uniforme de esfuerzos a lo largo de la sección transversal del espécimen.

El método más utilizado para materiales frágiles es el **ensayo de flexión**. Suele comprender un espécimen que tiene una sección transversal rectangular y que se soporta por sus extremos (fig. 2.11). La carga se aplica de modo vertical sobre uno o dos puntos; en consecuencia, a estas pruebas se les conoce como **doblez en tres** y **cuatro puntos**, respectivamente. Los esfuerzos longitudinales en estos especímenes son de tensión en las superficies inferiores y de compresión en las superficies superiores.

Estos esfuerzos se pueden calcular mediante las ecuaciones de la viga simple descritas en los textos de mecánica de los sólidos. El esfuerzo a la fractura en el doblez se conoce como **módulo de ruptura**, **resistencia a la flexión** o **resistencia a la ruptura transversal** (ver tabla 8.1). Obsérvese que el mayor volumen de material sometido al mismo momento de doblez en la figura 2.11b ocasiona una mayor probabilidad de que existan defectos en este volumen que en el de la figura 2.11a. En consecuencia, el ensayo de cuatro puntos da un módulo menor de ruptura que el de tres puntos.

2.6 Dureza

La dureza es una propiedad común; proporciona una indicación general de la resistencia del material al rayado y al desgaste. Más específicamente, la **dureza** suele definirse como la *resistencia a la indentación permanente*; por ejemplo, el acero es más duro que el aluminio y éste es más duro que el plomo. Sin embargo, la dureza *no* es una propiedad fundamental, porque la resistencia a la indentación depende de la forma del indentador y de la carga aplicada.

2.6.1 Ensayos de dureza

Se han desarrollado varios métodos de ensayo para medir la dureza de los materiales, mediante diferentes materiales y formas para el *indentador*. A continuación se describen los ensayos de dureza utilizadas comúnmente.

Ensayo Brinell. Presentada por J. A. Brinell en 1900, este ensayo consiste en oprimir una bola de acero o de carburo de tungsteno de 10 mm (0.4 pulgadas) de diámetro contra una superficie, con una carga de 500, 1500 o 3000 kg (fig. 2.12). El número de dureza Brinell (HB) se define como la relación de la carga P a la superficie curvada del área de indentación. Cuanto más duro sea el material por ensayar, menor será la impresión; de ahí que suela recomendarse una carga de 1500 o 3000 kg a fin de obtener impresiones suficientemente grandes para medirlas con precisión. Según las condiciones del material, se desarrolla uno de dos tipos de impresión sobre la superficie después de realizar esta prueba (fig. 2.13) o cualquiera de las otras descritas en esta sección. En general, las impresiones en los metales recocidos tienen un perfil redondo (fig. 2.13a); en los metales trabajados en frío, ese perfil es afilado (fig. 2.13b). En las figuras 2.13a y b se muestran los métodos correctos para medir el diámetro de la indentación (d).

El indentador, que tiene un módulo elástico finito, también sufre una deformación *elástica* bajo la carga aplicada; el resultado es que las mediciones de dureza pueden no ser tan precisas como se espera. Un método para minimizar este efecto es utilizar bolas de carburo de tungsteno. Debido a su alto módulo de elasticidad, se distorsionan menos que las de acero. En general, las bolas de carburo se recomiendan para números de dureza Brinell mayores a 500.

Ensayo Rockwell. Desarrollado por S. P. Rockwell en 1922, esta prueba mide la *profundidad* de penetración en lugar del diámetro de la indentación. El indentador se oprime sobre la superficie, primero con una carga menor y después con una carga mayor; la

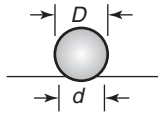
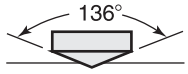
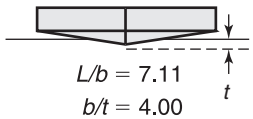
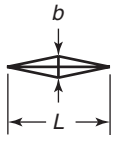
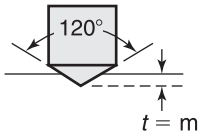
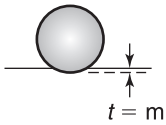
Ensayo	Indentador	Forma de la indentación: Vista lateral	Forma de la indentación: Vista superior	Carga, P	Número de dureza
Brinell	Bola de acero o de carburo de tungsteno de 10 mm			500 kg 1500 kg 3000 kg	$HB = \frac{2P}{(\pi D)\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)}$
Vickers	Pirámide de diamante			1–120 kg	$HV = \frac{1.854P}{L^2}$
Knoop	Pirámide de diamante			25 g–5 kg	$HK = \frac{14.2P}{L^2}$
Rockwell A C D	Cono de diamante			60 kg 150 kg 100 kg	HRA HRC HRD $= 100 - 500t$
B F G	Bola de acero de 1/16″ de diámetro			100 kg 60 kg 150 kg	HRB HRF HRG $= 130 - 500t$
E	Bola de acero de 1/8″ de diámetro.			100 kg	HRE

FIGURA 2.12 Características generales de los métodos de ensayo de dureza y fórmulas para calcular la dureza.

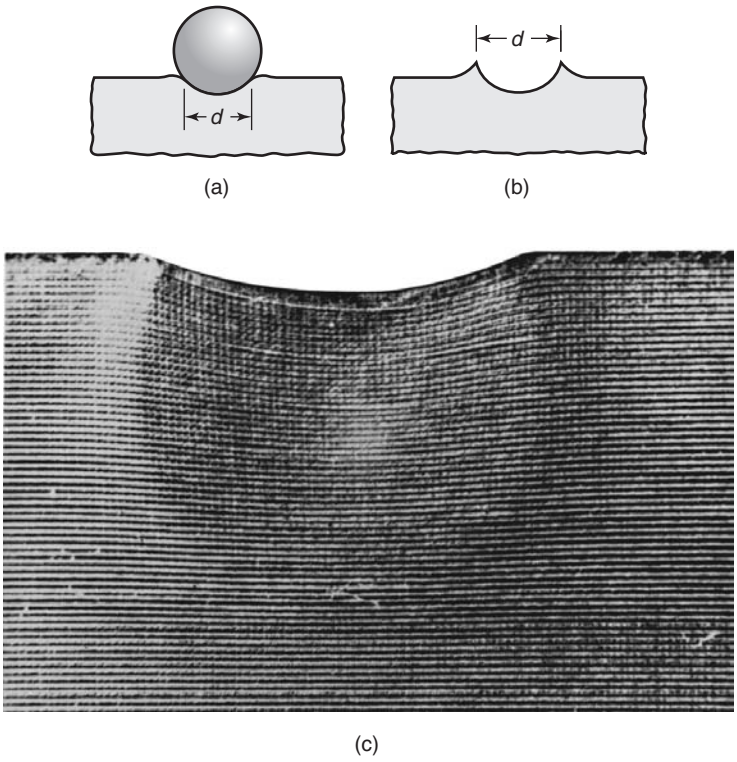


FIGURA 2.13 Geometría de la indentación en el ensayo de dureza Brinell: *(a)* metal recocido; *(b)* metal endurecido por trabajo; *(c)* deformación de acero blando con un indentador esférico. Obsérvese que la profundidad de la zona deformada permanentemente es de magnitud más grande que la profundidad de indentación. Para que un ensayo de dureza sea válido, esta zona debe desarrollarse totalmente en el material. *Fuente:* Cortesía de M. C. Shaw y C. T. Yang.

diferencia en las profundidades de penetración es una medida de la dureza del material. En la figura 2.12 se muestran algunas de las escalas de dureza Rockwell e indentadores más utilizados. Los ensayos Rockwell de **dureza superficial** también se han desarrollado mediante el mismo tipo de indentadores, pero con cargas ligeras.

Ensayo Vickers. Esta prueba, desarrollada en 1922 y conocida antes como la *prueba de dureza de la pirámide de diamante*, utiliza un indentador de diamante con forma de pirámide (fig. 2.12) y una carga que va de 1 kg a 120 kg. El número de dureza Vickers está indicado por HV. Las impresiones obtenidas suelen ser menores que 0.5 mm (0.020 pulgadas) en la diagonal. El ensayo Vickers proporciona en esencia el mismo número de dureza, independientemente de la carga, y es adecuado para probar materiales con un amplio rango de dureza, incluyendo aceros tratados térmicamente.

Ensayo Knoop. Esta prueba, desarrollada por F. Knoop en 1939, utiliza un indentador de diamante con forma de pirámide alargada (fig. 2.12) con cargas aplicadas que varían generalmente de 25 g a 5 kg. El número de dureza Knoop está indicado por HK. Debido a las cargas ligeras que se aplican, se trata de un ensayo de **microdureza**; por lo tanto, es adecuada para especímenes muy pequeños o muy delgados y para materiales frágiles, como carburos, cerámicas y vidrios.

Esta prueba también se utiliza para medir la dureza de los granos individuales y de los componentes en una aleación metálica. Generalmente, el tamaño de la indentación varía de 0.01 a 0.10 mm (0.0004 a 0.004 pulgadas); en consecuencia, es muy importante la preparación de la superficie. Debido a que el número de dureza obtenido depende de la carga aplicada, en los resultados del ensayo Knoop siempre debe indicarse qué carga se utilizó.

Escleroscopía. El escleroscopio (del griego *skleros*, que significa "duro") es un instrumento en el que se deja caer un indentador (martillo) encerrado en un tubo de vidrio sobre un espécimen desde cierta altura. La dureza se relaciona con el *rebote* del indentador: cuanto más alto es el rebote, más duro será el material. La impresión producida por un escleroscopio es muy pequeña. El instrumento es portátil y simplemente se coloca sobre la superficie de la parte. Por lo tanto, es útil para medir la dureza de objetos grandes que de otra forma no cabrían en el espacio limitado de los probadores convencionales de dureza.

Dureza Mohs. Desarrollada en 1822 por F. Mohs, esta prueba se basa en la capacidad de un material para *rayar* otro. La dureza Mohs se basa en una escala del 1 al 10, siendo 1 la medida para el talco y 10 la del diamante (la sustancia más dura conocida). Un material con un número más grande de dureza Mohs siempre raya a otro que tiene un número menor. Los metales blandos tienen una dureza Mohs de 2 a 3; los aceros endurecidos, aproximadamente 6, y el óxido de aluminio (utilizado para herramientas de corte y como abrasivo en las piedras para rectificado), 9. Aunque la escala Mohs es cualitativa y la utilizan sobre todo los mineralogistas, se correlaciona bien con la dureza Knoop.

Durómetro. La dureza de hules, plásticos y materiales no metálicos blandos y elásticos similares se mide generalmente con un instrumento llamado *durómetro* (del latín *durus*, que significa "duro"). Se oprime un indentador contra la superficie y después se aplica una carga constante con rapidez. Luego de un segundo, se mide la *profundidad* de penetración; la dureza se relaciona inversamente con la penetración. Existen dos escalas distintas para esta prueba. El tipo A tiene un indentador obtuso y una carga de 1 kg; se utiliza en materiales más blandos. El tipo D tiene un indentador más agudo y una carga de 5 kg; se utiliza en materiales más duros. Los números de dureza en estas pruebas van de 0 a 100.

Dureza en caliente. La dureza de los materiales a temperaturas elevadas (ver fig. 22.1) es importante en aplicaciones con temperaturas más elevadas, como en el uso de herramientas de corte en maquinado y el de matrices en trabajos en caliente y en operaciones de fundición. Las pruebas de dureza se pueden realizar a temperaturas elevadas mediante probadores convencionales con algunas modificaciones, por ejemplo, encerrando el espécimen y el indentador en un horno eléctrico pequeño.

2.6.2 Dureza y resistencia

Debido a que la dureza es la resistencia a la indentación *permanente*, puede semejarse a la realización de una prueba de compresión sobre un pequeño volumen de la superficie de un bloque de material (fig. 2.13c). Estudios han demostrado que (en las mismas unidades) la dureza de un metal trabajado en frío es casi tres veces su esfuerzo de fluencia (Y); para metales recocidos, es aproximadamente cinco veces Y.

Se ha establecido una relación entre la resistencia máxima a la tensión (UTS) y la dureza Brinell (HB) para los aceros, medida para una carga de 3000 kg. En unidades SI, la relación es

$$\text{UTS} = 3.5(\text{HB}) \tag{2.13}$$

donde UTS está dado en MPa. En unidades tradicionales (inglesas),

$$\text{UTS} = 500(\text{HB}) \tag{2.14}$$

donde UTS está dado en psi.

2.6.3 Procedimientos de ensayos de dureza

Para que un ensayo de dureza sea significativo y confiable, debe permitirse que se desarrolle libremente la **zona de deformación** bajo el indentador (ver fig. 2.13c). En consecuencia, es importante considerar la *ubicación* del indentador (con respecto a los *extremos* del espécimen a probar) y el *espesor* del espécimen. Generalmente, el indentador debe ubicarse cuando menos a dos diámetros del extremo del espécimen, y el espesor de éste debe ser al menos 10 veces la profundidad de penetración del marcador. Si se realizan indentaciones sucesivas sobre la misma superficie de la pieza de trabajo, deben apartarse lo suficiente para no interferir una con otra.

Además, la indentación debe ser lo suficientemente grande para dar un valor de dureza representativo de la masa del material. Si es necesario detectar variaciones de la dureza en un área pequeña, o si se va a determinar la dureza de los constituyentes individuales en una matriz o en una aleación, la indentación tiene que ser muy pequeña, como las obtenidas en los ensayos Knoop o Vickers mediante cargas ligeras. Aunque en el ensayo Brinell la *preparación de la superficie* no es crítica, es importante para el ensayo Rockwell e incluso más para los otros ensayos de dureza, debido al tamaño pequeño de las indentaciones. Es posible que se requiera pulir las superficies para permitir una medición correcta de las dimensiones de las impresiones.

Los valores obtenidos en diferentes ensayos de dureza (en distintas escalas) se pueden relacionar unos con otros y convertirse mediante la figura 2.14. Debe tenerse cuidado al utilizar estas gráficas, debido a las muchas variables en las características del material y en la forma de la indentación.

2.7 Fatiga

Diversos componentes en el equipo de manufactura, como herramientas, matrices, engranes, levas, flechas y resortes, están sujetos a cargas que fluctúan con rapidez (cíclicas o periódicas), además de las cargas estáticas. Los **esfuerzos cíclicos** pueden ser provocados por cargas mecánicas fluctuantes (como en los dientes de los engranes) o por esfuerzos térmicos (como una matriz fría que entra en contacto repetidamente con piezas de trabajo calientes). En estas condiciones, la parte falla en un nivel de esfuerzo menor que aquel en el que ocurriría la falla en condiciones estáticas de carga. Si se revisa, se verá que la falla se asocia con grietas que crecen en cada ciclo de esfuerzo y se propaga a través del material hasta que alcanzan una longitud crítica y el material se fractura. Conocido como **falla por fatiga**, este fenómeno es responsable de la mayoría de las fallas en los componentes mecánicos.

Los *métodos de prueba* de fatiga comprenden el ensayo de especímenes en diferentes estados de esfuerzo, por lo común una combinación de tensión y doblado. El ensayo se realiza en diferentes *amplitudes de esfuerzo* (S) y se registra el número de ciclos (N) que se requiere para provocar la falla total del espécimen o de la parte. La amplitud del esfuerzo se define como el esfuerzo máximo (a tensión y compresión) a que el espécimen se somete. En la figura 2.15 se muestran trazos característicos de las **curvas S-N**, las cuales se basan en una inversión completa del esfuerzo, es decir, tensión máxima, luego compresión máxima, después tensión máxima, y así sucesivamente, como la impuesta al doblar un borrador rectangular o una pieza de alambre en una dirección y en la otra. La prueba también se puede realizar sobre una flecha giratoria con una carga constante hacia abajo. Con algunos materiales, la curva S-N se vuelve horizontal a bajos esfuerzos, indicando que el material no fallará a esfuerzos por debajo de este límite. El máximo es-

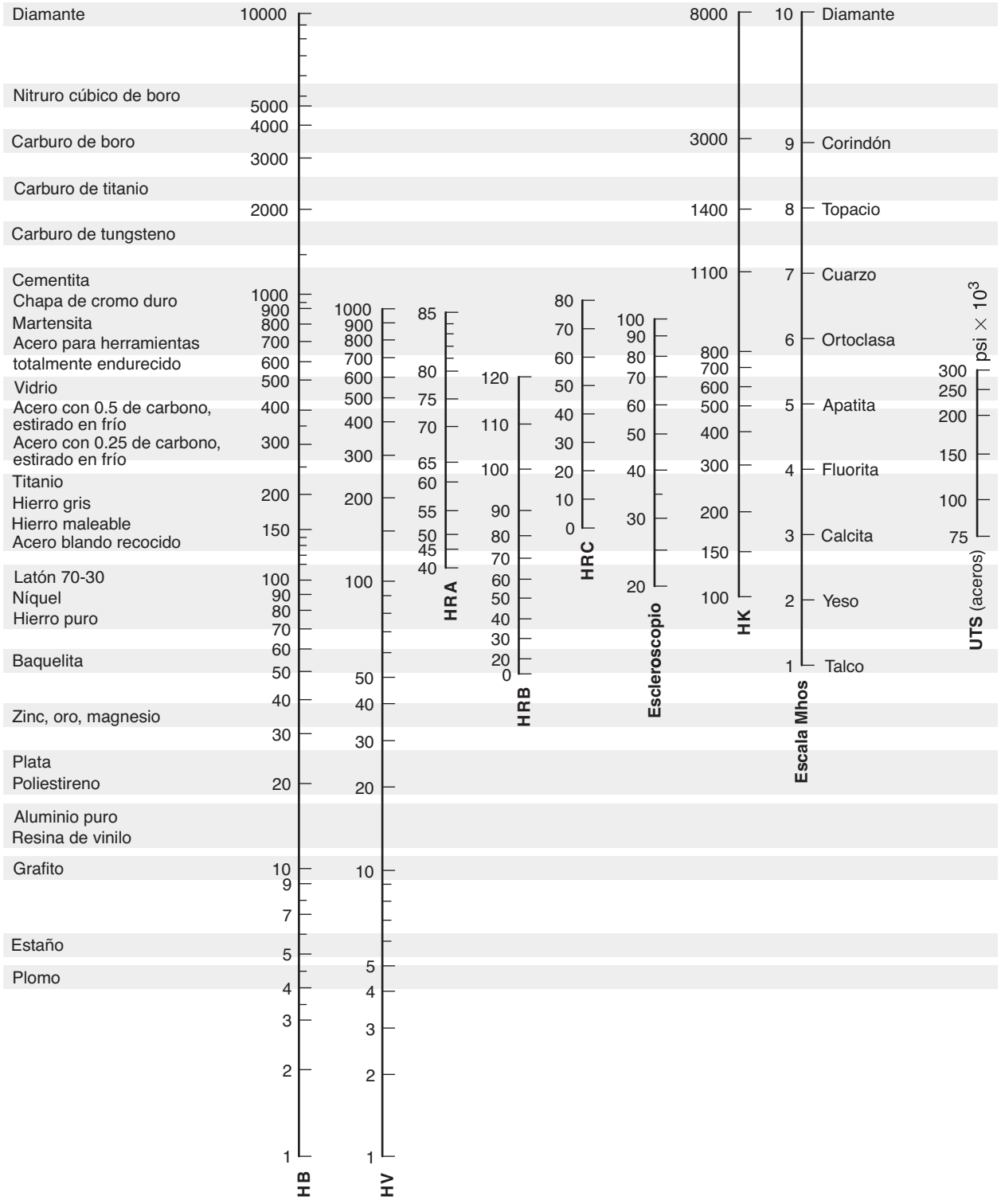


FIGURA 2.14 Tabla para convertir diferentes escalas de dureza. Debido a los muchos factores involucrados, estas conversiones son aproximadas.

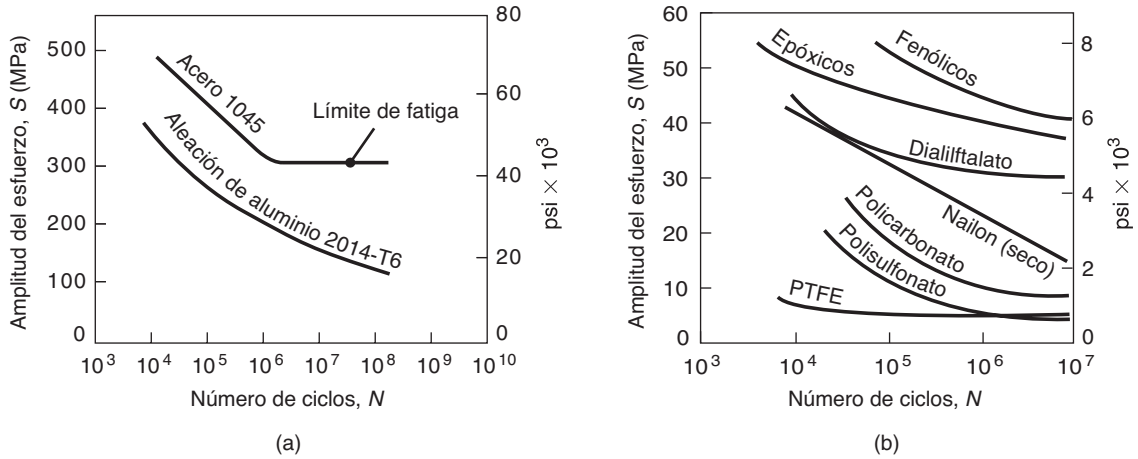


FIGURA 2.15 *(a)* Curvas características S-N para dos metales. Obsérvese que, a diferencia del acero, el aluminio no tiene un límite de fatiga. *(b)* Curvas S-N para polímeros comunes.

fuerzo al cual se puede someter el material sin falla por fatiga (independientemente del número de ciclos) se conoce como **límite de fatiga**.

Aunque muchos materiales (especialmente los aceros) tienen un límite de fatiga definido, las aleaciones de aluminio no lo tienen y la curva S-N continúa su tendencia hacia abajo. Para los metales que muestran este comportamiento, la resistencia a la fatiga se especifica a cierto número de ciclos, como 10^7. De esta manera, se puede especificar la vida útil del componente. El límite de fatiga de los metales se puede relacionar aproximadamente con su resistencia máxima a la tensión (fig. 2.16). En el caso de los aceros al carbono, el límite de fatiga es por lo general 0.4 a 0.5 veces la resistencia a la tensión, aunque los valores particulares pueden variar.

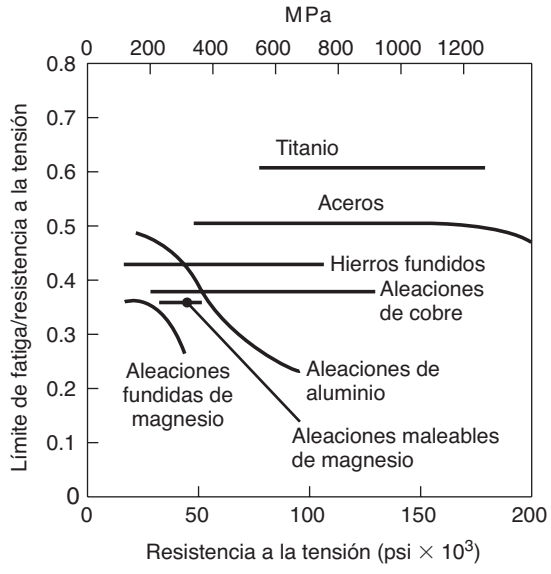


FIGURA 2.16 Proporción del límite de fatiga a resistencia a la tensión para diversos metales, como función de la resistencia a la tensión. El aluminio no tiene un límite de fatiga, por lo que las correlaciones para el aluminio se basan en un número específico de ciclos.

2.8 Termofluencia

La **termofluencia** es el alargamiento permanente de un componente por una carga estática mantenida durante un periodo. En general, el mecanismo de fluencia, o flujo plástico, a temperatura elevada en los metales se atribuye al **deslizamiento de los límites de grano**. Es un fenómeno de los metales y de algunos materiales no metálicos, como los termoplásticos y los hules, y puede ocurrir a cualquier temperatura. Por ejemplo, el plomo fluye de manera progresiva bajo una carga constante de tensión a temperatura ambiente. Sin embargo, para los metales y sus aleaciones, el flujo plástico de cierta importancia ocurre a temperaturas elevadas, comenzando a unos 200 °C (400 °F) en las aleaciones de aluminio y a unos 1500 °C (2800 °F) en las aleaciones refractarias.

La termofluencia es importante en las aplicaciones de alta temperatura, como los álabes de las turbinas de gas y componentes similares en motores de aviones y de cohetes. Las líneas de vapor de alta presión, los elementos de combustible nuclear y los componentes de hornos también están sometidos a termofluencia. La deformación por termofluencia también puede ocurrir en herramientas y matrices que se someten a esfuerzos elevados a temperaturas elevadas durante las operaciones de trabajado en caliente, como el forjado y la extrusión.

En el ensayo de termofluencia, un espécimen se sujeta a una carga de tensión constante (esto es, esfuerzos constantes de ingeniería) a cierta temperatura y midiendo los cambios de longitud a diferentes periodos. Por lo común, una curva característica de termofluencia consta de las etapas *primaria*, *secundaria* y *terciaria* (fig. 2.17). El espécimen finalmente falla al formarse un cuello y fracturarse, a lo que se llama **ruptura** o **ruptura por flujo plástico**. Como se esperaba, la velocidad de fluencia aumenta con la temperatura del espécimen y con la carga aplicada.

Es común que el diseño contra la termofluencia comprenda un conocimiento de la región secundaria (lineal) y su pendiente, ya que la velocidad de fluencia se puede determinar confiablemente sólo cuando la curva tiene una pendiente constante. En general, la resistencia a la fluencia aumenta con la temperatura de fusión de un material; este hecho sirve como lineamiento general para propósitos de diseño. Por ello, los aceros inoxidables, las superaleaciones y los metales refractarios y aleaciones se utilizan a menudo en aplicaciones donde se requiere resistencia a la termofluencia.

Relajación de esfuerzos. En la *relajación de esfuerzos*, que está estrechamente relacionada con la termofluencia, los esfuerzos resultantes de aplicar carga a un componente estructural disminuyen en magnitud durante cierto periodo, aunque las dimensiones

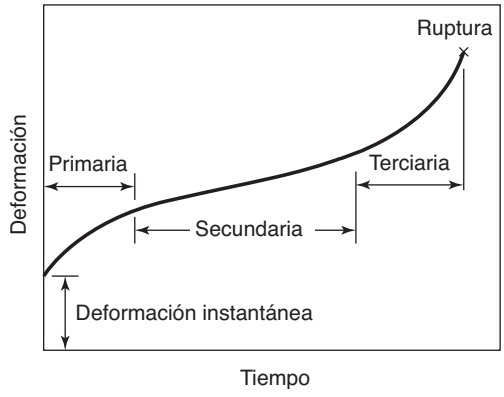


FIGURA 2.17 Esquema de una curva característica de termofluencia. El segmento lineal de la curva (secundaria) se utiliza en el diseño de componentes para una vida específica de fluencia.

del componente permanezcan constantes. Un ejemplo es la disminución del esfuerzo tensil de un alambre en tensión entre dos extremos fijos (como en un piano), en tanto que otros ejemplos incluyen remaches, pernos, alambres tensores y partes similares bajo cualquier tensión, compresión o flexión. La relajación de esfuerzos es común e importante en los termoplásticos.

2.9 Impacto

En muchas operaciones de manufactura, así como durante la vida útil de los componentes, los materiales se someten a **impacto** o **carga dinámica,** por ejemplo, en operaciones de trabajo de metales de alta velocidad, como cabeceado para la fabricación de pernos y el forjado por golpe (sección 14.8). Una *prueba de impacto* típica consiste en colocar un espécimen con una muesca en una máquina de impacto y romperlo con un péndulo oscilante.

En el ensayo de **Charpy**, el espécimen se soporta en ambos extremos (fig. 2.18a); en el ensayo **Izod**, se soporta en un extremo como una viga en voladizo (fig. 2.18b). La energía disipada al romper el espécimen se puede obtener a partir de la cantidad de oscilación del péndulo; esta energía es la **tenacidad al impacto** del material. A diferencia de las conversiones de los ensayos de dureza (fig. 2.14), aún no es posible establecer relaciones cuantitativas entre los ensayos Charpy e Izod. Las pruebas de impacto son útiles particularmente para determinar la *temperatura de transición* dúctil-frágil de los materiales (sección 2.10.1). En general, los materiales con una alta resistencia al impacto también tienen resistencia y ductilidad altas, y por lo tanto, alta tenacidad. La sensibilidad a los defectos superficiales (**sensibilidad a las muescas**) es importante, ya que disminuye de modo significativo la tenacidad al impacto, sobre todo en los metales tratados térmicamente y en las cerámicas y los vidrios.

2.10 Falla y fractura de los materiales en la manufactura y servicio

La **falla** es uno de los aspectos más importantes del comportamiento de los materiales, porque influye directamente en la selección de un material para una aplicación particular, en los métodos de manufactura y en la vida útil del componente. Debido a los muchos factores involucrados, la falla y la fractura de los materiales son un área de estudio compleja; esta sección sólo se concentra en los aspectos de la falla que tienen una importancia particular en la selección y el procesamiento de los materiales. Hay dos tipos generales de falla:

1. **Fractura:** mediante agrietamiento interno o externo. La fractura se clasifica además en dos categorías generales, como *dúctil* y *frágil* (figs. 2.19 y 2.20).

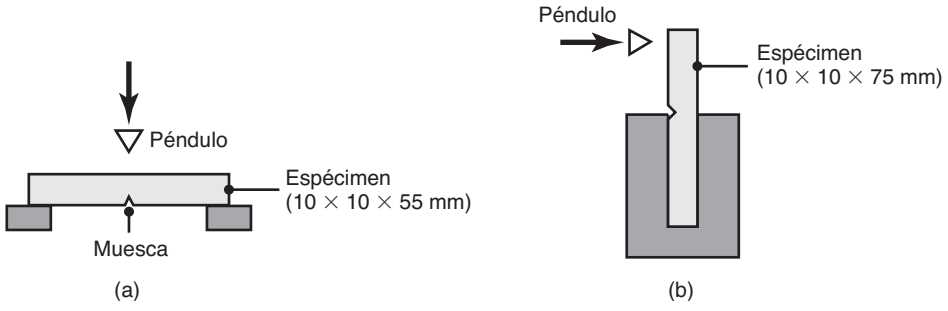


FIGURA 2.18 Especímenes de pruebas de impacto: *(a)* Charpy; *(b)* Izod.

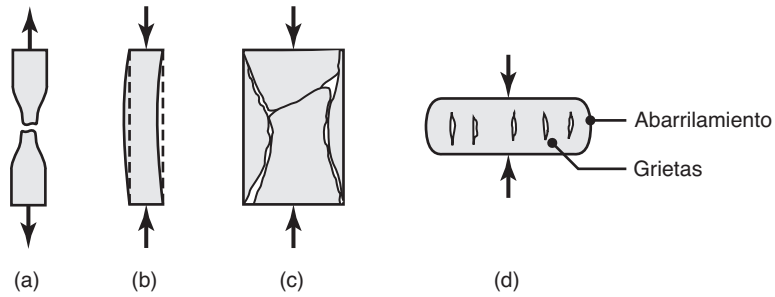


FIGURA 2.19 Esquema de tipos de fallas en materiales: *(a)* formación de cuello y fractura de materiales dúctiles; *(b)* pandeado de materiales dúctiles bajo carga de compresión; *(c)* fractura de materiales frágiles a compresión; *(d)* agrietamiento en la superficie abarrilada de los materiales dúctiles a compresión.

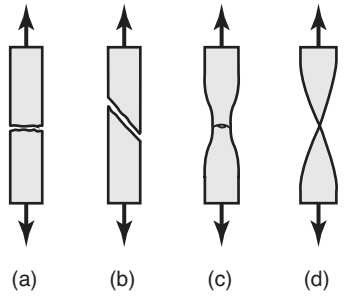


FIGURA 2.20 Esquema de los tipos de fracturas a tensión: *(a)* fractura frágil en metales policristalinos; *(b)* fractura por cortante en monocristales dúctiles, ver también figura 1.6a; *(c)* fractura dúctil de copa y cono en metales policristalinos; *(d)* fractura dúctil completa en metales policristalinos, con 100% de reducción del área.

2. **Pandeo** (fig. 2.19b): aunque generalmente se considera que la falla de los materiales es indeseable, algunos productos se diseñan de tal manera que la falla es fundamental para su función. Ejemplos característicos son:
   - Contenedores de alimentos y bebidas con cejas (o tapas completas), que se retiran jalando la lámina de metal a lo largo de una trayectoria prescrita.
   - Pernos de corte en flechas que evitan el daño de la maquinaria en caso de sobrecarga.
   - Papel o metal perforado para empaque.
   - Tapas roscadas metálicas o plásticas para botellas.

2.10.1 Fractura dúctil

La **fractura dúctil** se caracteriza por la *deformación plástica* que precede a la falla (fig. 2.19a). En un ensayo de tensión los materiales altamente dúctiles, como el oro y el plomo, pueden romperse en un punto antes de fallar (fig. 2.20d). Sin embargo, la mayoría de los metales y aleaciones se estrechan a un área finita y después fallan. La fractura dúctil ocurre en general a lo largo de planos en los que el *esfuerzo cortante es máximo*. Por lo tanto, bajo torsión, un metal dúctil se fractura a lo largo de un plano perpendicular al

eje de torsión, esto es, el plano donde el esfuerzo cortante es máximo. En contraste, la fractura por cortante simple es el resultado de un extenso deslizamiento a lo largo de los planos de deslizamiento dentro de los granos (ver fig. 1.7).

Un análisis cuidadoso de la superficie de la fractura dúctil (fig. 2.21) muestra un patrón *fibroso* con *hoyuelos*, como si se hubieran efectuado muchos pequeños ensayos de tensión sobre la superficie de fractura. La falla se inicia con la formación de *huecos* minúsculos, a menudo alrededor de pequeñas inclusiones o huecos preexistentes, que después *crecen* y *coalescen*, desarrollándose como microgrietas que crecen en tamaño y finalmente llevan a la fractura.

En un espécimen de ensayo de tensión, la fractura se inicia en el centro de la región adelgazada como resultado del crecimiento y la coalescencia de cavidades (fig. 2.22). Esta región se convierte en una grieta grande, como se puede ver en la sección media del espécimen de tensión en la figura 2.22d. Después la grieta se propaga a la periferia de la región adelgazada. Debido a su apariencia, a la superficie de fractura de un espécimen de ensayo de tensión se le llama **fractura de copa y cono**.

Efectos de las inclusiones. Debido a que se trata de sitios de nucleación para los huecos, las *inclusiones* tienen una influencia importante en la fractura dúctil y, en consecuencia, en la capacidad de trabajo de los materiales. Las inclusiones pueden consistir en

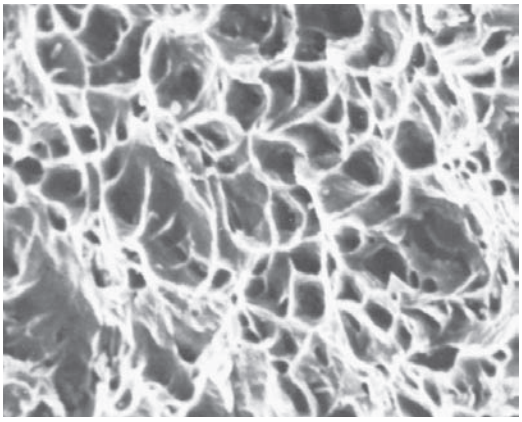


FIGURA 2.21 Superficie de una fractura dúctil en acero de bajo carbono, mostrando hoyuelos. Usualmente, la fractura se inicia en impurezas, inclusiones o huecos preexistentes (microporosidad) en el metal. *Fuente:* Cortesía de K. H. Habig y D. Klaffke.

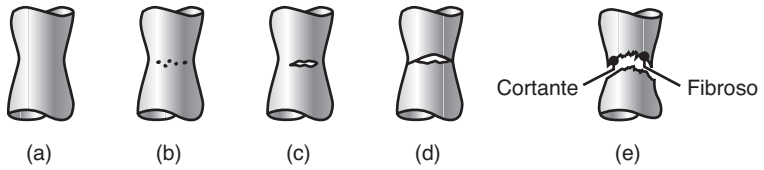


FIGURA 2.22 Secuencia de eventos durante la formación de cuello y la fractura de un espécimen de ensayo de tensión: *(a)* etapa inicial de la formación de cuello; *(b)* se comienzan a formar pequeños huecos dentro de la región adelgazada; *(c)* los huecos se coalescen, produciendo una grieta interna; *(d)* el resto de la sección transversal comienza a fallar en la periferia, por corte; *(e)* superficies finales de la fractura, conocidas como fractura de copa (superficie superior de la fractura) y cono (superficie inferior).

impurezas de diversos tipos y partículas de una segunda fase, como óxidos, carburos y sulfuros. La medida de su influencia depende de factores como su forma, dureza, distribución y fracción del volumen total: a mayor fracción de volumen de las inclusiones, menor ductilidad del material. Los huecos y la porosidad también se pueden desarrollar durante el procesamiento de los metales como los resultantes de los procesos de fundición y trabajo de los metales, por ejemplo, el estirado y la extrusión.

Dos factores afectan la formación de huecos:

a. La resistencia de la unión en la interfaz entre una inclusión y la matriz: si la unión es fuerte, existe menos tendencia a la formación de huecos durante la deformación plástica.

b. La dureza de la inclusión: si es blanda, como una de sulfuro de manganeso, se adaptará al cambio global de forma de la pieza de trabajo durante la deformación plástica. Si es dura (por ejemplo, carburos y óxidos), puede llevar a la formación de huecos (fig. 2.23). Debido a su naturaleza frágil, las inclusiones duras también se pueden romper en partículas más pequeñas durante la deformación.

La alineación de las inclusiones durante la deformación plástica lleva a la **fibración mecánica** (sección 1.5). Por lo tanto, un procesamiento posterior de tales materiales debe considerar la dirección apropiada de trabajo para una ductilidad y resistencia máximas.

Temperatura de transición. Muchos metales sufren un cambio abrupto de ductilidad y tenacidad por un estrecho rango de temperatura llamado *temperatura de transición* (fig. 2.24). Este fenómeno ocurre la mayoría de las veces en metales cúbicos centrados en el cuerpo y en algunos metales hexagonales de empaquetamiento compacto; raramente aparece en los metales cúbicos centrados en las caras. La temperatura de transición depende de factores como la composición, microestructura, tamaño de grano, acabado superficial, forma del espécimen y velocidad de deformación. La alta velocidad, los cambios abruptos en la forma de la pieza de trabajo y la presencia de muescas en la superficie elevan la temperatura de transición.

Envejecimiento por deformación. El *envejecimiento por deformación* es un fenómeno en el cual los átomos de carbono de los aceros se segregan a dislocaciones, las apuntalan y, de esta manera, aumentan la resistencia al movimiento de dislocación; el resultado es un incremento de la resistencia y una reducción de la ductilidad. En lugar de que se efectúe durante varios días a temperatura ambiente, este fenómeno puede ocurrir en unas cuantas horas a temperatura mayor; se le llama entonces **envejecimiento por deformación acelerada.** Un ejemplo en los aceros es la **fragilidad al azul**, llamada así porque ocurre en el rango de calentamiento azul en el que el acero desarrolla una película de óxido azulosa. Este fenómeno provoca una marcada disminución de la ductilidad y de la tenacidad y un aumento en la resistencia de los aceros simples al carbono y en algunos aceros aleados.

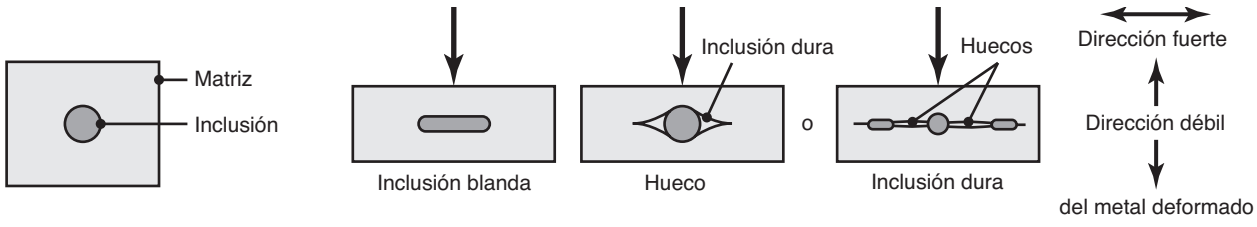


FIGURA 2.23 Esquema de la deformación de inclusiones blandas y duras y de sus efectos en la formación de huecos en la deformación plástica. Obsérvese que como no se adaptan a la deformación global de la matriz dúctil, las inclusiones pueden originar huecos internos.

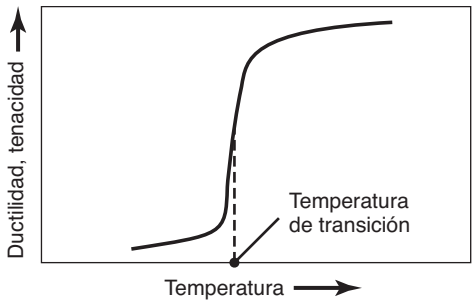


FIGURA 2.24 Esquema de la temperatura de transición en los metales.

2.10.2 Fractura frágil

La **fractura frágil** ocurre con poca o ninguna deformación plástica; bajo tensión, la fractura tiene lugar a lo largo del plano cristalográfico (**plano de clivaje**) donde el esfuerzo de tensión normal es máximo. Los metales cúbicos centrados en las caras no suelen fallar mediante fractura frágil, mientras que los metales cúbicos centrados en el cuerpo y algunos metales hexagonales de empaquetamiento compacto fallan por clivaje. En general, la temperatura baja y una velocidad de deformación alta promueven la fractura frágil. En un metal policristalino bajo tensión la superficie de fractura tiene una apariencia *granular* brillante, debido a los cambios en la dirección de los planos de fisura conforme la grieta se propaga de un grano a otro (fig. 2.25). La fractura frágil de un espécimen a compresión es más compleja y puede seguir incluso una trayectoria de 45° con respecto a la dirección de la fuerza aplicada.

Ejemplos de fractura a lo largo de un plano de clivaje son la división de la sal de mina y la delaminación de las capas de mica. Los esfuerzos de tensión normales al plano de clivaje, provocados por la tracción, inician y controlan la propagación de la fractura. Otro ejemplo es el comportamiento de materiales frágiles como el gis, hierro fundido gris y concreto. Bajo tensión, fallan de la manera que se muestra en la figura 2.20a. Bajo torsión, fallan a lo largo de un plano en un ángulo de 45° en relación con el eje de torsión (fig. 2.10), esto es, a lo largo de un plano donde el esfuerzo de tensión es máximo.

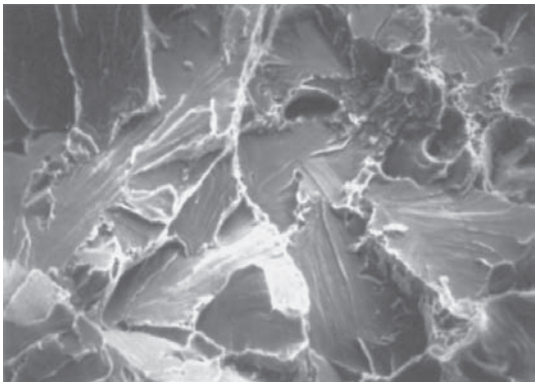


FIGURA 2.25 Superficie de fractura de un acero que falló de manera frágil. La trayectoria de la fractura es transgranular (a través de los granos). Amplificación: 200x. *Fuente*: Cortesía de B. J. Schulze y S. L. Meiley and Packer Engineering Associates, Inc.

Defectos. Un factor importante en la fractura es la presencia de *defectos*, como rayas, imperfecciones y grietas preexistentes, internas o externas. Bajo tensión, la punta aguda de una grieta se somete a altos esfuerzos, que propagan la grieta rápidamente porque el material tiene muy poca capacidad para disipar energía.

La presencia de defectos es fundamental para explicar por qué los materiales frágiles muestran tal debilidad a la tensión (cuando se compara con su resistencia a la compresión); ver tabla 8.2. La diferencia es del orden de 10 para las rocas y materiales similares, aproximadamente 5 para el vidrio y 3 para el hierro fundido gris. Bajo esfuerzos de tensión, las grietas se propagan con rapidez, provocando lo que se conoce como *falla catastrófica*.

En los metales policristalinos, las trayectorias de fractura que más se observan son **transgranulares** (*transcristalinas* o *intragranulares*); esto es, la grieta se propaga *a través del grano*. En la fractura **intergranular**, la grieta se propaga *a lo largo de los límites del grano* (fig. 2.26); en general ocurre cuando los límites de los granos son blandos, contienen una fase frágil o la fragilización por metal líquido o sólido los ha debilitado (sección 1.4).

Fractura por fatiga. Ocurre sobre todo en una naturaleza fundamentalmente frágil. Se desarrollan minúsculas grietas externas o internas en imperfecciones o defectos preexistentes en el material, las cuales se propagan durante cierto periodo y, al final, llevan a la falla total y súbita de la parte. La superficie de la fractura en fatiga suele caracterizarse por el término **marcas de playa**, debido a su apariencia (fig. 2.27). En una amplificación elevada (comúnmente más de 1000 ×), se pueden ver una serie de estrías en las superficies de fractura, donde cada marca de playa consta de varias estrías.

Mejoramiento de la resistencia a la fatiga. La resistencia a la fatiga es fuertemente influida por el método de preparación de las superficies de la parte o del espécimen (fig. 2.28). La resistencia a la fatiga de los productos manufacturados se puede mejorar en general mediante los siguientes métodos:

a. Induciendo esfuerzos residuales a compresión en las superficies, por ejemplo, mediante chorro de granalla o mediante el bruñido con rodillos.

b. Endurecimiento superficial por diferentes medios.

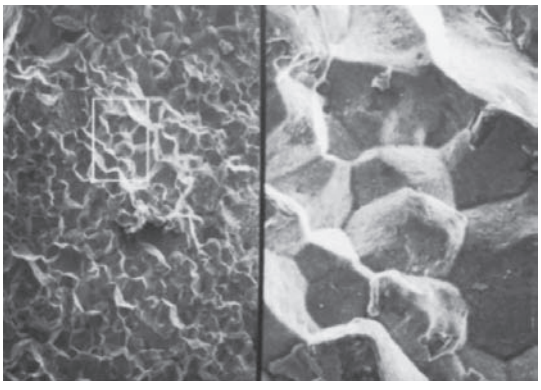


FIGURA 2.26 Fractura intergranular en dos diferentes amplificaciones. En esta microfotografía, los granos y los límites de los granos son claramente visibles. La trayectoria de la fractura se da a lo largo de los límites de los granos. Amplificación: izquierda, 100x; derecha, 500x. *Fuente:* Cortesía de B. J. Schulze and S. L. Meiley and Packer Engineering Associates, Inc.

c. Dando un acabado superficial fino, reduciendo así el efecto de las muescas y otras imperfecciones superficiales.

d. Seleccionando materiales apropiados y asegurándose de que no tienen cantidades significativas de inclusiones, huecos o impurezas.

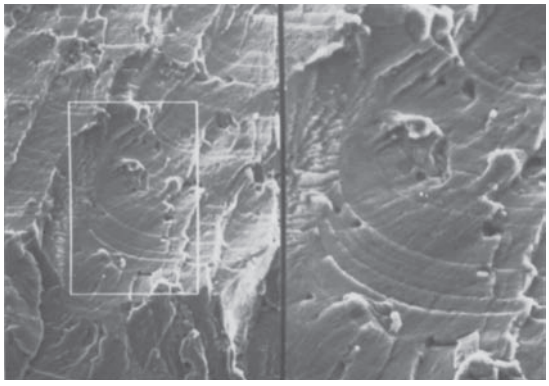


FIGURA 2.27 Superficie característica de fractura por fatiga en metales, mostrando las marcas de playa. Amplificación: izquierda, 500x; derecha, 1000x. *Fuente:* Cortesía de B. J. Schulze y S. L. Meiley and Packer Engineering Associates, Inc.

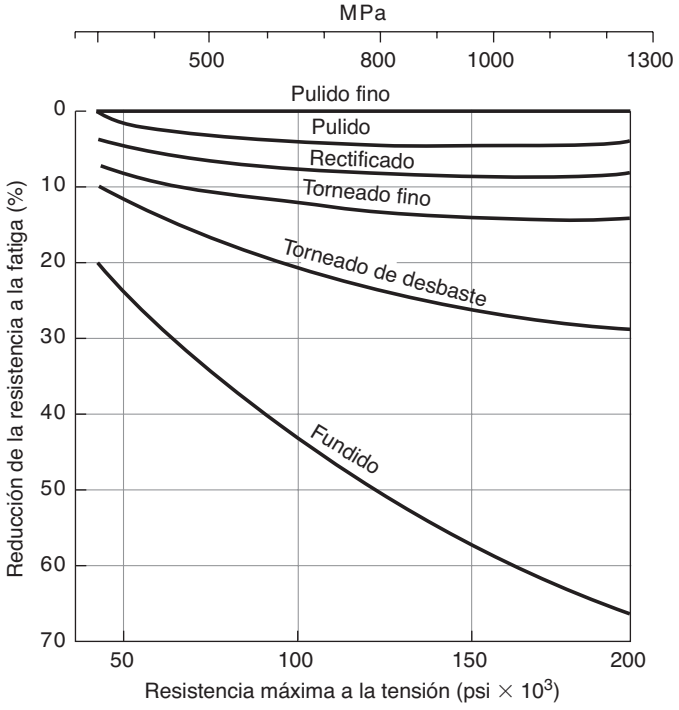


FIGURA 2.28 Reducciones en la resistencia a la fatiga de aceros fundidos sujetos a diversas operaciones de acabado superficial. Obsérvese que la reducción se vuelve mayor al aumentar la rugosidad superficial y la resistencia del acero. *Fuente:* M. R. Mitchell.

Por el contrario, los siguientes factores y procesos pueden reducir la resistencia a la fatiga: descarburación, picaduras superficiales (debido a la corrosión), que actúan como promotores de esfuerzos; fragilización por hidrógeno, galvanizado y electrodeposición.

Agrietamiento por esfuerzo-corrosión. Un metal que de otro modo sería dúctil puede fallar de manera frágil debido a un *agrietamiento por esfuerzo-corrosión* (también llamado **agrietamiento por esfuerzo** o **agrietamiento estacional**). Las partes sin defectos podrían desarrollar grietas, ya sea durante cierto periodo o poco después de haber sido manufacturadas como producto. La propagación de la grieta puede ser integranular o transgranular. La susceptibilidad de los metales al agrietamiento por esfuerzo-corrosión depende principalmente del material, la presencia y magnitud de *esfuerzos residuales de tensión* y el medio ambiente. El latón y los aceros inoxidables austeníticos se encuentran entre los metales altamente susceptibles al agrietamiento por esfuerzo; el medio ambiente incluye medios corrosivos como el agua salada y otros productos químicos. El procedimiento usual para evitar el agrietamiento por esfuerzo-corrosión consiste en *relevar esfuerzos* en la parte justo después de haberle dado forma. También se puede realizar un recocido completo, pero este tratamiento reduce la resistencia de las partes trabajadas en frío.

Fragilización por hidrógeno. La presencia de hidrógeno puede reducir la ductilidad y provocar una severa fragilización, así como fallas prematuras en muchos metales, aleaciones y materiales no metálicos. Conocido como *fragilización por hidrógeno*, este fenómeno es particularmente severo en los aceros de alta resistencia. Las posibles fuentes de hidrógeno surgen durante la fusión del metal, el decapado (remoción de óxidos superficiales mediante reacción química o electroquímica) y la electrólisis en la electrodeposición; otras fuentes son el vapor de agua de la atmósfera y los electrodos húmedos y fundentes utilizados durante la soldadura. El oxígeno también puede provocar fragilización, sobre todo en las aleaciones de cobre.

EJEMPLO 2.2 Fractura frágil de las placas de acero del casco del *R. M. S. Titanic*

Un análisis detallado del desastre del *Titanic* en 1912 indicó que la nave se hundió no tanto por haber golpeado un iceberg, sino por la debilidad estructural de sus placas de acero. Éstas habían sido fabricadas con acero de bajo grado y un alto contenido de azufre; tenían poca tenacidad (según determinó el ensayo de Charpy, sección 2.9) cuando se enfriaban (temperatura del océano Atlántico) y se sometían a una carga de impacto externo (golpear un iceberg). Con ese material, una grieta que se inicia en cualquier parte de un casco de acero soldado se puede propagar con rapidez alrededor de toda la nave y hacer que incluso un barco grande se parta en dos. Una placa de acero con mayor tenacidad hubiera reducido y hecho más lento el proceso de fractura, permitiendo así a la nave mantenerse a flote durante más tiempo e inundarse más lentamente.

Aunque el *Titanic* se fabricó con placas de acero frágil, como sabemos ahora con base en las observaciones físicas y fotográficas del barco hundido, no todas las embarcaciones de ese tiempo se construyeron con acero de bajo grado. Además, pudieron haberse empleado otras técnicas de construcción para aumentar la resistencia estructural del casco, entre ellas, mejores técnicas de soldadura (parte VI).

2.11 Esfuerzos residuales

Cuando las piezas de trabajo se someten a deformación plástica no uniforme a través de toda la parte, desarrollan **esfuerzos residuales**. Éstos permanecen en una parte después de haberle dado forma y de que se han retirado todas las fuerzas externas (aplicadas mediante herramientas y matrices); un ejemplo característico es el doblez de una barra metálica (fig. 2.29). El momento de doblez primero produce una distribución elástica lineal de es-

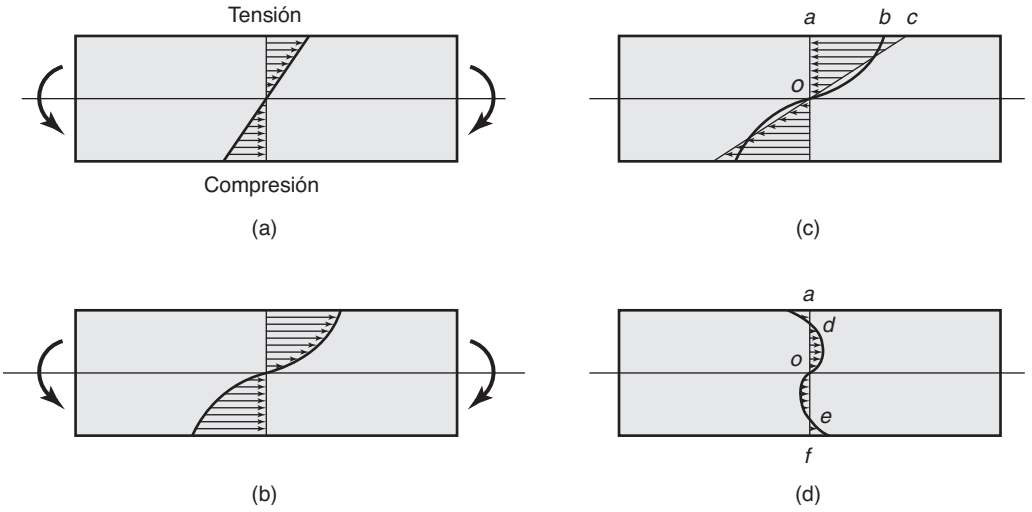


FIGURA 2.29 Esfuerzos residuales desarrollados al doblar una viga que tiene una sección transversal rectangular. Obsérvese que deben equilibrarse internamente las fuerzas y los momentos horizontales provocados por los esfuerzos residuales en la viga. Debido a una deformación no uniforme, en particular durante las operaciones de trabajado en frío de los metales, la mayoría de las partes desarrollan esfuerzos residuales.

fuerzos (fig. 2.29a). Cuando aumenta el momento externo, las fibras exteriores en la barra alcanzan un nivel de esfuerzo lo suficientemente alto para provocar fluencia. Al final, para un material característico de endurecimiento por deformación, se alcanza la distribución de esfuerzos mostrada en la figura 2.29b y la barra sufre un doblez permanente.

Retiremos ahora el momento externo de doblez de la barra. Obsérvese que esta operación es equivalente a aplicar un momento igual, pero opuesto, a la barra. En consecuencia, los momentos de las áreas *oab* y *oac* de la figura 2.29c deben ser iguales. La línea *oc* (que representa el momento de doblez opuesto) es lineal, porque todo el retiro de carga y la recuperación es *elástico* (ver fig. 2.3). La diferencia entre las dos distribuciones de esfuerzos da el patrón de esfuerzos residuales dentro de la barra, como se muestra en la figura 2.29d. Obsérvese la presencia de esfuerzos residuales de compresión en las capas *ad* y *oe*, y los esfuerzos residuales de tensión en las capas *do* y *ef*. Debido a que no existen fuerzas externas aplicadas, las fuerzas internas resultantes de estos esfuerzos residuales deben estar en equilibrio estático. Aunque este ejemplo sólo comprende esfuerzos residuales en la dirección longitudinal de la barra, en la mayoría de los casos estos esfuerzos son tridimensionales.

El equilibrio de los esfuerzos residuales en la figura 2.29d puede ser perturbado al retirar una capa de material de la parte, mediante maquinado o rectificado. La barra entonces adquirirá un nuevo radio de curvatura para equilibrar las fuerzas internas. Tales perturbaciones de los esfuerzos residuales llevan al **alabeo** de las partes (fig. 2.30). El equilibrio de los esfuerzos residuales también puede ser perturbado por el *relajamiento* de estos esfuerzos después de un periodo (ver más adelante). Los esfuerzos residuales también pueden ser provocados por *gradientes de temperatura* dentro de un cuerpo, como los que ocurren durante el enfriamiento de una fundición o una forja. La dilatación y las contracciones locales provocadas por los gradientes de temperatura dentro del material producen una deformación no uniforme, como la que se ve en el doblez permanente de una viga.

Los esfuerzos residuales de tensión en la superficie de una parte por lo general son indeseables porque reducen la resistencia a la fatiga y a la fractura de la pieza. Esto se debe a que la superficie con esfuerzos residuales de tensión no puede soportar esfuerzos adicionales producidos por fuerzas externas, tan grandes como los soportados por una

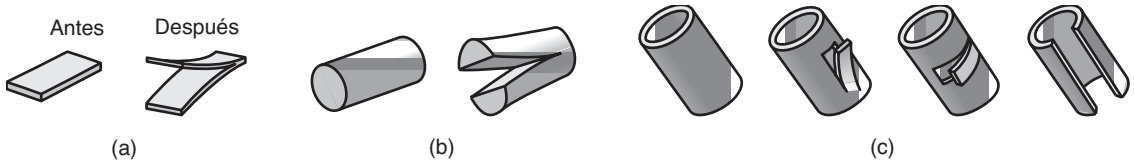


FIGURA 2.30 Distorsión de partes, con esfuerzos residuales, después del corte o ranurado: *(a)* lámina o placa plana; *(b)* varilla sólida redonda; *(c)* tubo de pared delgada.

superficie sin esfuerzos residuales. Esta reducción de la resistencia es característica, particularmente de los materiales frágiles o menos dúctiles, en los que la fractura ocurre con poca o ninguna deformación plástica precediendo a la fractura. Los esfuerzos residuales de tensión también pueden llevar, después de un periodo, al *agrietamiento por esfuerzo* o al *agrietamiento por esfuerzo- corrosión* de los productos manufacturados. En cambio, los esfuerzos residuales de compresión sobre una superficie generalmente son deseables. De hecho, para aumentar la vida a la fatiga de los componentes, se pueden impartir esfuerzos residuales de compresión a las superficies mediante técnicas como el chorro de granalla y el laminado superficial.

Reducción y eliminación de esfuerzos residuales. Los esfuerzos residuales se pueden reducir o eliminar mediante el *recocido de relevado de esfuerzos* o mediante una *deformación* posterior de la parte, como el estirado. Con tiempo suficiente, los esfuerzos residuales también se pueden reducir a temperatura ambiente (mediante el *relajamiento* de esfuerzos residuales). Es posible reducir el tiempo requerido para el relajamiento elevando la temperatura de la pieza de trabajo.

2.12 Trabajo, calor y temperatura

Casi todo el trabajo mecánico de deformación en el trabajo plástico se convierte en **calor**. Esta conversión no es total, ya que una parte de este trabajo se almacena dentro del material deformado como energía elástica. Conocida como **energía almacenada** (sección 1.6), generalmente es de 5% a 10% del total de energía aplicada; sin embargo, en algunas aleaciones puede ser tan elevada como 30%.

En un proceso simple de deformación sin fricción, y suponiendo que el trabajo se convierte totalmente en calor, la *elevación de la temperatura* (ΔT) teórica (adiabática) está dada por

$$\Delta T = \frac{u}{\rho c} \tag{2.15}$$

donde u es la **energía específica** (trabajo de deformación por unidad de volumen), ρ la densidad y c el calor específico del material. Puede verse que se asocian temperaturas más elevadas con áreas más grandes bajo la curva esfuerzo deformación y con valores menores de calor específico. Sin embargo, dichas propiedades físicas, como el calor específico y la conductividad térmica, también dependen de la temperatura, y por lo tanto, deben considerarse en los cálculos.

Se puede calcular que la elevación de temperatura para una deformación real de 1 (como la que ocurre en un espécimen de 27 mm de alto cuando se comprime a 10 mm) es la siguiente: aluminio, 75 °C (165 °F); cobre, 140 °C (285 °F); acero de bajo carbono,

280 °C (535 °F); titanio, 570 °C (1060 °F). En operaciones reales, el calor se transfiere al medio ambiente, hacia las herramientas y matrices, y a los lubricantes y refrigerantes utilizados, en su caso. Si el proceso de deformación se realiza con rapidez, las pérdidas de calor serán relativamente pequeñas en un periodo breve. Si el proceso se efectúa con lentitud, la temperatura real se elevará sólo una fracción del valor calculado.

RESUMEN

- Muchos procesos de manufactura comprenden el formado de materiales por medio de la deformación plástica. En consecuencia, las propiedades mecánicas como la resistencia (resistencia a la fluencia [*Y*] y la resistencia máxima a la tensión [UTS]), el módulo de elasticidad (*E*), la ductilidad (alargamiento total y reducción de área), la dureza y energía requerida para la deformación plástica, son factores importantes. A su vez, estas propiedades dependen en diversas medidas del material en particular y de sus condiciones, temperatura, velocidad de deformación, condiciones superficiales y del medio ambiente.
- El ensayo de tensión es la prueba más utilizada para determinar las propiedades mecánicas. Con base en ellas se construyen las curvas esfuerzo-deformación reales, que son necesarias para determinar el coeficiente de resistencia (*K*), el exponente de endurecimiento por deformación (*n*), el exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación (*m*) y la tenacidad de los materiales.
- Los ensayos de compresión están sujetas a imprecisión debido a la presencia de la fricción y el abarrilamiento resultante en el espécimen. Los ensayos de torsión se realizan en especímenes tubulares sometidos a torsión. Comúnmente se utilizan ensayos de doblez o flexión en los materiales frágiles para determinar su módulo de ruptura o la resistencia a la ruptura transversal.
- Se utilizan varios ensayos de dureza para determinar la resistencia de un material a la indentación o rayado permanente. La dureza se relaciona con la resistencia y la resistencia al desgaste del material, pero por sí mismas no constituyen una propiedad fundamental.
- Los ensayos de fatiga indican el límite de resistencia o de fatiga de los materiales, esto es, el esfuerzo máximo al que se puede someter un material sin que falle por fatiga, independientemente del número de ciclos.
- La termofluencia es el alargamiento permanente de un componente bajo una carga estática mantenida por cierto periodo. Al final el espécimen falla por ruptura (alargamiento y fractura).
- Los ensayos de impacto determinan la energía requerida para romper totalmente el espécimen, denominada tenacidad al impacto del material. Dichos ensayos también son útiles para determinar la temperatura de transición de los materiales.
- La falla y la fractura son aspectos importantes del comportamiento de un material cuando se somete a deformación en las operaciones de manufactura. La fractura dúctil se caracteriza por la deformación plástica que precede a la fractura, y requiere una cantidad considerable de energía. La fractura frágil puede ser catastrófica, porque no va precedida por la deformación plástica. Necesita mucho menos energía que la fractura dúctil. Las impurezas, inclusiones y huecos desempeñan papeles importantes en la fractura de los metales y aleaciones.
- Los esfuerzos residuales son aquellos que permanecen en la pieza de trabajo después de haber sido deformada plásticamente y luego de retirarle todas las fuerzas externas. En general, los esfuerzos residuales tensiles superficiales son indeseables; se pueden reducir o eliminar mediante recocido de relevado de esfuerzos, deformación plástica posterior o relajamiento después de cierto periodo.

TÉRMINOS CLAVE

Agrietamiento por esfuerzo-corrosión.
Alargamiento.
Carga dinámica.
Coeficiente de resistencia.
Compresión.
Deformación ingenieril.
Deformación real.
Ductilidad.
Dureza.
Efecto Bauschinger.
Ensayo del disco.
Ensayo de torsión.
Envejecimiento por deformación acelerada.
Esfuerzo de fluencia.
Esfuerzo ingenieril.
Esfuerzo real.
Esfuerzos residuales.
Exponente de endurecimiento por deformación.
Exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación.
Falla por fatiga.
Fatiga.
Fractura.
Fragilidad al azul.
Microdureza.
Módulo de elasticidad.
Módulo de rigidez cortante.
Módulo de ruptura.
Pandeo.
Reducción del área.
Relación de Poisson.
Resistencia máxima de tensión.
Ruptura.
Superplasticidad.
Temperatura de transición.
Tenacidad.
Tensión.
Termofluencia.
Velocidad de alargamiento.
Velocidad de deformación.

BIBLIOGRAFÍA

Asbhy, M. F., *Materials Selection in Mechanical Design,* 3ª. ed., Elsevier, 2005.

Asbhy, M. F. y Jones, D. R. H., *Engineering Materials*, Vol. 1, *An Introduction to Their Properties and Applications*, 2ª. ed., 1996; Vol. 2, *An Introduction to Microstructures, Processing, and Design*, 2ª. ed., 1998; Vol. 3, *Materials Failure Analysis; Case Studies and Design Implications*, Pergamon, 1993.

ASM Handbook, Vol. 8: *Mechanical Testing and Evaluation*, ASM International, 2000.

Atlas of Stress-strain curves, 2ª. ed., ASM International, 2002.

Budinsky, K. G., *Engineering Materials; Properties and Selection*, 7ª. ed., Prentice Hall, 2001.

Chandler, H., *Hardness Testing*, 2ª. ed., ASM International, 1999.

Chawla, K. K. y Majers, M. A., *Mechanical Behavior of Materials*, Prentice Hall, 1998.

Courtney, T. H., *Mechanical Behavior of Materials*, 2ª. ed., McGraw-Hill, 1999.

Davies, J. R. (ed.), *Tensile Testing*, 2ª. ed., ASM International, 2004.

Dowling, N. E., *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*, 2ª. ed., Prentice Hall, 1999.

Herzberg, R. W., *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, 4ª. ed., Wiley, 1996.

Wulpi, D. J., *Understanding How Components Fail*, 2ª. ed., ASM International, 1999.

PREGUNTAS DE REPASO

2.1 Distinga entre el esfuerzo ingenieril y el esfuerzo real.

2.2 Describa los eventos que ocurren cuando un espécimen pasa por un ensayo de tensión. Dibuje una posible curva de esfuerzo-deformación e identifique todas las regiones importantes y los puntos entre ellas. Suponga que se continúa aplicando carga hasta la fractura.

2.3 ¿Qué es la ductilidad y cómo se mide?

2.4 En la ecuación $\sigma = K\varepsilon^n$, que representa la curva esfuerzo-deformación de un material, ¿cuál es el significado del exponente n?

2.5 ¿Qué es la sensibilidad a la velocidad de deformación y cómo se mide?

2.6 ¿Qué procedimientos de ensayos se pueden utilizar para medir las propiedades de los materiales frágiles, como las cerámicas y los carburos?

2.7 Describa las diferencias entre la fractura frágil y la dúctil.

2.8 Explique la diferencia entre relajación de esfuerzos y termofluencia.

2.9 Describa la diferencia entre el comportamiento elástico y el plástico.

2.10 Explique qué es el alargamiento uniforme en el ensayo de tensión.

2.11 Describa la diferencia entre velocidad de alargamiento y velocidad de deformación. ¿Qué unidades tiene cada una?

2.12 Describa las dificultades comprendidas en la realización de un ensayo de compresión.

2.13 ¿Qué es la Ley de Hooke? ¿El módulo de Young? ¿El Relación de Poisson?

2.14 ¿Cuál es la razón de que la resistencia a la fluencia esté definida como 0.2% de desplazamiento de la resistencia?

2.15 Explique la diferencia entre la fractura transgranular y la intergranular.

PROBLEMAS CUALITATIVOS

2.16 Utilizando la misma escala para esfuerzo, la curva esfuerzo-deformación real es mayor que la curva esfuerzo-deformación ingenieril. Explique si esta condición también se mantiene para un ensayo de compresión.

2.17 Con la ayuda de un esquema simple, explique si es necesario utilizar el método de compensación del 0.2% para determinar el esfuerzo de fluencia (Y) de un material que ha sido trabajado en frío.

2.18 Explique por qué aumenta la diferencia entre la deformación ingenieril y la real al incrementarse la deformación. ¿Esta diferencia ocurre para las deformaciones a tensión y a compresión? Explique su respuesta.

2.19 Si un material no tiene un límite de fatiga (por ejemplo, el aluminio), ¿cómo estimaría su resistencia a la fatiga?

2.20 ¿Qué ensayo y escalas de dureza utilizaría para tiras de metal muy delgadas, como la lámina de aluminio? ¿Por qué?

2.21 ¿Cuál de los dos ensayos, de tensión o de compresión, requiere mayor capacidad de la máquina de ensayo y por qué?

2.22 Liste y explique brevemente las condiciones que inducen la fractura frágil en un metal que de otra manera sería dúctil.

2.23 Liste los factores que consideraría al seleccionar un ensayo de dureza y después interpretar los resultados de este ensayo.

2.24 Utilizando sólo la figura 2.6, explique por qué no se puede calcular el porcentaje de alargamiento de los materiales de la lista.

2.25 Si jala y rompe un espécimen de prueba de tensión rápidamente, ¿en dónde la temperatura sería la máxima posible y por qué?

2.26 ¿El ensayo de disco es aplicable a un material dúctil? ¿Por qué, o por qué no?

2.27 ¿Qué ensayo de dureza es adecuada para determinar la dureza de un recubrimiento cerámico delgado?

2.28 En un ensayo de dureza Brinell se encuentra que la impresión resultante es una elipse. Dé explicaciones posibles para este resultado.

2.29 Algunos recubrimientos son muy delgados, tanto que apenas miden unos cuantos nanómetros. Explique por qué incluso con el ensayo de dureza Knoop no se pueden obtener resultados razonables para dichos recubrimientos. Las investigaciones recientes han intentado utilizar diamantes altamente pulidos (con puntas de radio de unos 5 nanómetros) para indentar tales recubrimientos en microscopios de fuerza atómica. ¿Qué le preocuparía en relación con la validez de los resultados?

2.30 Seleccione un ensayo de dureza apropiada para cada uno de los siguientes materiales. Justifique su respuesta.

- **a.** Nitruro cúbico de boro
- **b.** Plomo
- **c.** Acero de 0.5% de C estirado en frío
- **d.** Diamante
- **e.** Caramelo (dulce)
- **f.** Granito

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

2.31 Un sujetador para papel está hecho de alambre de 1 mm de diámetro. Si el material original con el que se produjo el alambre es una varilla de 18 mm de diámetro, calcule las deformaciones longitudinales ingenieril y real que ha sufrido el alambre durante el proceso.

2.32 Una tira de metal tiene 250 mm de largo. Se estira en dos pasos, primero a 300 mm y después a 400 mm. Demuestre que la deformación real total es la suma de las deformaciones reales en cada paso, esto es, que las deformaciones reales son aditivas. Muestre que, en caso de las

deformaciones ingenieriles, las deformaciones no se pueden sumar para obtener la deformación total.

2.33 Identifique los dos materiales en la figura 2.6 que tienen los alargamientos uniformes menor y mayor. Calcule estas cantidades como porcentajes de las longitudes calibradas originales.

2.34 Grafique la resistencia máxima contra la rigidez de los materiales en la tabla 2.2 y elabore una gráfica tridimensional para los metales en esa tabla, donde el tercer eje es el alargamiento máximo en 50 mm.

2.35 Si retira la capa de material *ad* de la parte mostrada en la figura 2.29d, por ejemplo, mediante maquinado o rectificación, ¿en qué sentido se curvará el espécimen? (*Sugerencia:* Suponga que la parte mostrada en el dibujo *d* en la figura está compuesta de cuatro resortes horizontales sujetos por los extremos. Por lo tanto, de arriba abajo tienes resortes a compresión, tensión, compresión y tensión.)

2.36 El porcentaje de alargamiento siempre se describe en términos de la longitud calibrada original, como 50 mm o 2 pulgadas. Explique cómo varía el porcentaje de alargamiento al aumentar la longitud calibrada del espécimen de tensión. (*Sugerencia:* Recuerde que la formación de cuello es un fenómeno local, y piense en lo que pasaría al alargamiento si la longitud calibrada se vuelve muy pequeña.)

2.37 Haga un dibujo mostrando la naturaleza y distribución de los esfuerzos residuales en las figuras 2.30a y b, antes de que se corten. (*Sugerencia:* Suponga que las partes divididas no tienen esfuerzos, después fuerce estas partes para que regresen a la forma que tenían antes de cortarse).

2.38 Se le dan los valores de K y n de dos metales diferentes. ¿Es suficiente esta información para determinar cuál metal es más tenaz? De no ser así, ¿qué información adicional necesita?

2.39 Un cable está fabricado con dos trenzas de materiales diferentes, A y B, cuyas secciones transversales son las siguientes:

$$\text{Para el material } A\text{: } K = 70{,}000 \text{ psi},\quad n = 0.5,\ A_o = 0.6 \text{ pulg}^2$$
$$\text{Para el material } B\text{: } K = 25{,}000 \text{ psi},\quad n = 0.5,\ A_o = 0.3 \text{ pulg}^2$$

Calcule la máxima fuerza de tensión que puede soportar este cable antes de que inicie la formación de cuello.

2.40 Con base en la información proporcionada en la figura 2.6, calcule la resistencia máxima a la tensión (ingenieril) del cobre recocido.

2.41 En una prueba de disco realizada sobre un espécimen de 1.25 pulgadas de diámetro y 1/2 pulgada de espesor, el espécimen se fractura a un esfuerzo de 30,000 psi. ¿Cuál es la carga aplicada?

2.42 Una pieza de acero tiene una dureza de 300 HB. Calcule la resistencia a la tensión en MPa y en psi.

2.43 Un material tiene las siguientes propiedades: UTS = 50,000 psi y $n = 0.25$. Calcule su coeficiente de resistencia (K).

2.44 Un material tiene un coeficiente de resistencia $K = 100{,}000$ psi y $n = 0.2$. Si se supone que un espécimen para ensayo de tensión hecho con este material comienza la formación de cuello a una deformación real de 0.2, demuestre que la resistencia máxima a la tensión de este material es 59,340 psi.

2.45 El *módulo de resiliencia* se define como el área bajo la región elástica de la curva esfuerzo-deformación del material; tiene unidades de energía por unidad de volumen. Derive una expresión para el módulo de elasticidad en términos del esfuerzo de fluencia y el módulo de elasticidad del material.

2.46 ¿Cuál es el módulo de elasticidad de una pieza de acero trabajada fuertemente en frío, que tiene una dureza de 275 HB? ¿Y para una pieza de cobre trabajada fuertemente en frío, con una dureza de 100 HRB?

2.47 Utilizando sólo la figura 2.6, calcule la carga máxima en un ensayo de tensión de un espécimen de acero inoxidable 304 con un diámetro original de 5 mm.

2.48 Calcule los ángulos mayor y menor de la pirámide para un marcador Knoop y compárelo con los marcadores Vickers y Rockwell.

2.49 Si se requiere que un material tenga una dureza de 350 HB, ¿cuál es el diámetro de indentación esperado?

2.50 Se realizó un ensayo Rockwell A en un material y se registró una profundidad de penetración de 0.1 mm. ¿Cuál es la dureza del material? ¿Qué material dará típicamente dichos valores de dureza? Si se realizara un ensayo de dureza Brinell en este material, proporcione un estimado del diámetro de indentación si la carga utilizada es 1500 kg.

2.51 Se ensaya un material a tensión. Con una longitud calibrada de 1 pulgada, las mediciones de las deformaciones ingenieriles son 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.5 y 1.0. Grafique el esfuerzo real contra el esfuerzo ingenieril para estas lecturas.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

2.52 Liste y explique las propiedades mecánicas de *(a)* un cable de elevador, *(b)* un sujetador para papel, *(c)* un muelle de un sistema de suspensión para un camión, *(d)* una ménsula para un librero, *(e)* una cuerda para piano, *(f)* un gancho de alambre metálico para ropa, *(g)* un álabe para turbina de gas, y *(h)* una grapa.

2.53 Al hacer una hamburguesa, ¿ha observado el tipo de grietas mostradas en la figura 2.19d? ¿Qué puede hacer para evitar esas grietas? *Nota:* Haga la prueba comprimiéndola a diferentes temperaturas y observe la trayectoria de las grietas (es decir, a través de las partículas de grasa, de las partículas de carne o de su interfaz).

2.54 Con frecuencia, en las tiendas de juegos y juguetes venden materiales baratos parecidos a la arcilla. Consiga una cantidad de uno de ellos y realice los siguientes experimentos. *(a)* Dele la forma de una bola y déjela caer sobre una superficie plana. *(b)* Redondee nuevamente la bola en una mesa y ponga un libro pesado sobre ella durante cinco minutos. *(c)* Dele la forma de un cilindro largo y jálela por los extremos, primero despacio y después con rapidez. Describa sus observaciones y refiérase a las secciones específicas de este capítulo en las que cada observación particular es relevante.

2.55 Haga dibujos individuales de los mecanismos de las máquinas de prueba que, en su opinión, serían apropiados para los ensayos de tensión, torsión y compresión de especímenes a diferentes velocidades de deformación. ¿Qué modificaciones haría para incluir los efectos de la temperatura en las propiedades materiales?

2.56 En la sección 2.6.1 describimos el ensayo de dureza Mohs. Consiga piezas pequeñas de diferentes materiales metálicos y no metálicos, incluyendo piedras. Tállelas una contra las otras, observe las rayaduras y ordénelas de manera similar al sistema de numeración de Mohs.

2.57 Demuestre el relajamiento de esfuerzos estirando estrechamente cuerdas delgadas de plástico entre dos clavos y una pieza larga de madera. Jale las cuerdas con frecuencia para probar la tensión como una función del tiempo y de la temperatura. (*Nota:* modifique la temperatura colocando el conjunto en un horno ajustado a temperatura "baja").

2.58 Demuestre la tenacidad al impacto de una pieza redonda de gis utilizando primero una lima triangular para producir una ranura en V, como se muestra en la figura 2.18a, y después doblando el gis hasta romperlo.

2.59 Utilizando una banda larga de hule y un conjunto de pesas, obtenga la curva fuerza-desplazamiento para dicha banda. ¿En qué se diferencia de las curvas esfuerzo-deformación mostradas en la figura 2.5?

2.60 Encuentre o prepare algunas piezas circulares sólidas de materiales frágiles (como gis, cerámica, etc.) y sométalas al tipo de ensayo mostrado en la figura 2.9 utilizando las mordazas de una prensa de banco sencilla. Describa sus observaciones sobre cómo se fracturan los materiales. Repita las pruebas usando materiales dúctiles (como arcilla, metales blandos, etc.) y describa sus observaciones.

2.61 Produzca un accesorio sencillo para el ensayo de doblez mostrado en la figura 2.11 y pruebe barras de materiales frágiles aplicándoles cargas con pesos muertos hasta que se rompan. Verifique la afirmación de que los especímenes a la derecha de la figura se rompen antes que los de la izquierda.

2.62 Oprimiendo una bola de rodamiento sobre la superficie superior de varios materiales (como arcilla, masa, etc.), observe con una lupa la forma de la indentación, similar a las mostradas en las figuras 2.13a y b.

2.63 Incruste una bola pequeña de acero en un bloque blando de material y comprímala como se muestra en la figura 2.23a. Después córtelo cuidadosamente a lo largo del plano central y observe la deformación del material. Repita el experimento incrustando un caramelo redondo en el material, deformándolo.

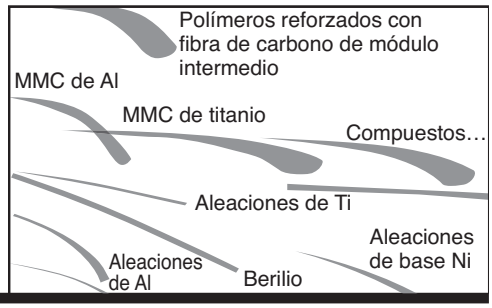
2.64 Produzca un experimento simple y realice pruebas a materiales comúnmente encontrados en una cocina, doblándolos para hacer una evaluación cualitativa de sus temperaturas de transición, como se muestra en la figura 2.24.

2.65 Localice algunas piezas sólidas metálicas y otras tubulares y córtelas como se muestra en la figura 2.30 para determinar si existe algún esfuerzo residual en las partes antes de cortarlas.

CAPÍTULO

3

Propiedades físicas de los materiales



3.1 Introducción 102
3.2 Densidad 103
3.3 Punto de fusión 106
3.4 Calor específico 106
3.5 Conductividad térmica 107
3.6 Dilatación térmica 107
3.7 Propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas 108
3.8 Resistencia a la corrosión 109

EJEMPLO:

3.1 Selección de materiales para monedas 110

Las propiedades físicas pueden tener una amplia variedad de funciones en el procesamiento, así como también en el uso de los materiales. En este capítulo describimos específicamente:

- Las propiedades térmicas, eléctricas, magnéticas y ópticas, con ejemplos de sus funciones.
- La corrosión y su importancia en la vida útil de los componentes.
- La razón por la que, con frecuencia, la combinación de las propiedades físicas es importante en el procesamiento y uso de los materiales.

3.1 Introducción

¿Por qué los cables eléctricos generalmente son de cobre? ¿Por qué el aluminio, el acero inoxidable y el cobre se utilizan tanto en los artículos de cocina? ¿Por qué sus mangos suelen fabricarse con madera o plástico, mientras que otros mangos están hechos de metal? ¿Qué tipo de material debe elegirse para los elementos calefactores de los tostadores? ¿Por qué en algunas máquinas se están reemplazando componentes metálicos por cerámicos? ¿Por qué los cuerpos metálicos de los aeroplanos están hechos en general de aluminio, y por qué algunos componentes de aviones se reemplazan de modo gradual por los fabricados con materiales compósitos, incluyendo plásticos reforzados?

Resulta evidente en estas preguntas la importancia de las **propiedades físicas** en la selección de materiales (esto es, densidad, punto de fusión, calor específico, conductividad térmica, expansión térmica, propiedades eléctricas y magnéticas, y resistencia a la oxidación y a la corrosión). Combinadas con las propiedades mecánicas, son igualmente importantes las relaciones resistencia a peso y rigidez a peso de los materiales, en particular para las estructuras de aeronaves y aeroespaciales. Equipos como la maquinaria textil y de impresión, además de las máquinas de formado y corte para operaciones de alta velocidad, requieren asimismo componentes ligeros para reducir las fuerzas inerciales y, por lo tanto, evitar la vibración excesiva. En este capítulo se analizan muchos otros ejemplos de la importancia de las propiedades físicas, presentando cada una desde el punto de vista de la selección de materiales y de la manufactura, y su importancia en relación con la vida útil del componente.

3.2 Densidad

La **densidad** de un material es su masa por unidad de volumen. Un término relacionado es la **gravedad específica,** que expresa la densidad de un material en relación con la del agua, y por lo tanto, no tiene unidades. En las tablas 3.1 y 3.2 se muestra el rango de densidades de diversos materiales a temperatura ambiente, junto con otras propiedades.

El ahorro de peso es particularmente importante en las estructuras de aeronaves y aeroespaciales, carrocerías y componentes de automóviles, así como en otros productos donde el consumo de energía y las limitaciones de potencia son factores relevantes. La

TABLA 3.1

Propiedades físicas de diversos materiales a temperatura ambiente

Material	Densidad (kg/m^3)	Punto de fusión (°C)	Calor específico (J/kg K)	Conductividad térmica (W/m K)	Coeficiente de expansión térmica (μm/m°C)
Metálicos					
Aluminio	2700	660	900	222	23.6
Aleaciones de aluminio	2630–2820	476–654	880–920	121–239	23.0–23.6
Berilio	1854	1278	1884	146	8.5
Columbio (niobio)	8580	2468	272	52	7.1
Cobre	8970	1082	385	393	16.5
Aleaciones de cobre	7470–8940	885–1260	337–435	29–234	16.5–20
Oro	19300	1063	129	317	19.3
Hierro	7860	1537	460	74	11.5
Aceros	6920–9130	1371–1532	448–502	15–52	11.7–17.3
Plomo	11350	327	130	35	29.4
Aleaciones de plomo	8850–11350	182–326	126–188	24–46	27.1–31.1
Magnesio	1745	650	1025	154	26.0
Aleaciones de magnesio	1770–1780	610–621	1046	75–138	26.0
Aleaciones de Molibdeno	10210	2610	276	142	5.1
Níquel	8910	1453	440	92	13.3
Aleaciones de níquel	7750–8850	1110–1454	381–544	12–63	12.7–18.4
Silicio	2330	1423	712	148	7.63
Plata	10500	961	235	429	19.3
Aleaciones de tantalio	16600	2996	142	54	6.5
Titanio	4510	1668	519	17	8.35
Aleaciones de titanio	4430–4700	1549–1649	502–544	8–12	8.1–9.5
Tungsten	19290	3410	138	166	4.5
No metálicos					
Cerámicos	2300–5500	—	750–950	10–17	5.5–13.5
Vidrios	2400–2700	580–1540	500–850	0.6–1.7	4.6–70
Grafito	1900–2200	—	840	5–10	7.86
Plásticos	900–2000	110–330	1000–2000	0.1–0.4	72–200
Madera	400–700	—	2400–2800	0.1–0.4	2–60

TABLA 3.2

Propiedades físicas de materiales, en orden descendente

Densidad	Punto de fusión	Calor específico	Conductividad térmica	Expansión térmica	Conductividad eléctrica
Platino	Tungsteno	Madera	Plata	Plásticos	Plata
Oro	Tantalio	Berilio	Cobre	Plomo	Cobre
Tungsteno	Molibdeno	Porcelana	Oro	Estaño	Oro
Tantalio	Culombio	Aluminio	Aluminio	Magnesio	Aluminio
Plomo	Titanio	Grafito	Magnesio	Aluminio	Magnesio
Plata	Hierro	Vidrio	Grafito	Cobre	Tungsteno
Molibdeno	Berilio	Titanio	Tungsteno	Acero	Berilio
Cobre	Cobre	Hierro	Berilio	Oro	Acero
Acero	Oro	Cobre	Zinc	Cerámicos	Estaño
Titanio	Plata	Molibdeno	Acero	Vidrio	Grafito
Aluminio	Aluminio	Tungsteno	Tantalio	Tungsteno	Cerámicos
Berilio	Magnesio	Plomo	Cerámicos		Vidrio
Vidrio	Plomo		Titanio		Plásticos
Magnesio	Estaño		Vidrio		Cuarzo
Plásticos	Plásticos		Plásticos		

sustitución de materiales en aras del ahorro de peso y la economía es un factor principal en el diseño de equipo y maquinaria avanzada además de productos de consumo como los automóviles.

La densidad desempeña un papel importante en la **relación resistencia a peso** (**resistencia específica**) y en la **relación rigidez a peso** (**rigidez específica**) de materiales y estructuras. En la tabla 3.3 se muestra la relación de esfuerzo máximo a la fluencia (cadencia) con respecto a la densidad de varias aleaciones metálicas. Obsérvese que el titanio y el aluminio están en la parte superior de la lista; en consecuencia, y como se describe en el capítulo 6, se encuentran entre los metales más utilizados para aplicaciones en aeronaves y aeroespaciales.

TABLA 3.3

Relación de esfuerzo máximo a la fluencia con respecto a la densidad de algunos metales

Aleación	Esfuerzo máximo a la fluencia/ densidad (pulg $\times 10^3$)
Titanio	1250
Aluminio	800
Aceros	750
Magnesio	675
Níquel	550
Cobre	500
Tantalio	375
Molibdeno	215
Plomo	5

En la figura 3.l se muestra el rango de resistencia y de rigidez específicas a la temperatura ambiente para varios materiales metálicos y no metálicos. Obsérvense las posiciones de los materiales compósitos, comparadas con las de los metales, en relación con estas propiedades; tales ventajas han hecho que los compósitos se conviertan en uno de los materiales más importantes (ver capítulo 9). La resistencia y la rigidez específicas son factores igualmente importantes a temperaturas elevadas, ya que así funcionan ciertos componentes y sistemas, como los motores de automóvil y de propulsión a chorro y las turbinas de gas. En la figura 3.2 se dan rangos típicos para varios materiales.

La densidad es un factor que debe tomarse en cuenta al seleccionar materiales para equipos de alta velocidad; es el caso del magnesio en la maquinaría para impresión y textil, la cual tiene muchos componentes que suelen operar a velocidades muy altas. Para obtener tiempos de exposición de 1/4000 s sin sacrificar precisión, los obturadores de algunas cámaras fotográficas de 35 mm de alta calidad se fabrican con titanio. La baja masa de los componentes en estas operaciones de alta velocidad reduce las fuerzas inerciales que de otra manera podrían provocar vibraciones, imprecisiones, e incluso (después de algún tiempo) la falla de las partes. Debido a su baja densidad, los cerámicos (capítulo 8) se utilizan para componentes en máquinas automatizadas de alta velocidad y en las máquinas herramienta. En cambio, existen aplicaciones donde el peso es deseable. Ejemplos de ello son los contrapesos en diversos mecanismos (donde se usa plomo o acero), volantes y componentes de relojes pulsera automáticos que utilizan los efectos de la inercia de una masa cuando se mueve la muñeca (utilizando materiales de alta densidad, como el tungsteno).

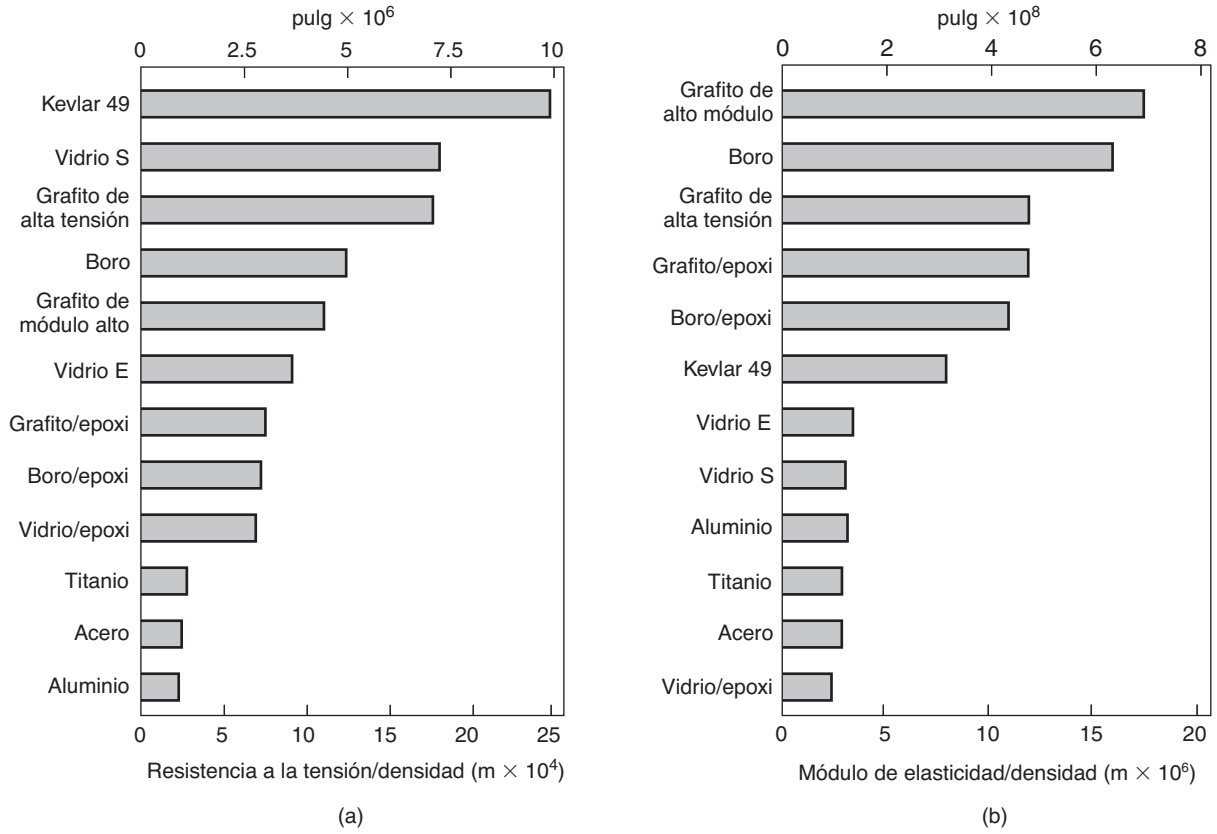


FIGURA 3.1 Resistencia específica (resistencia a la tensión/densidad) y rigidez específica (módulo elástico/densidad) para diversos materiales a temperatura ambiente.

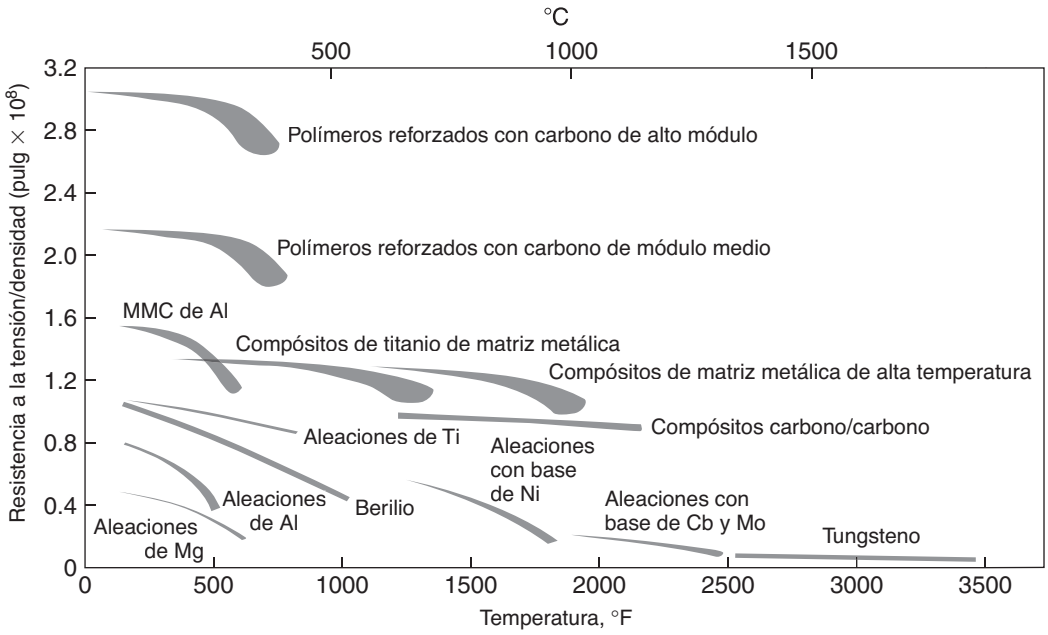


FIGURA 3.2 Resistencia específica (resistencia a la tensión/densidad) para varios materiales en función de la temperatura. Obsérvese el rango de temperatura útil para estos materiales y los altos valores de los materiales compósitos.

3.3 Punto de fusión

El **punto de fusión** de un metal depende de la energía requerida para separar sus átomos. Como se muestra en la tabla 3.1, la temperatura de fusión de una aleación metálica puede tener un amplio rango (según su composición) y es diferente de la del metal puro, que tiene un punto definido de fusión. El rango de temperatura dentro del cual un componente o una estructura se diseña para funcionar es un factor que debe considerarse en la selección de materiales. Por ejemplo, los plásticos tienen el rango útil de temperatura más bajo, mientras que el grafito y las aleaciones de metales refractarios poseen el rango útil más elevado.

El punto de fusión de un metal tiene varios efectos indirectos en las operaciones de manufactura. Debido a que la temperatura de recristalización de un metal se relaciona con su punto de fusión (sección 1.6), operaciones como el recocido, el tratamiento térmico y el trabajo en caliente (parte III) requieren el conocimiento de los puntos de fusión de los materiales involucrados. Estos factores también son importantes en la selección de materiales para herramientas y matrices. Otra influencia básica del punto de fusión se da al elegir el equipo y la práctica de fusión empleados en las operaciones de fundición (parte II). Cuanto mayor sea el punto de fusión del material, más difícil resultará la operación. En el proceso de maquinado por descarga eléctrica (sección 27.5), los puntos de fusión de los metales se relacionan con la velocidad de remoción de material y con el desgaste del electrodo.

3.4 Calor específico

El **calor específico** de un material es la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de la unidad de masa. Los elementos de aleación tienen un efecto relativamente

menor en el calor específico de los metales. La elevación de la temperatura en una pieza de trabajo, resultante de las operaciones de formado o de maquinado (partes III y IV, respectivamente), es una función del trabajo realizado y del calor específico del material de dicha pieza (sección 2.12). Si la elevación es excesiva, puede disminuir la calidad del producto, afectando adversamente su acabado superficial y su precisión dimensional; provocar desgaste excesivo de las herramientas y matrices, así como cambios metalúrgicos indeseables en el material.

3.5 Conductividad térmica

La **conductividad térmica** indica la velocidad a la que fluye el calor dentro y a través de un material. Los materiales unidos por enlaces metálicos (metales) poseen en general alta conductividad térmica, mientras que los materiales unidos por enlaces iónicos o covalentes (cerámicos y plásticos) tienen una conductividad pobre (tabla 3.2). Debido a la gran diferencia de sus conductividades térmicas internas, es posible que los elementos de aleación tengan un efecto significativo en la conductividad térmica de las aleaciones, como se puede ver al comparar los metales con sus aleaciones en la tabla 3.1.

Cuando el calor se genera por deformación plástica o fricción, debe retirársele a una velocidad lo suficientemente alta para evitar una severa elevación de la temperatura. Por ejemplo, la principal dificultad que se experimenta al maquinar titanio se debe a su muy baja conductividad térmica. Esto último también puede provocar altos gradientes térmicos y, de esta manera, causar deformación no homogénea de las piezas en los procesos de trabajo de los metales.

3.6 Dilatación térmica

La **dilatación térmica** de los materiales puede tener varios efectos significativos, particularmente la expansión o contracción relativa de diferentes materiales en ensambles como los componentes electrónicos y de computadoras, sellos vidrio-metal, soportes en motores de propulsión y partes móviles en maquinaria que exige ciertos espacios para funcionar apropiadamente. Por ejemplo, el uso de componentes cerámicos en motores de hierro fundido también requiere tomar en cuenta sus dilataciones térmicas relativas. Los coeficientes típicos de dilatación térmica son del orden de 10×10^{-6} por °C para los aceros, 24×10^{-6} por °C para el aluminio, y más de 200×10^{-6} por °C para los termoplásticos. (Ver también *Invar* posteriormente en esta sección). En general, el coeficiente de dilatación térmica es inversamente proporcional al punto de fusión del material. Los elementos de aleación tienen un efecto menor en la dilatación térmica de los metales.

Los *ajustes por contracción* utilizan la dilatación térmica y la contracción. Por ejemplo, en una flecha se va a instalar una parte, como una brida o un brazo de palanca con un orificio dentro. Primero se calienta y luego se desliza sobre una flecha o husillo que se encuentra a la temperatura ambiente. Cuando se le deja enfriar, la parte se contrae y el ensamble se convierte efectivamente en un componente integral. La dilatación térmica, junto con la conductividad térmica, desempeña el papel más importante en la generación de **esfuerzos térmicos** (debido a los *gradientes de temperatura*) en los componentes manufacturados, en herramientas y matrices, y en los moldes para operaciones de fundición. Esto es importante, por ejemplo, en una operación de forja, durante la cual las piezas de trabajado en caliente se colocan de manera repetida sobre una matriz relativamente fría, cuyas superficies las someten así a ciclos térmicos. Para reducir los esfuerzos térmicos, es deseable una combinación de alta conductividad térmica y baja dilatación térmica. Dichos esfuerzos también pueden ser provocados por la **anisotropía de la dilatación térmica** (esto es, el material se expande de manera diferente en distintas direcciones), que se observa generalmente en los metales hexagonales compactos, los cerámicos y los materiales compósitos.

La dilatación térmica y la contracción pueden llevar al agrietamiento, alabeo o aflojamiento de los componentes en la estructura durante su vida útil, y ocasionar el agrietamiento de partes cerámicas, herramientas y matrices fabricadas con materiales relativamente frágiles. La **fatiga térmica** es el resultado de los ciclos térmicos y causa varias grietas superficiales, sobre todo en herramientas y matrices para fundición y en operaciones de trabajo de los metales (*agrietamiento por calor*). El **choque térmico** es el término usado en general para describir el desarrollo de grietas después de un solo ciclo térmico.

Para remediar algunos de los problemas causados por la dilatación térmica, se ha desarrollado una familia de aleaciones hierro-níquel con muy bajos coeficientes de dilatación denominadas **aleaciones de baja** dilatación. Con frecuencia, a esa característica se le conoce como **efecto Invar** (debido al metal *Invar*). El coeficiente térmico de dilatación en general se encuentra entre 2×10^{-6} y 9×10^{-6} por °C. Las composiciones típicas son 64% de Fe-36% de Ni para el Invar y 54% de Fe-28% de Ni-18% de Co para el *Kovar*. Estas aleaciones también tienen buena resistencia a la fatiga térmica y buena ductilidad. El resultado es que se les pueden dar diferentes formas con facilidad. Las aplicaciones incluyen *(a)* tiras bimetálicas, que constan de una aleación de baja dilatación unida metalúrgicamente a una aleación de alta dilatación (la tira se dobla cuando se somete a cambios de temperatura), y *(b)* sellos vidrio-metal de alta calidad, donde se hacen coincidir las dilataciones térmicas.

3.7 Propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas

La **conductividad eléctrica** y las propiedades *dieléctricas* de los materiales son importantes no sólo en el equipo y la maquinaria eléctrica, sino también en procesos de manufactura como el formado de láminas metálicas por pulso magnético (sección 16.11), el maquinado por descarga eléctrica y la rectificación electroquímica de materiales duros y frágiles (capítulo 27). Las unidades de conductividad eléctrica son mho/m o mho/ft, donde *mho* es el inverso de *ohm*, la unidad de resistencia eléctrica. La influencia del tipo de unión atómica en la conductividad eléctrica de los materiales es la misma que para la conductividad térmica. Los elementos de aleación tienen un efecto importante en la conductividad eléctrica de los metales. Cuanto mayor sea la conductividad del elemento de aleación, mayor será la conductividad eléctrica de la aleación.

Resistencia dieléctrica. La *resistencia dieléctrica* de un material es su resistividad a la corriente eléctrica directa. Esta propiedad se define como el voltaje requerido por unidad de distancia para que ocurra una descarga eléctrica, y tiene las unidades V/m o V/ft.

Conductores. Los materiales con alta conductividad eléctrica, como los metales, generalmente se conocen como *conductores*. La **resistividad eléctrica** es el inverso de la conductividad eléctrica. A los materiales con alta resistividad eléctrica se les conoce como **dieléctricos** o **aislantes**.

Superconductores. La *superconductividad* es el fenómeno de resistividad eléctrica cercana a cero que ocurre en algunos metales y aleaciones debajo de una temperatura crítica. Con frecuencia, las temperaturas involucradas se encuentran cerca del cero absoluto (0 K, −273 °C o −460 °F). La temperatura más alta a la que se ha exhibido la superconductividad es de 150 K (−123 °C, −190 °F), pero continúan lográndose avances en la superconductividad a alta temperatura. Estos desarrollos indican que la eficiencia de tales componentes eléctricos, como grandes magnetos de alta potencia, líneas de potencia de alto voltaje, y componentes electrónicos y para computadoras, se puede mejorar notoriamente.

Semiconductores. Las propiedades eléctricas de los *semiconductores* (como el silicio monocristalino, germanio y arseniuro de galio) son muy sensibles a la temperatura y a la presencia y el tipo de impurezas minúsculas. Por lo tanto, si se controlan la concentración y el tipo de impurezas (**dopantes**), como el fósforo y el boro en el silicio, se puede controlar la conductividad eléctrica. Esta propiedad se emplea en los dispositivos semiconductores (de estado sólido) utilizados ampliamente en los circuitos electrónicos miniaturizados (capítulo 28). Son muy compactos, muy eficientes y relativamente económicos; además, consumen poca potencia y no requieren tiempo de calentamiento para funcionar.

Ferromagnetismo y ferrimagnetismo. El *ferromagnetismo* es un fenómeno caracterizado por la alta permeabilidad y magnetización permanente debidas a la alineación de los átomos de hierro, níquel y cobalto en dominios. Es importante en aplicaciones como motores, generadores y transformadores eléctricos y en dispositivos de microondas. El *ferrimagnetismo* es una gran magnetización permanente que exhiben algunos materiales cerámicos, como las ferritas cúbicas.

Efecto piezoeléctrico. El *efecto piezoeléctrico* (del griego *piezo*, que significa "oprimir") aparece en algunos materiales, como los cristales de cuarzo y algunos cerámicos, donde existe una interacción reversible entre una deformación elástica y un campo eléctrico. Esta propiedad se utiliza para fabricar transductores, dispositivos que convierten la deformación de una fuerza externa en energía eléctrica. Las aplicaciones típicas son transductores de fuerza o de presión, calibradores de deformación, sensores (detectores), detectores de sonar y micrófonos.

Magnetostricción. Al fenómeno de expansión o contracción de un material cuando se somete a un campo magnético se le llama *magnetostricción*. Materiales como el níquel puro y algunas aleaciones hierro-níquel muestran este comportamiento. La magnetostricción es el principio en que se basa el equipo de maquinado ultrasónico (sección 26.6).

Propiedades ópticas. Entre otras propiedades, el color y la opacidad son importantes, particularmente en los polímeros y vidrios. Ambas se describen en las secciones 7.2.2 y 8.4.3, respectivamente.

3.8 Resistencia a la corrosión

Todos los metales, cerámicos y plásticos están sujetos a formas de corrosión. La propia palabra **corrosión** se refiere usualmente al deterioro de los metales y los cerámicos, en tanto que fenómenos similares en los plásticos suelen denominarse **degradación**. La corrosión no sólo lleva al deterioro de la superficie de los componentes y estructuras (puentes y embarcaciones), sino que también reduce su resistencia e integridad estructural. El costo directo de la corrosión sólo en Estados Unidos se ha estimado en 275 mil millones de dólares anuales, que son aproximadamente 3% del producto interno bruto. Los costos indirectos de la corrosión se estiman en el doble de esta cantidad.

La *resistencia a la corrosión* es un aspecto importante en la selección de materiales para las industrias química, alimentaria y del petróleo, así como en las operaciones de manufactura. Además de las posibles reacciones químicas de los elementos y compuestos presentes, causan inquietud la oxidación del medio ambiente y la corrosión de los componentes de las estructuras, sobre todo a temperaturas elevadas, y en automóviles y otros vehículos de transporte.

La resistencia a la corrosión depende de la composición del material y del medio ambiente en particular. Los medios corrosivos pueden ser productos químicos (ácidos, álcalis y sales), el entorno (oxígeno, humedad, contaminación y lluvia ácida) y el agua (dulce o salada). En general, los metales no ferrosos, los aceros inoxidables y los materiales no metálicos tienen una alta resistencia a la corrosión, en tanto que los aceros y los

hierros fundidos suelen tener una resistencia pobre y deben protegerse mediante diversos recubrimientos y tratamientos superficiales.

La corrosión puede ocurrir en toda una superficie o ser *localizada*: lo que se llama **picadura.** (La picadura es un término que también se aplica al desgaste por fatiga o a la falla de los engranes o en el forjado; ver sección 31.5). La corrosión también puede ocurrir a lo largo de los límites de grano de los metales, como la **corrosión integranular,** y en la interfaz de uniones atornilladas o remachadas como la **corrosión por grietas** o **fisuras.**

Dos metales diferentes pueden formar una **celda galvánica** (llamada así en honor de L. Galvani, 1737-1798) —esto es, dos electrodos en un electrolito, dentro de un ambiente corrosivo, incluyendo humedad—, y provocar **corrosión galvánica.** Las aleaciones de dos fases (capítulo 4) son más susceptibles a la corrosión galvánica (debido a la separación física de los dos metales involucrados) que las aleaciones de una sola fase o los metales puros; el resultado es que el tratamiento térmico puede tener una influencia significativa en la resistencia a la corrosión.

El **agrietamiento por esfuerzo-corrosión** (sección 2.10.2) es un ejemplo del efecto de un ambiente corrosivo en la integridad de un producto que, al ser manufacturado, tiene esfuerzos residuales en él. Igualmente, los metales trabajados en frío son propensos a tener dichos esfuerzos, de ahí que sean más susceptibles a la corrosión que los metales trabajados en caliente o recocidos.

Los materiales para herramientas y matrices también pueden ser susceptibles al ataque químico de lubricantes y refrigerantes; la reacción química altera su acabado superficial e influye adversamente en la operación del metal. Ejemplos de ello son las herramientas de carburo y las matrices que tienen cobalto como aglutinante (sección 22.4), en las que el cobalto es atacado por los elementos en los fluidos de trabajo de los metales (**lixiviación selectiva**). Así, la compatibilidad de los materiales de la herramienta, la matriz y la pieza con el fluido de trabajo del metal en las condiciones reales de operación constituye un factor que debe considerarse al seleccionar materiales.

No sólo las reacciones químicas deben considerarse productoras de efectos adversos. Los procesos de maquinado avanzado, como el maquinado químico y electroquímico, se basan de hecho en reacciones controladas. Estos procesos pueden retirar material mediante la acción química, de manera semejante al ataque químico de muestras metalúrgicas. La utilidad de cierto nivel de **oxidación** se muestra en la resistencia a la corrosión del aluminio, el titanio y el acero inoxidable. El aluminio desarrolla una película de óxido duro de aluminio (Al_2O_3) delgada (a veces de unas cuantas capas atómicas), fuerte y adherente, que protege mejor la superficie de la corrosión ambiental. El titanio desarrolla una película de óxido de titanio (TiO_2). Un fenómeno similar ocurre en los aceros inoxidables, los cuales (debido al cromo presente en la aleación) desarrollan una película protectora sobre su superficie. A estos procesos se les conoce como **pasivación.** Cuando se raya la película protectora y se expone la superficie que se encuentra debajo, comienza a formarse una nueva película de óxido.

EJEMPLO 3.1 Selección de materiales para monedas

Existen cinco criterios generales en la selección de materiales para monedas.

1. Los *factores subjetivos* incluyen la *apariencia* de la moneda: su color, peso y tintineo (el sonido que hacen cuando se golpean). En este criterio también se incluye la *sensación* de la moneda. Es difícil describir este término porque combina muchos factores humanos. Tiene un efecto similar a la sensación que provoca una pieza fina de madera, la piedra pulida o el cuero fino.
2. *Vida esperada de la moneda*; su duración refleja la resistencia a la corrosión y al desgaste mientras se encuentra en circulación. Estos dos factores determinan básicamente la posibilidad de que la superficie impresa de la moneda permanezca identificable y su capacidad para retener el lustre original.

3. La *manufactura de la moneda* incluye factores como la capacidad de formado de los materiales considerados, la vida de las matrices (o dados) utilizadas en la acuñación (sección 14.4) y la capacidad de los materiales y procesos para evitar la falsificación.
4. *Idoneidad de la moneda para ser utilizada* en dispositivos como las máquinas expendedoras, torniquetes y teléfonos públicos. Estas máquinas están equipadas generalmente con dispositivos de detección que prueban las monedas: primero, el diámetro apropiado, espesor y condiciones superficiales; y segundo, su conductividad eléctrica y densidad. Si la moneda falla en estas pruebas, se rechaza.
5. Las consideraciones finales son el *costo* de las materias primas, su procesamiento y si existe un *suministro* suficiente de los materiales para las monedas.

RESUMEN

- Las propiedades físicas y químicas influyen de manera importante en la selección de materiales, en la manufactura y en la vida útil de los componentes. Estas propiedades y otras características materiales también deben ser consideradas debido a sus efectos en el diseño del producto, requisitos de servicio y compatibilidad con otros materiales, incluyendo herramientas, matrices y piezas de trabajo.
- La conductividad y la expansión térmicas son factores importantes en el desarrollo de los esfuerzos térmicos y de la fatiga y en choques térmicos, efectos esenciales en la vida de las herramientas y matrices durante las operaciones de manufactura. Las aleaciones de baja expansión (como el Invar y el Kovar) tienen aplicaciones únicas.
- Las propiedades eléctricas y químicas son importantes en muchos procesos de maquinado avanzado, como el maquinado por descarga eléctrica, químico y electroquímico.
- Las reacciones químicas, incluyendo la oxidación y la corrosión, deben considerarse al seleccionar materiales, diseño y manufactura, así como la vida útil de los componentes. La pasivación y el agrietamiento por esfuerzo de corrosión son dos fenómenos significativos.
- Algunas propiedades físicas se utilizan en los procesos de manufactura y en su control, como el efecto de la magnetostricción (para el maquinado ultrasónico de metales y materiales no metálicos) y el efecto piezoeléctrico (para transductores de fuerza y otros diversos detectores).

TÉRMINOS CLAVE

Agrietamiento por calor
Agrietamiento por esfuerzo de corrosión
Calor específico
Conductividad eléctrica
Conductividad térmica
Corrosión
Corrosión galvánica
Degradación
Densidad
Dieléctricos
Dilatación términa
Efecto Invar
Efecto piezoeléctrico
Esfuerzos térmicos
Ferromagnetismo
Lixiviación selectiva
Magnetostricción
Oxidación
Pasivación
Punto de fusión
Resistencia específica
Resistividad eléctrica
Rigidez específica
Semiconductores
Superconductividad

BIBLIOGRAFÍA

Callister, D. C., Jr., *Materials Science and Engineering,* 5ª. ed., Wiley, 2000.

Mark, J. E. *et al.*, *Physical Properties of Polymers*, 3ª. ed., Cambridge Univ. Press, 2004.

Pollock, D. D., *Physical Properties of Materials for Engineers*, 2ª. ed., CRC Press, 1993.

Schweitzer, P. A., *Enciclopedia of Corrosion Technology*, Marcel Dekker, 1998.

Talbot, D. y Talbot, J., *Corrosion Science and Technology*, CRC Press, 1997.

PREGUNTAS DE REPASO

3.1 Haga una lista de las razones por las que la densidad es una importante propiedad de los materiales en la manufactura.

3.2 ¿Por qué el punto de fusión de un material es un factor importante en los procesos de manufactura?

3.3 ¿Qué efectos adversos puede provocar la expansión térmica de los materiales?

3.4 ¿Qué es el efecto piezoeléctrico?

3.5 ¿Qué factores ocasionan la corrosión de un metal?

3.6 ¿Qué es la pasivación? ¿Cuál es su importancia?

3.7 ¿Cuál es la diferencia entre la conductividad térmica y el calor específico?

3.8 ¿Qué es el agrietamiento por esfuerzo de corrosión? ¿Por qué se le llama agrietamiento por clima?

3.9 ¿Cuál es la diferencia entre un superconductor y un semiconductor?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

3.10 Describa la importancia de los componentes de estructuras y máquinas fabricados con dos materiales de distintos coeficientes de expansión térmica.

3.11 ¿Cuáles de las propiedades descritas en este capítulo son importantes para *(a)* lapiceros, *(b)* moldes para hornear galletas, *(c)* reglas, *(d)* sujetadores para papel, *(e)* bisagras para puertas, y *(f)* latas para bebidas? Explique sus respuestas.

3.12 En la tabla 3.1 observará que las propiedades de las aleaciones de los metales tienen un rango mayor que las de los metales puros. ¿Qué factores son los responsables de esto?

3.13 ¿La conductividad térmica desempeña un papel importante en el desarrollo de esfuerzos residuales en los metales? Explique su respuesta.

3.14 ¿Qué propiedades materiales son deseables para los cubiertas térmicas, como las colocadas en el transbordador espacial?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

3.15 Si asumimos que todo el trabajo realizado en la deformación plástica se convierte en calor, la elevación de la temperatura en una pieza de trabajo es *(a)* directamente proporcional al trabajo realizado por unidad de volumen, y *(b)* inversamente proporcional al producto del calor específico y la densidad de la pieza. Con base en la figura 2.6, considere que las áreas bajo las curvas son la unidad de trabajo realizado y calcule el aumento de la temperatura para *(i)* el acero 8650, *(ii) para el* acero inoxidable 304, y *(iii)* para el aluminio 1100-H14.

3.16 La frecuencia natural (f) de una viga en voladizo está dada por $f = 0.56EIg/wL^4$, donde E es el módulo de elasticidad, I el momento de inercia, g la constante gravitacional, w el peso de la viga por unidad de longitud y L la longitud de la viga. ¿Cómo cambia la frecuencia natural de la viga, si es que sucede, al aumentar su temperatura? Supóngase que el material es acero.

3.17 Se puede mostrar que la distorsión térmica en los dispositivos de precisión es baja para altos valores de conductividad térmica divididos entre el coeficiente de expansión térmica. Clasifique los materiales de la tabla 3.1 de acuerdo con su capacidad para resistir la distorsión térmica.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

3.18 Con base en su experiencia, liste las partes, componentes y productos que una vez corroídos tengan que reemplazarse o descartarse.

3.19 Liste las aplicaciones donde sean deseables las siguientes propiedades: *(a)* alta densidad, *(b)* baja densidad, *(c)* alto punto de fusión, *(d)* bajo punto de fusión, *(e)* alta conductividad térmica, y *(f)* baja conductividad térmica.

3.20 Sugiera varias aplicaciones en las que sean importantes la resistencia específica y la rigidez específica.

3.21 Diseñe varios mecanismos o instrumentos basados en el uso de las diferencias de expansión térmica de los materiales, como las tiras bimetálicas que desarrollan una curvatura cuando se calientan.

3.22 Determine la resistencia y la rigidez específicas de los materiales relacionados en la tabla 3.1. Describa sus observaciones.

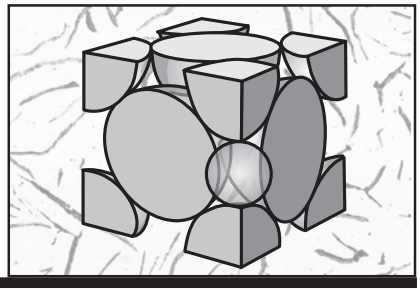
3.23 La máxima fuerza de compresión que puede soportar una columna de peso ligero antes de pandearse depende de la relación de la raíz cuadrada de la rigidez del material y la densidad del mismo. Para los materiales relacionados en la tabla 2.1, determine *(a)* la relación entre la resistencia a la tensión y la densidad, y *(b)* la relación del módulo elástico y la densidad. Comente la ventaja de cada uno para fabricar columnas ligeras con ellos.

3.24 Describa aplicaciones y diseños posibles utilizando aleaciones que muestran el efecto Invar de baja expansión térmica.

CAPÍTULO

4

Aleaciones metálicas: estructura y reforzamiento mediante tratamiento térmico



4.1 Introducción 114
4.2 Estructura de las aleaciones 115
4.3 Diagramas de fase 118
4.4 El sistema hierro-carbono 121
4.5 Diagrama de fases hierro-carburo de hierro y el desarrollo de microestructuras en los aceros 123
4.6 Hierros fundidos 125
4.7 Tratamiento térmico de las aleaciones ferrosas 127
4.8 Templabilidad de las aleaciones ferrosas 132
4.9 Tratamiento térmico de las aleaciones no ferrosas y de los aceros inoxidables 134
4.10 Endurecimiento superficial 136
4.11 Recocido 137
4.12 Hornos y equipo para tratamiento térmico 142
4.13 Consideraciones de diseño para el tratamiento térmico 144

EJEMPLO:

4.1 Tratamiento térmico de una matriz o dado para extrusión 142

En este capítulo se explica cómo pueden alterarse las propiedades de los metales y las aleaciones sometiéndolos a diversos tratamientos térmicos. También se describe lo siguiente:

- Microestructura de las aleaciones ferrosas y características de los diagramas de fase.
- Diversas fases en las aleaciones y su importancia en la manufactura.
- Mecanismos por los que se alteran las propiedades.
- Procedimientos utilizados en el tratamiento térmico de los metales ferrosos para mejorar sus propiedades.
- Microestructuras de aleaciones no ferrosas y su importancia.
- Procedimientos utilizados para dar tratamiento térmico a las aleaciones no ferrosas.
- Características de los hornos para tratamiento térmico.
- Consideraciones de diseño para un tratamiento térmico exitoso.

4.1 Introducción

Las propiedades y el comportamiento de los metales y sus aleaciones durante la manufactura, así como su desempeño durante su vida útil, dependen de su composición, estructura e historia de procesamiento y del tratamiento térmico al que se han sometido. Los elementos de la aleación y los procesos de tratamiento térmico influyen en gran medida en propiedades importantes (como la resistencia, dureza, ductilidad, tenacidad y resistencia al desgaste). Las propiedades de las aleaciones a las que no se puede dar tratamiento térmico se mejoran mediante operaciones de trabajo mecánico, como el laminado, forjado y extrusión (parte III).

El ejemplo más común de mejoramiento de las propiedades es el *tratamiento térmico* (secciones 4.7 a 4.10), que modifica las microestructuras y, a partir de ello, produce varias propiedades mecánicas que son importantes en la manufactura, como formabilidad y maquinabilidad mejoradas. Estas propiedades también mejoran el desempeño en el servicio de los metales utilizados en componentes de máquinas (como engranes, levas y flechas; ver fig. 4.1) y en herramientas, matrices y moldes.

Este capítulo sigue la descripción mostrada en la figura 4.2. Comienza con los efectos de diversos elementos de aleación, seguidos de la solubilidad de un elemento en otro, fases, diagramas de equilibrio de fases y la influencia de la composición, la temperatura

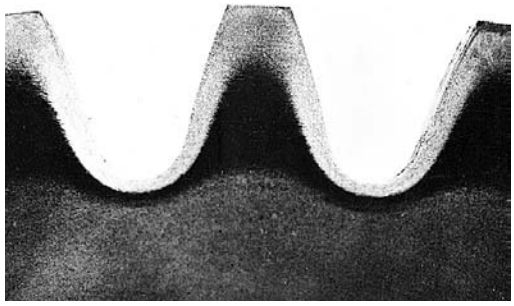


FIGURA 4.1 Sección transversal de dientes de engrane mostrando superficies endurecidas por inducción. *Fuente*: Cortesía de TOCCO Div., Park-Ohio Industries, Inc.

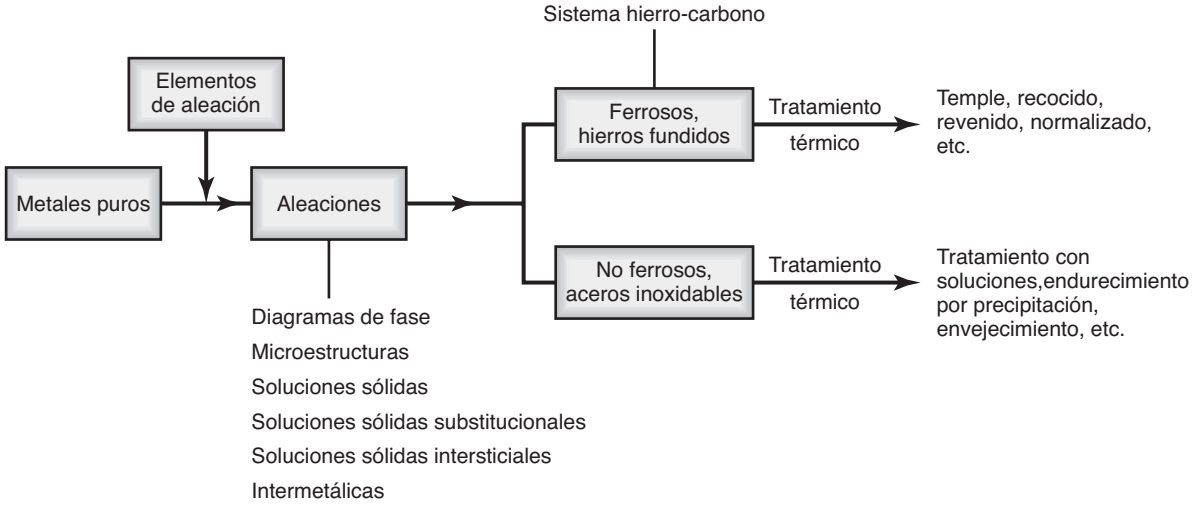


FIGURA 4.2 Guía de los temas descritos en el capítulo 4.

y el tiempo. También se discuten métodos y técnicas de calentamiento, templado, revenido y recocido, y se describen las características del equipo correspondiente.

4.2 Estructura de las aleaciones

Cuando se describió la estructura cristalina básica de los metales en el capítulo 1, se hizo notar que los átomos son todos del *mismo* tipo, excepto por la rara presencia de átomos de impurezas. A estos metales se les conoce como **metales puros,** aunque pueden no serlo por completo. Los metales *comercialmente puros* se utilizan con diversos propósitos: aluminio para láminas, cobre para conductores eléctricos, níquel o cromo para chapeado y oro para contactos eléctricos. Sin embargo, los metales puros tienen propiedades un tanto limitadas, que se pueden mejorar y modificar mediante la **aleación.** Una **aleación** está compuesta por dos o más elementos químicos, de los cuales al menos uno es un metal. La mayoría de los metales utilizados en aplicaciones de ingeniería son algún tipo de aleación, la cual consta de dos formas básicas: *soluciones sólidas* y *compuestos intermetálicos*.

4.2.1 Soluciones sólidas

Dos términos son fundamentales para describir las aleaciones: **soluto** y **solvente.** El soluto es el elemento *menor* (como la sal o el azúcar) que se agrega al solvente, el cual es el elemento *base* (como el agua). En términos de los elementos comprendidos en la estructura cristalina, el soluto (compuesto por *átomos de soluto*) es el elemento que se agrega al solvente (compuesto por los *átomos base*). Cuando la estructura cristalina particular del solvente se mantiene durante la aleación, a ésta se le llama **solución sólida.**

Soluciones sólidas substitucionales. Si el tamaño del átomo de soluto es similar al del átomo solvente, puede reemplazarlo y formar una *solución sólida substitucional* (ver fig. 1.8). Un ejemplo es el latón (sección 6.4), una aleación de zinc y cobre, en la que el zinc (átomo de soluto) se introduce en la red del cobre (átomos solventes). Las propiedades del latón se pueden alterar entonces en una amplia gama controlando la cantidad de zinc en el cobre.

Generalmente se requieren dos condiciones (conocidas como *reglas Hume-Rothery*, llamadas así en honor de W. Hume-Rothery, 1899-1968) para formar soluciones sólidas substitucionales completas:

1. Los dos metales deben tener estructuras cristalinas similares.
2. La diferencia de sus radios atómicos debe ser menor a 15%.

Si no se satisfacen estas condiciones, no se puede obtener una solución sólida completa y la cantidad que se forme será limitada.

Soluciones sólidas intersticiales. Si el tamaño del átomo de soluto es mucho menor que el del átomo solvente, entonces puede ocupar una posición *intersticial*; este proceso forma una *solución sólida intersticial*. Existen dos condiciones necesarias para formar soluciones intersticiales:

1. El átomo solvente debe tener más de una valencia.
2. El radio atómico del átomo de soluto debe ser menor que 59% del radio atómico del átomo solvente.

Si no se cumplen estas condiciones, puede producirse una solubilidad intersticial limitada, o no ocurrir.

Una familia importante de soluciones sólidas intersticiales es el **acero** (capítulo 5), una aleación de hierro y carbono en donde los átomos de carbono están presentes en posiciones intersticiales entre los de hierro. El radio atómico del carbono es 0.071 nm, que es menor que 59% del radio de 0.124 nm del átomo de hierro. Las propiedades de los aceros al carbono pueden variar en una gama amplia, controlando la proporción de carbono en el hierro. Por esta capacidad de control el acero resulta un material muy versátil y útil, con una amplia variedad de propiedades y aplicaciones, además de ser económico.

4.2.2 Compuestos intermetálicos

Los **compuestos intermetálicos** son estructuras complejas que constan de dos metales en los que los átomos de soluto están presentes en ciertas proporciones entre los átomos solventes. Algunos compuestos tienen solubilidad sólida y el tipo de enlace atómico puede variar de metálico a iónico. Son fuertes, duros y frágiles. Debido a sus elevados puntos de fusión, su resistencia a temperaturas elevadas, su buena resistencia a la oxidación y su relativa baja densidad, son los materiales idóneos para motores avanzados de turbinas de gas. Los ejemplos característicos son los aluminuros de titanio (Ti_3Al), de níquel (Ni_3Al) y de hierro (Fe_3Al).

4.2.3 Sistemas de dos fases

Una solución sólida es aquella en la cual dos o más elementos en estado sólido forman una sola fase sólida homogénea cuyos elementos se distribuyen de manera uniforme por toda la masa sólida. Este tipo de sistemas está limitado por una concentración máxima de átomos de soluto en la red de átomos solventes, al igual que existe un límite de solubilidad del azúcar en el agua. La mayoría de las aleaciones consta en dos o más fases sólidas y se les puede considerar mezclas mecánicas. A estos sistemas con dos fases sólidas se les conoce como **sistemas de dos fases**.

Una **fase** se define como una porción físicamente distinta y homogénea en un material; cada fase es una parte homogénea de la masa total y tiene sus propias características y propiedades. Considérese una mezcla de arena y agua como ejemplo de un sistema de dos fases: ambos componentes tienen sus propias estructuras, características y propiedades, por lo que existe un límite claro entre el agua (una fase) y las partículas de arena (una segunda fase). Otro ejemplo es el hielo en el agua; en este caso, las dos fases son el mismo compuesto químico con exactamente los mismos elementos (hidrógeno y oxígeno), aunque sus propiedades son muy diferentes.

Un ejemplo característico de un sistema de dos fases en los metales se presenta cuando se agrega plomo al cobre en estado fundido. Después que se solidifica la mezcla, la estructura consta de dos fases: una que tiene una pequeña cantidad de plomo en solución sólida en cobre, la otra con partículas de plomo (de forma casi esférica) *dispersas* en toda la estructura (fig. 4.3a). Las partículas de plomo son análogas a las de arena en el agua descritas antes. Esta aleación cobre-plomo tiene propiedades diferentes de las del cobre o del plomo por separado. También se agrega plomo a los aceros para obtener aceros plomados, cuya maquinabilidad mejora mucho.

La aleación con partículas finamente dispersas (**partículas de la segunda fase**) es un método importante para reforzar las aleaciones y controlar sus propiedades. En las aleaciones de dos fases, las partículas de la segunda fase obstaculizan el movimiento de las dislocaciónes y, por ello, incrementan la resistencia. Otro ejemplo de una aleación de dos fases es la estructura agregada que se muestra en la figura 4.3b, donde existen dos conjuntos de granos, cada uno con su propia composición y propiedades. Los granos más oscuros pueden tener una estructura diferente de la de los claros. Por ejemplo, los granos oscuros pueden ser frágiles, mientras que los más claros son dúctiles. Durante las operaciones de trabajo de los metales, como el forjado y la extrusión, pueden aparecer defectos que quizá se deban a la falta de ductilidad de una de las fases de la aleación. En general, las aleaciones de dos fases son más fuertes y menos dúctiles que las soluciones sólidas.

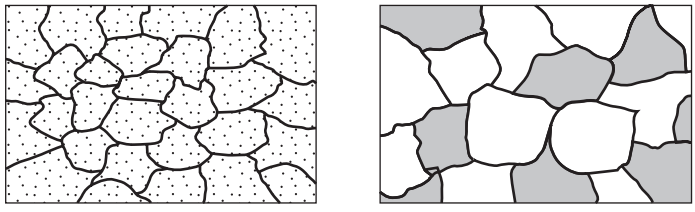


FIGURA 4.3 *(a)* Esquema de granos, límites de granos y partículas dispersas a través de la estructura de un sistema de dos fases, como una aleación plomo-cobre. Los granos representan plomo en solución sólida en cobre y las partículas son plomo como segunda fase. *(b)* Esquema de un sistema de dos fases que consta de dos conjuntos de granos: oscuros y claros. Los granos oscuros y claros tienen composiciones y propiedades independientes.

4.3 Diagramas de fase

Los metales puros tienen puntos de fusión y solidificación claramente definidos y esta última ocurre a una *temperatura constante* (fig. 4.4). Cuando la temperatura del metal fundido se reduce al punto de solidificación y permanece constante, se cede la energía del *calor latente de solidificación*. Al final, se completa la solidificación y el metal sólido continúa enfriándose a la temperatura ambiente.

A diferencia de los metales puros, las aleaciones solidifican a lo largo de un *intervalo* de temperaturas (fig. 4.5). La solidificación comienza cuando la temperatura del metal fundido cae debajo de la **temperatura del líquido (líquidus)**; y esta es completada cuando la temperatura alcanza la **temperatura del sólido (sólidus)**. Dentro de este intervalo, la aleación está en un estado *blando* o *pastoso*; su composición y estado están descritos por el diagrama de fases particular de dicha aleación.

Un **diagrama de fases**, también llamado **diagrama de equilibrio** o **constitucional**, muestra las relaciones entre la temperatura, la composición y las fases presentes en un sistema de aleación particular en condiciones de equilibro. *Equilibrio* significa que un sistema permanece constante por un periodo indefinido. La palabra *constitucional* indica las relaciones entre la estructura, la composición y la integración física de la aleación. Como se describe a continuación, los tipos de diagramas de fase incluyen: (1) soluciones sólidas completas; (2) eutécticas, como los hierros fundidos; y (3) eutectoides, como los aceros.

En la figura 4.5 se muestra un ejemplo de un diagrama de fases para la aleación cobre-níquel; se le llama **diagrama de fases binario** porque hay dos elementos (cobre y níquel) en el sistema. El límite izquierdo de este diagrama (100% de Ni) indica el punto de fusión del níquel; el límite derecho (100% de Cu) indica el punto de fusión del cobre. (Todos los porcentajes citados son porcentajes en peso, y no por número de átomos).

Obsérvese que para una composición de, digamos, 50% de Cu-50% de Ni, la aleación comienza a solidificar a una temperatura de 1313 °C (2395 °F), y completa este proceso a 1249 °C (2280 °F). Arriba de 1313 °C existe un líquido homogéneo de 50%

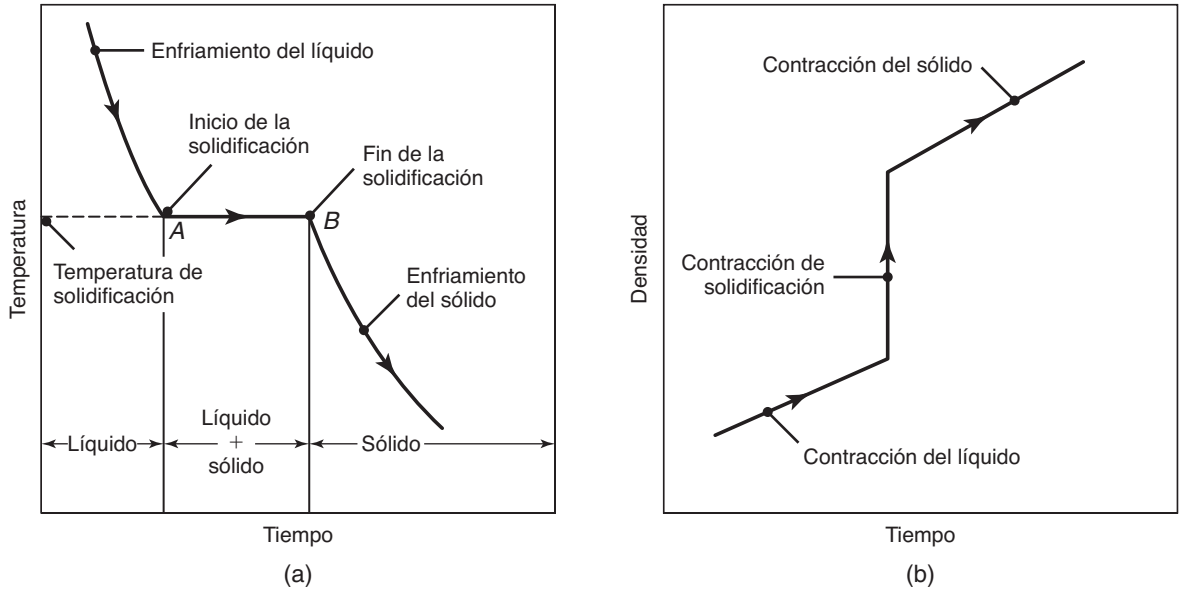


FIGURA 4.4 *(a)* Curva de enfriamiento para la solidificación de metales puros. Obsérvese que la solidificación ocurre a temperatura constante; durante este proceso se cede el calor latente de solidificación. *(b)* Cambio de densidad durante el enfriamiento de los metales puros.

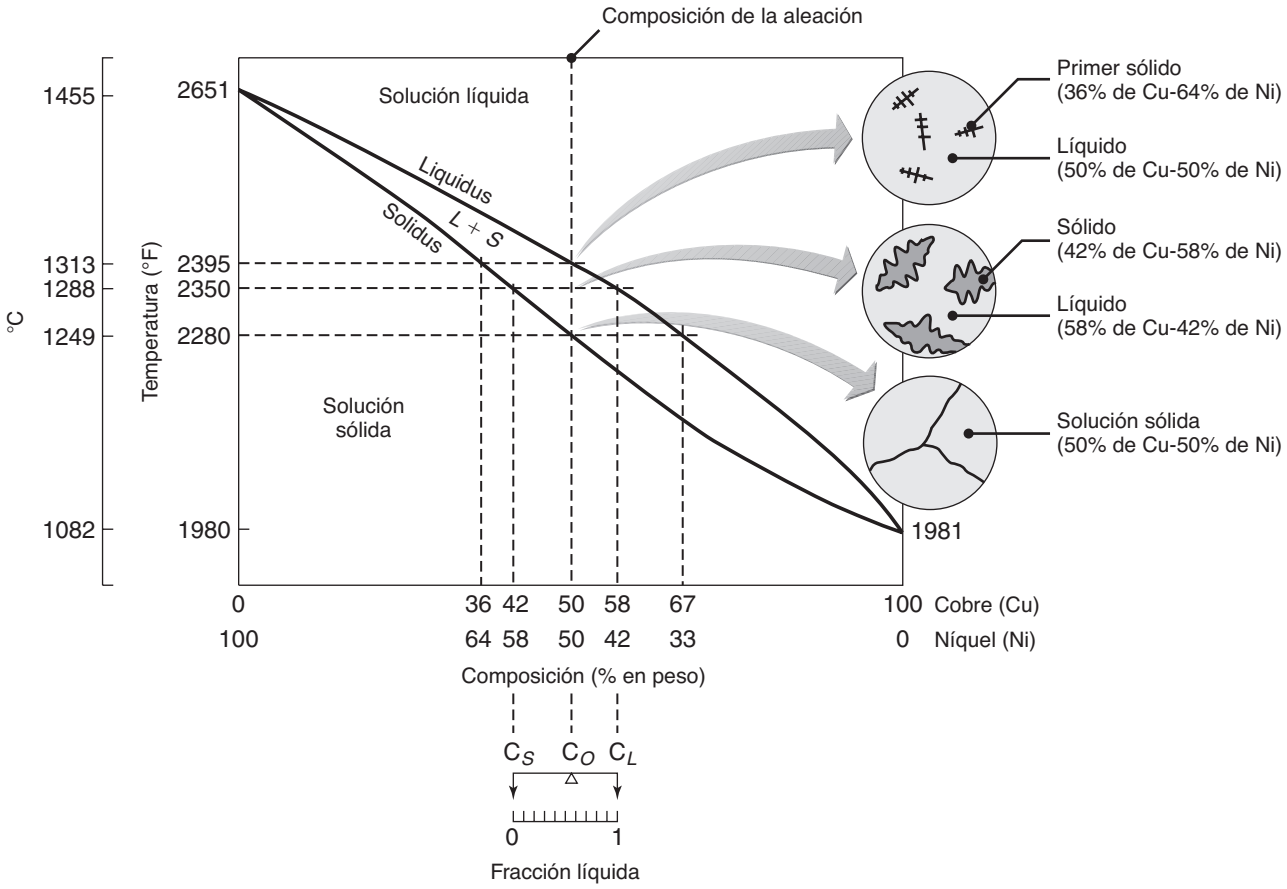


FIGURA 4.5 Diagrama de fase para el sistema de aleación níquel-cobre obtenida a baja velocidad de solidificación. Obsérvese que el níquel puro y el cobre puro tienen cada uno una temperatura de solidificación o de fusión. El círculo superior a la derecha muestra la nucleación de los cristales. El segundo círculo muestra la formación de dendritas (ver sección 10.2). El círculo inferior muestra la aleación solidificada con los límites de los granos.

de Cu-50% de Ni. Si se enfría lentamente a 1249 °C, se produce una solución sólida homogénea de 50% de Cu-50% de Ni. Sin embargo, entre las curvas de liquidus y solidus, y a una temperatura de 1288 °C (2350 °F), existe una región de dos fases: una **fase sólida,** compuesta por 42% de Cu-58% de Ni, y una **fase líquida,** de 58% de Cu-42% de Ni. Para determinar la *composición sólida*, nos movemos horizontalmente hacia la izquierda, a la curva del solidus, y leemos hacia abajo, obteniendo 42% de Cu. La *composición líquida* (58%) se obtiene de manera similar yendo a la derecha de la curva de liquidus. El procedimiento para determinar las composiciones de diversas fases en los diagramas de fases (llamada **regla de la palanca**) se describe con detalle en textos de ciencia de materiales y metalurgia.

La aleación *completamente solidificada* en el diagrama de fases mostrado en la figura 4.5 es una **solución sólida,** porque el elemento de aleación Cu (átomo de soluto) se disuelve por completo en el metal base Ni (átomo solvente) y cada grano tiene la misma composición. El radio atómico del cobre es 0.128 nm y el del níquel es 0.125 nm, y ambos elementos son de estructura cúbica centrada en las caras. Por lo tanto, se obedecen las reglas Hume-Rothery.

Las propiedades mecánicas de las soluciones sólidas de Cu-Ni dependen de su composición (fig. 4.6). Hasta cierto punto, las propiedades del cobre puro se mejoran al aumentar el contenido de níquel; existe un porcentaje óptimo de níquel que da mayor re-

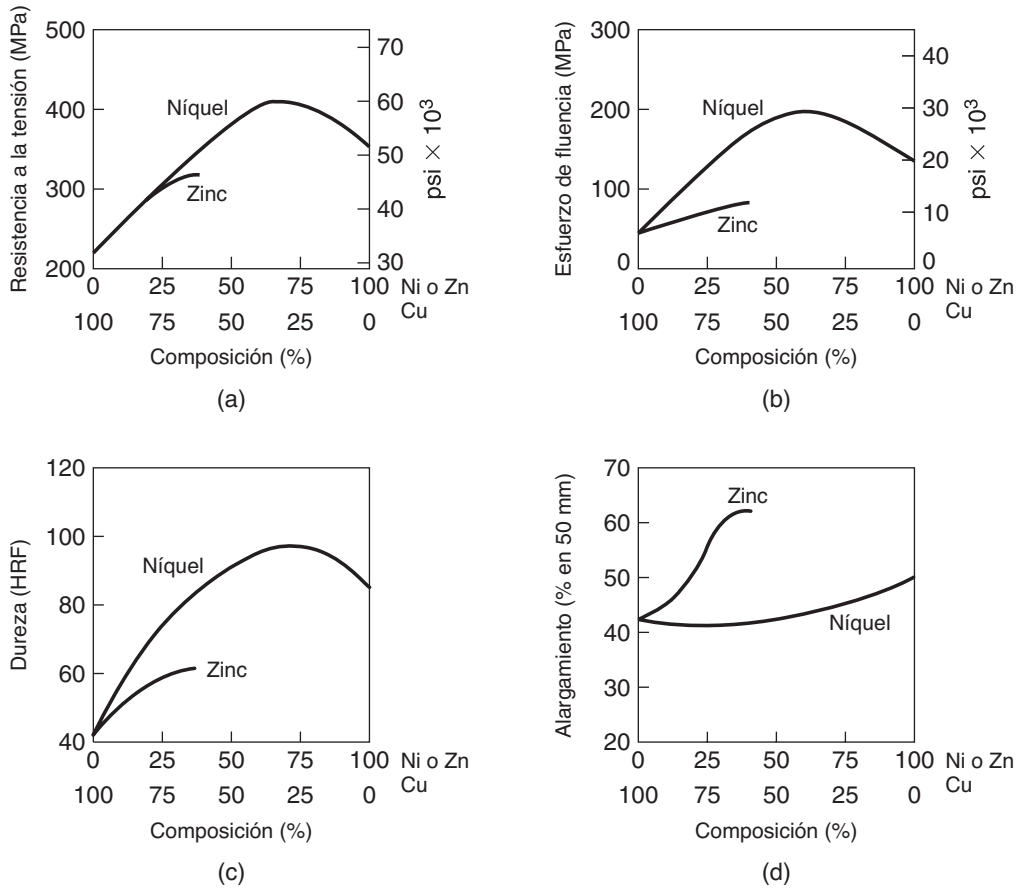


FIGURA 4.6 Propiedades mecánicas de las aleaciones cobre-níquel y cobre-zinc en función de su composición. Las curvas para el zinc son cortas porque éste tiene una solubilidad sólida máxima de 40% en cobre.

sistencia y dureza a la aleación Cu-Ni. En la figura 4.6 también se muestra de qué manera el zinc, como elemento de aleación en el cobre, afecta las propiedades mecánicas de la aleación. Obsérvese que el zinc (soluto) tiene un máximo de 40% de solubilidad sólida en el cobre (solvente), mientras que éste y el níquel son totalmente solubles uno en otro. El mejoramiento de las propiedades se debe al *apilamiento* (bloqueo) de las dislocaciones en los átomos sustitutivos de níquel o zinc, que también se pueden considerar como átomos de impureza. El resultado es que las dislocaciones no se pueden mover tan libremente y la resistencia de la aleación aumenta.

En la figura 4.7 se presenta otro ejemplo de un diagrama de dos fases para el sistema plomo-estaño. Las fases simples, alfa y beta, son soluciones sólidas. Obsérvese que las regiones de fase simple están separadas de la fase líquida mediante dos regiones de dos fases: *alfa + líquido* y *beta + líquido*. En la figura 4.7 se muestra la composición de la aleación (61.9% de Sn-38.1% de Pb) que tiene la *más baja* temperatura a la cual la aleación es completamente líquida, es decir, 183 °C (361 °F).

A este punto se le conoce como **punto eutéctico** y en él la solución líquida se separa en los componentes alfa y beta. La palabra *eutéctico* proviene del griego *eutektos*, que significa "fácilmente fundido".

Los puntos eutécticos son importantes en aplicaciones como la soldadura blanda, donde conviene mantener bajas temperaturas para evitar daños térmicos a las partes durante la unión. Aunque existen diversos tipos de soldaduras blandas, las de estaño-plomo se utilizan comúnmente en aplicaciones generales; tienen una composición que va de

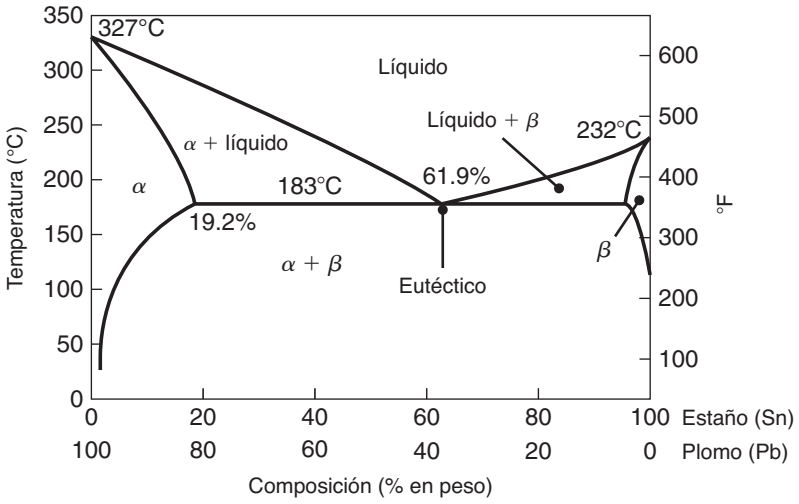


FIGURA 4.7 Diagrama de fase plomo-estaño. Obsérvese que la composición del punto eutéctico para esta aleación es 61.9% de Sn-38.1% de Pb. Una composición menor o mayor que esta relación tendrá una temperatura de líquido mayor.

5% de Pb-95% de Sn a 70% de Pb-30% de Sn. Cada composición tiene su propio punto de fusión.

4.4 El sistema hierro-carbono

Los aceros e hierros fundidos están representados por el sistema binario hierro-carbono. El hierro comercialmente puro contiene hasta 0.008% de C, los aceros hasta 2.11% de C y los hierros fundidos hasta 6.67% de C, aunque la mayoría de éstos contienen menos de 4.5% de C. En esta sección se describe el sistema hierro-carbono, incluyendo las técnicas empleadas para evaluar y modificar las propiedades de estos importantes materiales en aplicaciones específicas.

En la figura 4.8 se muestra el **diagrama de fases hierro-carburo de hierro**. Aunque este diagrama se puede extender hacia la derecha, a 100% de C (grafito puro) (ver fig. 4.12), la gama que importa para las aplicaciones de ingeniería es de hasta 6.67% de C, ya que el Fe_3C es una fase estable. El hierro puro se funde a una temperatura de 1538 °C (2798 °F), como se muestra en el extremo izquierdo de la figura 4.8. Al enfriarse el hierro, primero se forma ferrita delta, después austenita y finalmente ferrita alfa.

Ferrita. La **ferrita alfa**, o simplemente **ferrita**, es una solución sólida de hierro cúbico centrado en el cuerpo; tiene una máxima solubilidad sólida de 0.022% de C a una temperatura de 727 °C (1341 °F). La ferrita delta es estable sólo a temperaturas muy altas y no tiene importancia práctica en la ingeniería. Al igual que existe un límite de solubilidad para la sal en el agua (cualquier cantidad adicional se precipita en el fondo del recipiente como sal sólida), hay un límite de solubilidad sólida para el carbono en el hierro.

La ferrita es relativamente suave y dúctil; es magnética desde la temperatura ambiente hasta 768 °C (1414 °F), la *temperatura de Curie* (llamada así en honor de M. Curie, 1867-1934). Aunque se puede disolver muy poco carbono intersticialmente en el hierro bcc, la cantidad de carbono puede afectar de modo significativo las propiedades mecánicas de la ferrita. Además, es posible que una solución sólida de hierro contenga cantidades importantes de cromo, manganeso, níquel, molibdeno, tungsteno y silicio, dando lugar así propiedades deseables.

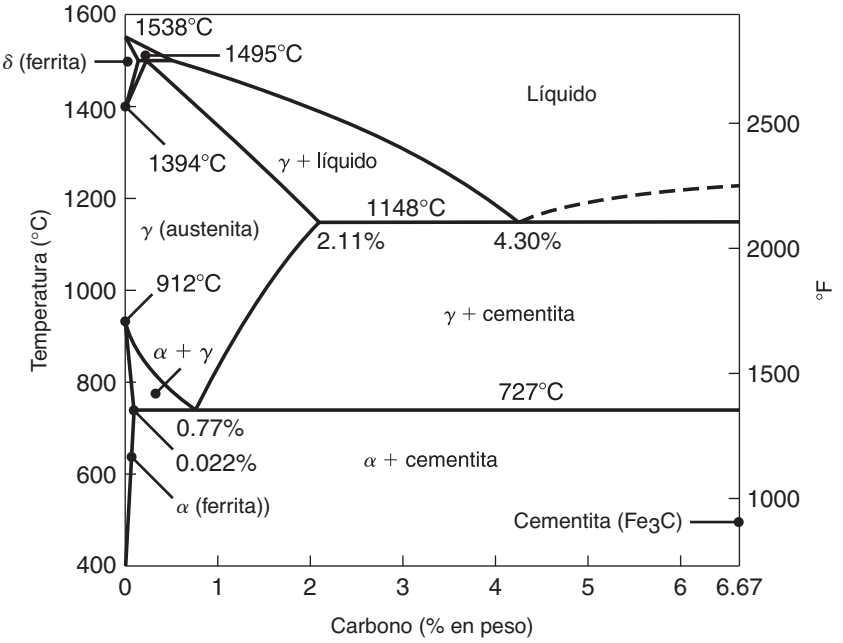


FIGURA 4.8 Diagrama de fase hierro-carburo de hierro. Debido a la importancia del acero como material de ingeniería, éste es uno de los diagramas de fase más importantes.

Austenita. Como se muestra en la figura 4.8, dentro de cierto margen de temperatura, el hierro sufre una **transformación polimórfica** de la estructura bcc a una estructura fcc para convertirse en hierro gama o (más comúnmente) **austenita** (bautizada así en honor de W. R. Austen, 1843-1902). Ésta tiene una solubilidad sólida de hasta 2.11% de C a 1148 °C (2098 °F). Debido a que la estructura fcc tiene más posiciones intersticiales, la solubilidad sólida de la austenita es casi dos órdenes de magnitud mayor que la de la ferrita, ocupando el carbono las posiciones intersticiales (fig. 4.9a).

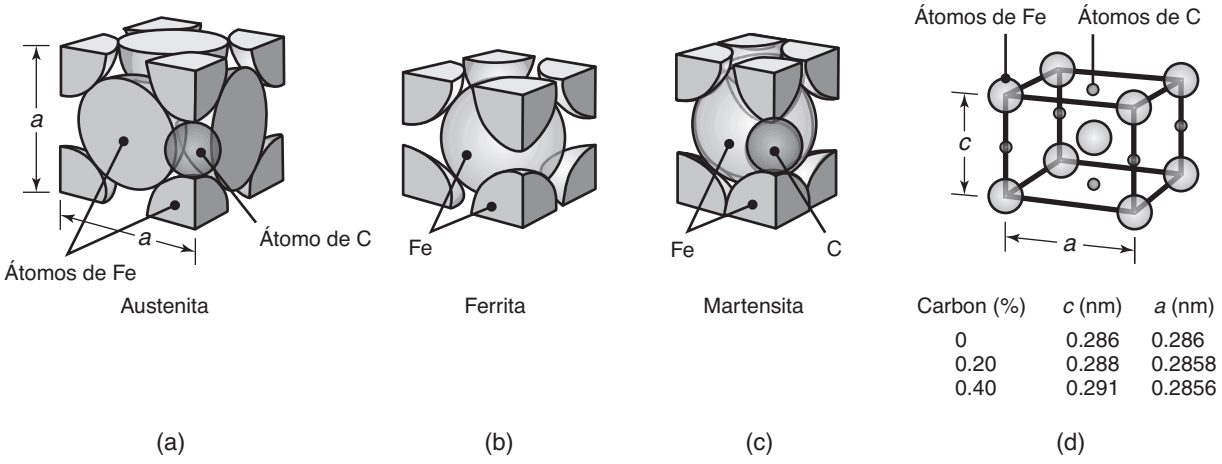


FIGURA 4.9 Celdas unitarias de *(a)* austenita, *(b)* ferrita y *(c)* martensita. En *(d)* se muestra el efecto del porcentaje de carbono (en peso) en las dimensiones de la red de la martensita. Obsérvese la posición intersticial de los átomos de carbono (ver fig. 1.9). Nótese también el aumento de la dimensión *c* con el incremento del contenido de carbono: este efecto hace que la celda unitaria de la martensita tenga la forma de un prisma rectangular.

La austenita representa una fase importante en el tratamiento térmico de los aceros (sección 4.7). Es más densa que la ferrita y su estructura fcc de fase simple es dúctil a temperaturas elevadas. En consecuencia, posee buena formabilidad. También se pueden disolver grandes cantidades de níquel y manganeso en el hierro fcc para impartirle diversas propiedades. En la forma austenítica, el acero no es magnético, ya sea a altas temperaturas (para los aceros inoxidables austeníticos) o a temperatura ambiente.

Cementita. El extremo derecho de la figura 4.8 representa la **cementita**, que es 100% de carburo de hierro (Fe_3C) y tiene un contenido de carbono de 6.67%. La cementita (del latín *caementum,* que significa "astilla de piedra"), también se llama **carburo**. No debe confundirse este carburo de hierro con otros carburos utilizados como matrices, herramientas de corte y abrasivos (como el carburo de tungsteno, de titanio y de silicio, descritos en los capítulos 8 y 22). La cementita es un compuesto intermetálico muy duro y frágil que tiene una influencia significativa en las propiedades de los aceros. Puede incluir otros elementos de aleación, como cromo, molibdeno y manganeso.

4.5 Diagrama de fases hierro-carburo de hierro y el desarrollo de microestructuras en los aceros

La región del diagrama de fase hierro-carburo de hierro que se encuentra arriba de 2.11% de C, lo cual es importante para los aceros, se muestra en la figura 4.10; ésta es una amplificación de la parte inferior izquierda de la figura 4.8. Se pueden desarrollar diversas microestructuras, dependiendo del contenido de carbono, la cantidad de deformación plástica (trabajado) y el método de tratamiento térmico. Por ejemplo, considérese el

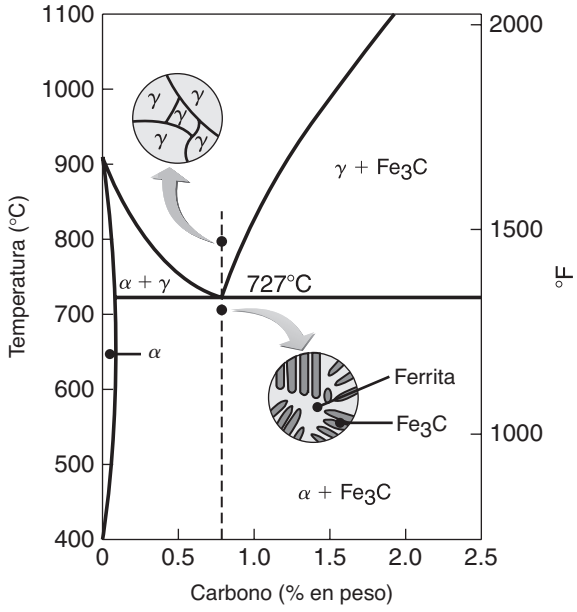


FIGURA 4.10 Esquema de las microestructuras de una aleación hierro-carbono de composición eutectoide (0.77% de carbono), arriba y debajo de la temperatura eutectoide de 727 °C (1341 °F).

punto eutéctico del hierro con un contenido de 0.77% de C mientras se enfría muy lentamente de una temperatura de, digamos, 1100 °C (2000 °F) en la fase austenítica.

La razón del enfriamiento *lento* es mantener el equilibrio. En el tratamiento térmico se emplean mayores velocidades de enfriamiento, como se explica en la sección 4.7. A 727 °C (1341 °F) ocurre una reacción en la que la austenita se transforma en ferrita alfa (bcc) y cementita. Debido a que la solubilidad sólida de carbono en ferrita es de sólo 0.022%, el carbón adicional forma cementita. A esta reacción se le llama **reacción eutectoide** (que significa *similar a la eutéctica*). Este término significa que, a cierta temperatura, una fase sólida única (austenita) se transforma en otras dos fases sólidas (ferrita y cementita). A la estructura del acero eutectoide se le llama **perlita**, porque a una baja amplificación se parece a la madreperla (fig. 4.11). La microestructura de la perlita consta de capas alternas (**laminillas**) de ferrita y cementita. En consecuencia, sus propiedades mecánicas son intermedias entre las de la ferrita (suave y dúctil) y la cementita (dura y frágil).

En el hierro con menos de 0.77% de C, la microestructura formada consta de una fase de perlita (ferrita y cementita) y una fase de ferrita. A la ferrita en la perlita se le llama **ferrita eutectoide**, y a la fase de ferrita se le llama **ferrita proeutectoide** (*pro* significa antes). Se forma a una temperatura superior a la temperatura eutectoide de 727 °C (1341 °F) en la región *alfa + gama*. Si el contenido de carbono es mayor que 0.77%, la austenita se transforma en perlita y cementita. A la cementita en la perlita se le llama **cementita eutectoide** y a la fase de cementita se le llama **cementita proeutectoide**, pues se forma en la región alfa + Fe_3C a una temperatura mayor que la temperatura eutectoide.

4.5.1 Efectos de los elementos de aleación en el hierro

Aunque el carbono es el elemento básico para transformar el hierro en acero, también se agregan otros elementos a fin de impartirle varias propiedades deseables. El principal efecto de estos elementos de aleación en el diagrama de fases hierro-carburo de hierro consiste en que cambian la temperatura y la composición eutectoides (porcentaje de carbono en el acero en el punto eutectoide); también se modifican otros límites de fase.

La temperatura eutectoide se puede elevar o reducir de 727 °C (1341 °F), lo que depende del elemento de aleación en particular. Por otro lado, los elementos de aleación siempre reducen la composición eutectoide (esto es, su contenido de carbono es menor que 0.77%). Reducir la temperatura eutectoide significa aumentar la gama de la austeni-

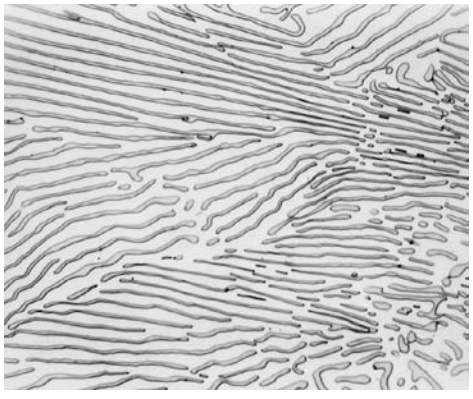


FIGURA 4.11 Microestructura de perlita en acero 1080 formada de austenita de una composición eutectoide. En esta estructura laminar, las regiones más claras son ferrita y las regiones más oscuras son carburo. Aumento: 2500×.

ta. El resultado es que al elemento de aleación (como el níquel) se le conoce como **formador de austenita (elementos gamagénicos)**. El níquel tiene una estructura fcc, por lo que favorece la estructura fcc de la austenita. En cambio, el cromo y el molibdeno poseen una estructura bcc que favorece la estructura bcc de la ferrita. A estos elementos se les conoce como **estabilizadores de ferrita** o **elementos alfagénicos**.

4.6 Hierros fundidos

El término **hierro fundido** se refiere a una familia de aleaciones ferrosas compuestas por hierro, carbono (que va de 2.11% a casi 4.5%) y silicio (casi hasta 3.5%). Es común que los hierros fundidos se clasifiquen según su morfología de solidificación, a partir de la temperatura eutéctica, de la siguiente manera (ver también la sección 12.3):

a. Hierro fundido gris, o hierro gris.
b. Hierro fundido dúctil, hierro fundido nodular o hierro fundido de grafito esferoidal.
c. Hierro fundido blanco o fundición blanca.
d. Hierro maleable.
e. Hierro grafito compactado.

Los hierros fundidos también se clasifican por su estructura en ferríticos, perlíticos, templados, revenidos o bainitizados.

En la figura 4.12 se muestra el diagrama de equilibrio de fases correspondiente a los hierros fundidos, donde el extremo derecho es 100% de C (esto es, grafito puro). La temperatura eutéctica es 1154 °C (2109 °F), por lo que los hierros fundidos son totalmente líquidos a temperaturas menores que las requeridas para los aceros líquidos. En consecuencia, el hierro con un alto contenido de carbono se puede fundir (ver parte II) a temperaturas menores que las de los aceros.

La cementita no es completamente estable; es **metastable**, con un índice muy bajo de descomposición. Sin embargo, se puede hacer que se descomponga en ferrita alfa y grafito. La formación de grafito (**grafitización**) se puede controlar, promover y acele-

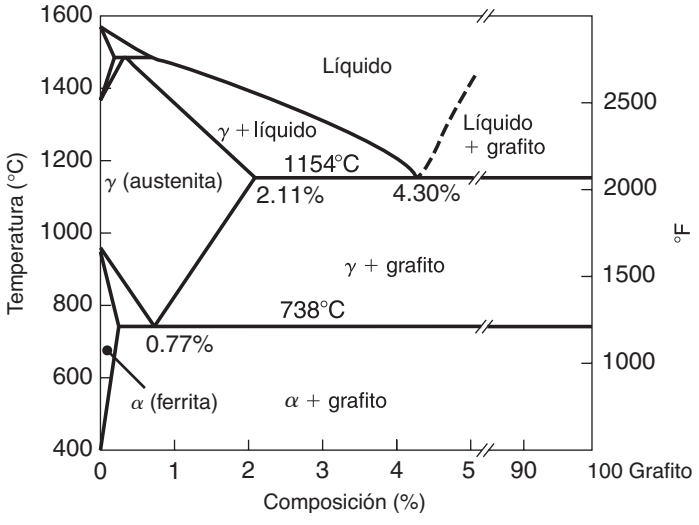


FIGURA 4.12 Diagrama de fase para el sistema hierro-carbono con grafito (en lugar de cementita) como la fase estable. Obsérvese que esta figura es una versión ampliada de la figura 4.8.

rar modificando la composición y la velocidad de enfriamiento, y mediante la adición de silicio.

Hierro fundido gris. En esta estructura, el grafito existe mayormente en la forma de *hojuelas* (fig. 4.13a). Se le llama **hierro fundido gris**, o **hierro gris**, porque cuando se rompe la trayectoria de la fractura corre a lo largo de hojuelas de grafito y tiene una apariencia gris, parda. Estas hojuelas actúan como elevadores del esfuerzo. El resultado es que el hierro gris tiene una ductilidad despreciable y es de baja resistencia a la tensión (aunque de alta resistencia a la compresión), como lo son otros materiales frágiles. En cambio, la presencia de hojuelas de grafito da a este material la capacidad para amortiguar vibraciones (por fricción interna) y, en consecuencia, la capacidad para disipar energía. Esta capacidad hace que el hierro gris sea un material adecuado para, y utilizado comúnmente, en la construcción de bases para máquinas herramienta y estructuras para maquinaria.

Existen tres tipos de hierro fundido gris que son el **ferrítico**, el **perlítico** y el **martensítico**. Debido a la diferencia de estructura, cada uno tiene distintas propiedades y aplicaciones. En el hierro gris ferrítico (también conocido como *hierro totalmente gris*), la estructura consiste en hojas de grafito en una matriz de ferrita alfa. El hierro gris perlítico tiene una estructura de grafito en una matriz de perlita; aunque aún es frágil, es más fuerte que el hierro totalmente gris. El hierro gris martensítico se obtiene austenizando un hierro gris perlítico y enfriándolo después con rapidez para producir una estructura de grafito en una matriz de martensita. El resultado es que el hierro fundido martensítico es muy duro.

Hierro dúctil (nodular). En la estructura del hierro dúctil, el grafito se encuentra en forma **nodular** o **esferoidal** (fig. 4.13b), la cual permite que el material sea de alguna manera dúctil y resistente al impacto. La forma de las hojuelas de grafito cambia a nódulos (esferas) mediante pequeñas adiciones de magnesio y/o cerio al metal fundido antes de colarlo. El hierro dúctil se puede volver ferrítico o perlítico mediante tratamiento térmico. También es posible tratarlo de modo térmico para obtener alternativamente una estructura de martensita revenida (sección 4.7).

Hierro fundido blanco. Su estructura es muy dura, resistente al desgaste y frágil, debido a la presencia de grandes cantidades de carburo de hierro (en lugar de grafito). El **hierro fundido blanco** se obtiene mediante el enfriamiento rápido de hierro gris, o ajustando la composición al mantener bajo el contenido de carbono y silicio. A este tipo de hierro fundido también se le llama *hierro blanco o fundición blanca* debido a la apariencia cristalina blanca de la superficie de fractura.

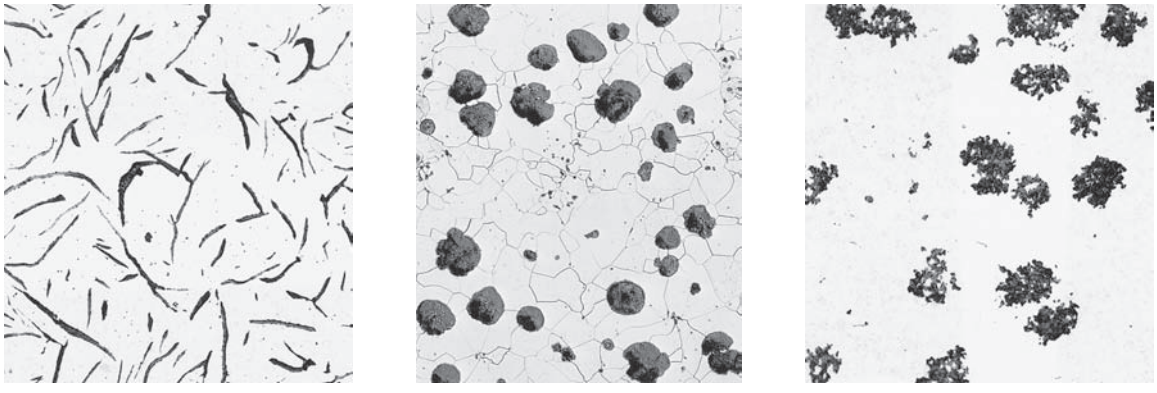


FIGURA 4.13 Microestructura de hierros fundidos. Aumento: 100×. *(a)* Hierro gris ferrítico con hojuelas de grafito. *(b)* Hierro ferrítico dúctil (hierro nodular) con grafito en forma nodular. *(c)* Hierro ferrítico maleable. Este hierro fundido se solidificó como hierro fundido blanco con el carbono presente como cementita y tratado térmicamente para grafitizar el carbono.

Hierro maleable. El **hierro maleable** se obtiene recociendo hierro fundido blanco en una atmósfera de monóxido de carbono y bióxido de carbono, a entre 800 °C y 900 °C (1470 °F y 1650 °F), hasta por varias horas, según el tamaño de la parte. Durante este proceso, la cementita se descompone (*disocia*) en hierro y grafito. El grafito se presenta como *racimos* o *rosetas* (fig. 4.13c) en una matriz de ferrítica o de perlítica. En consecuencia, el hierro maleable tiene una estructura similar a la del hierro nodular. Esta estructura promueve la ductilidad, resistencia y resistencia al impacto, de ahí el término *maleable* (del latín *malleus*, que significa "que se puede martillar").

Hierro de grafito compactado. En esta estructura, el grafito se encuentra en la forma de hojuelas cortas, gruesas e interconectadas, que tienen superficies onduladas y extremidades redondas. Las propiedades mecánicas y físicas de este hierro fundido son intermedias entre las del hierro fundido con grafito en hojuelas y del hierro fundido con grafito nodular.

4.7 Tratamiento térmico de las aleaciones ferrosas

Las diferentes microestructuras descritas hasta aquí se pueden modificar mediante técnicas de **tratamiento térmico**, esto es, mediante calentamiento y enfriamiento controlado de las aleaciones a diferentes velocidades. Estos tratamientos inducen las **transformaciones de fase** que influyen en gran medida en propiedades mecánicas como la resistencia, dureza, ductilidad, tenacidad y resistencia al desgaste de las aleaciones. Los efectos del tratamiento térmico dependen de la aleación en particular, su composición y su microestructura, el grado de trabajo previo en frío, así como las velocidades de calentamiento y de enfriamiento durante el tratamiento térmico. Los procesos de recuperación, recristalización y crecimiento de grano (sección 1.6) son ejemplos de tratamiento térmico, que comprenden cambios en la estructura del grano de la aleación.

Esta sección se concentra en los cambios microestructurales en el sistema hierro-carbono. Debido a su importancia tecnológica, las estructuras consideradas aquí son la perlita, esferoidita, bainita, martensita y martensita revenida. Los procesos de tratamiento térmico descritos son recocido, temple y revenido.

Perlita. Si las laminillas de ferrita y cementita en la estructura de perlita del acero eutectoide mostrada en la figura 4.11 son delgadas y apretadas una contra otra, a la estructura se le llama **perlita fina**; si son gruesas y ampliamente espaciadas, se le llama **perlita gruesa**. La diferencia entre las dos depende de la velocidad de enfriamiento a través de la temperatura eutectoide (el sitio de una reacción en la que la austenita se transforma en perlita). Si dicha velocidad es relativamente alta (como en el aire), se produce perlita fina; si el enfriamiento es lento (como en un horno), se produce perlita gruesa.

Esferoidita. Cuando se calienta la perlita apenas debajo de la temperatura eutectoide y después se mantiene a esa temperatura por cierto periodo (**recocido subcrítico**, sección 4.11), como por un día a 700 °C (1300 °F), la cementita laminar se transforma en formas casi *esféricas* (fig. 4.14). A diferencia de las formas laminares de la cementita (que actúan como concentradores de esfuerzo), las **esferoiditas** (partículas esféricas) son menos propensas a la concentración de esfuerzos debido a sus formas redondeadas. En consecuencia, esta estructura tiene mayor tenacidad y menor dureza que la estructura perlítica. Así se puede trabajar en frío, ya que la ferrita dúctil posee una tenacidad alta y las partículas esferoidales de carburo evitan la iniciación de grietas dentro del material.

Bainita. Visible sólo si se utiliza un microscopio electrónico, la **bainita** es una microestructura muy fina que consiste en ferrita y cementita, algo similar a la perlítica, pero con una morfología diferente. Se puede producir en aceros con elementos de aleación y a ve-

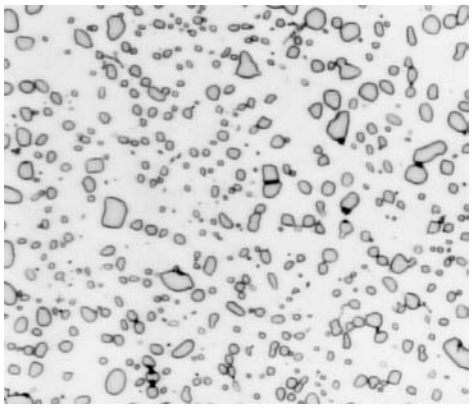
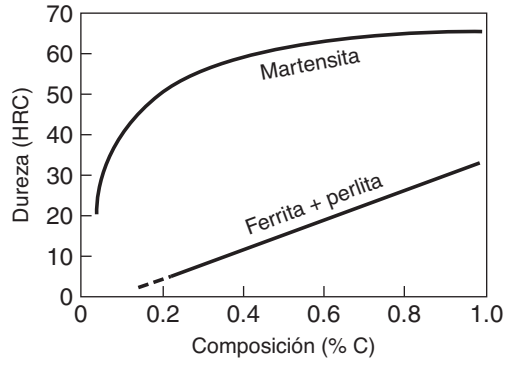


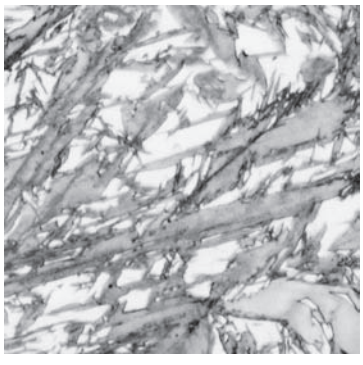
FIGURA 4.14 Microestructura de acero eutectoide. La esferoidita se forma reviniendo el acero a 700 °C (1292 °F). Aumento: 1000×.

locidades de enfriamiento mayores que las requeridas para la transformación a perlita. Esta estructura, llamada **acero bainítico** (llamada así en honor de E. C. Bain, 1891-1971), por lo general es más fuerte y dúctil que los aceros perlíticos al mismo nivel de dureza.

Martensita. Cuando la austenita se enfría a alta velocidad (como si templara en agua), su estructura fcc se transforma en una estructura **tetragonal centrada en el cuerpo** (bct). Ésta se puede describir como un prisma rectangular centrado en el cuerpo, que se alarga ligeramente a lo largo de uno de sus ejes principales (ver fig. 4.9d). Esta microestructura se llama **martensita** (bautizada así en honor de A. Martens, 1850-1914). Debido a que la martensita no tiene tantos sistemas de deslizamiento como una estructura bcc (y el carbono se encuentra en posiciones intersticiales), es muy dura y frágil (fig. 4.15); no tiene tenacidad y, por lo tanto, su uso es limitado. La transformación de la martensita ocurre casi instantáneamente porque no implica el proceso de difusión, sino un mecanismo de deslizamiento (esto es, deformación plástica), un fenómeno dependiente del tiempo que también es el mecanismo en otras transformaciones.



(a)



(b)

FIGURA 4.15 *(a)* Dureza de la martensita en función del contenido de carbono. *(b)* Microfotografía de martensita con 0.8% de carbono. Las regiones grises similares a placas son martensita; tienen la misma composición que la austenita original (regiones blancas). Aumento: 1000×.

El material sufre cambios de volumen debido a las diferencias de densidad resultantes de las transformaciones de fase. Por ejemplo, cuando la austenita se transforma en martensita su volumen disminuye (por lo que su densidad decrece) hasta en 4%. También ocurre una dilatación volumétrica similar, aunque más pequeña, cuando la austenita se transforma en perlita. Estas dilataciones y los gradientes térmicos presentes en una parte templada provocan esfuerzos internos en el cuerpo. Esto puede hacer que las partes sufran *distorsión* y que incluso se agrieten durante el tratamiento térmico; el **agrietamiento por temple** de los aceros es provocado por un rápido enfriamiento durante el tratamiento.

La distorsión es un cambio dimensional irreversible de una parte durante el tratamiento térmico. Es un término general y puede consistir en la distorsión del tamaño o de la forma. La *distorsión de tamaño* implica cambios en las dimensiones de la parte sin cambio en la forma, mientras que la *distorsión de forma* comprende doblez, torcido y cambios dimensionales asimétricos similares. Se puede reducir la distorsión mediante un control apropiado de los ciclos de calentamiento y enfriamiento, un diseño mejorado de la parte y un tratamiento térmico más localizado en la parte.

Austenita retenida. Si la temperatura a la que se enfría la aleación no es lo suficientemente baja, sólo una porción de la estructura se transforma en martensita. El resto es **austenita retenida**, que es visible como áreas blancas en la estructura junto con la martensita oscura, semejante a agujas. La austenita retenida puede ocasionar inestabilidad dimensional y agrietamiento, además de reducir la dureza y resistencia de la aleación.

Martensita revenida. La martensita se reviene para mejorar sus propiedades mecánicas. El **revenido** es un proceso de calentamiento mediante el cual se reduce la dureza y se mejora la tenacidad. La martensita tetragonal centrada en el cuerpo se calienta a una temperatura intermedia, entre 150 °C y 650 °C (300 °F a 1200 °F), donde se descompone en una microestructura de dos fases que consta de ferrita alfa cúbica centrada en el cuerpo y pequeñas partículas de cementita. Incrementando el tiempo y la temperatura de revenido, disminuye la dureza de la martensita revenida (fig. 4.16). La razón es que las partículas de cementita coalescen y crecen, y la distancia entre las partículas de la matriz de ferrita suave aumenta al disolverse las de carburo, que son más pequeñas y estables.

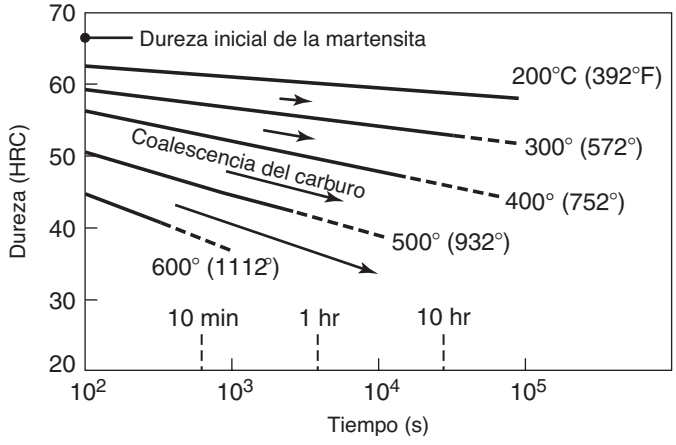
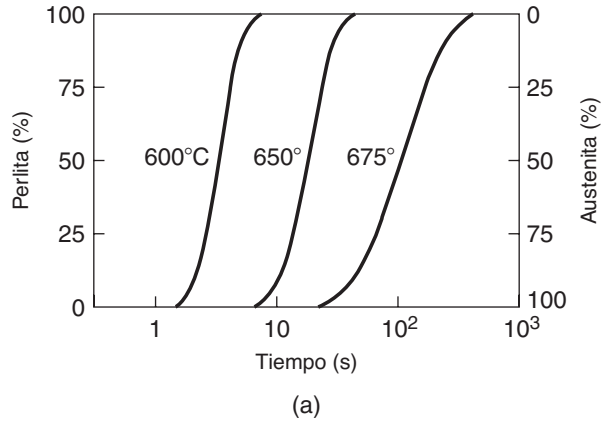


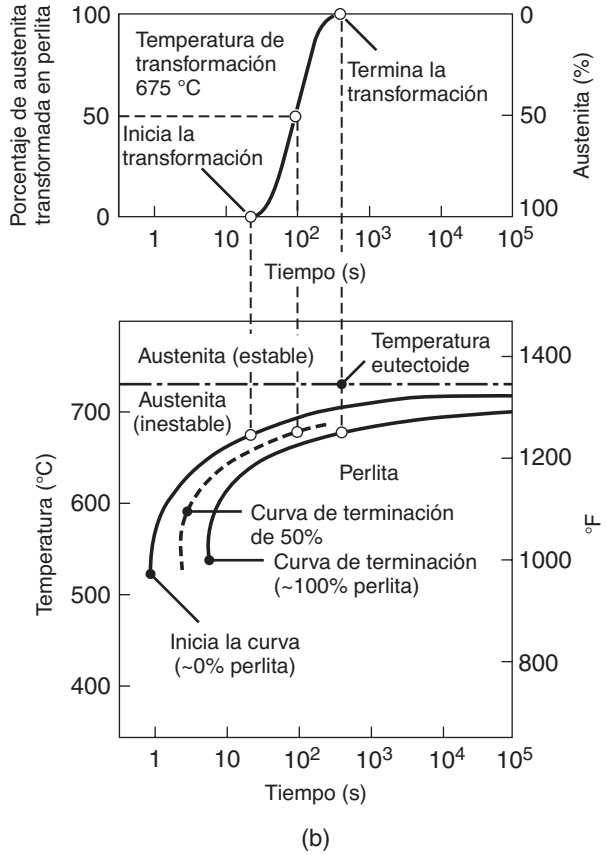
FIGURA 4.16 Dureza de la martensita revenida en función del tiempo de revenido para acero 1080 enfriado a 65 HRC. La dureza disminuye debido a que las partículas de carburo coalescen y crecen en tamaño, incrementando así la distancia entre partículas de la ferrita más suave.

4.7.1 Diagramas de transformación tiempo-temperatura

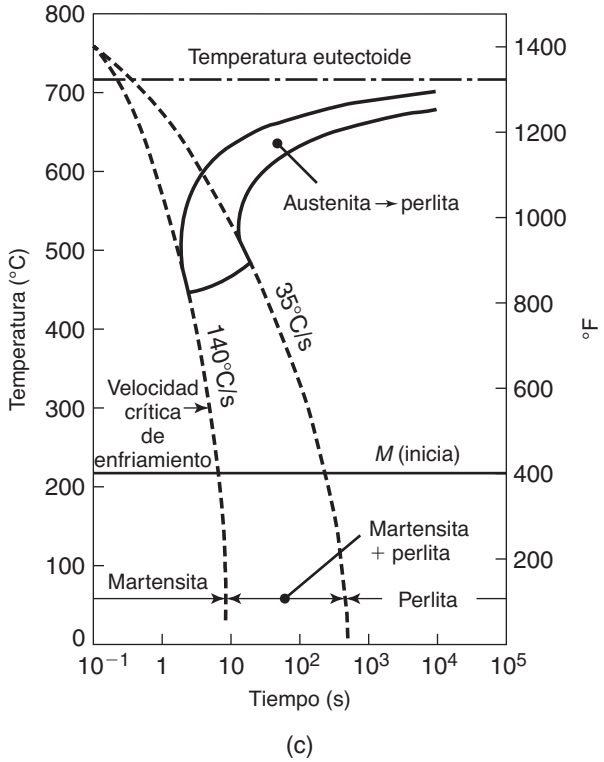
En las figuras 4.17b y c se ilustra mejor la transformación de austenita a perlita (entre otras estructuras). A estos diagramas se les llama **diagramas de transformación isotérmica** (IT), o *diagramas de tiempo-temperatura y transformación (TTT)*. Se construyen a partir de los datos dados en la figura 4.17a, que muestra el porcentaje de austenita trans-



(a)



(b)



(c)

FIGURA 4.17 *(a)* Transformación austenita a perlita de la aleación hierro-carbono en función del tiempo y la temperatura. *(b)* Diagrama de transformación isotérmica obtenido de *(a)* para una temperatura de transformación de 675 °C (1247 °F). *(c)* Microestructuras obtenidas para una aleación de hierro-carbono eutectoide en función de la velocidad de enfriamiento.

formada en perlita en función de la temperatura y del tiempo. A mayor temperatura o tiempo más largo, mayor será el porcentaje de austenita transformada en perlita. Obsérvese que en cada temperatura existe un tiempo mínimo para que comience la transformación. Este periodo define la velocidad crítica de enfriamiento; con tiempos más largos, la austenita comienza a transformarse en perlita. Esta metamorfosis se puede rastrear en las figuras 4.17b y c.

Los diagramas TTT mostrados permiten a los metalurgistas diseñar tablas de tratamiento térmico para obtener las microestructuras deseables. Por ejemplo, considérense las curvas TTT mostradas en la figura 4.17c. El acero se puede elevar a muy alta temperatura (arriba de la temperatura eutéctica) para iniciar con un estado de austenita. Si el material se enfría muy rápidamente, puede seguir la trayectoria de velocidad de enfriamiento de los 140 °C/s mostrada, que produce martensita total. En cambio, se puede enfriar con mayor lentitud en un baño de sal fundida para desarrollar aceros que contengan perlita o bainita. Si se desea martensita revenida, las etapas de calentamiento y enfriamiento van seguidas de un proceso de revenido.

Las diferencias en la dureza y tenacidad de las diversas estructuras obtenidas se muestran en la figura 4.18. La perlita fina es más dura y menos dúctil que la perlita gruesa. En la figura 4.19 se muestran los efectos de diferentes porcentajes de carbono, cementita y perlita en otras propiedades mecánicas de los aceros.

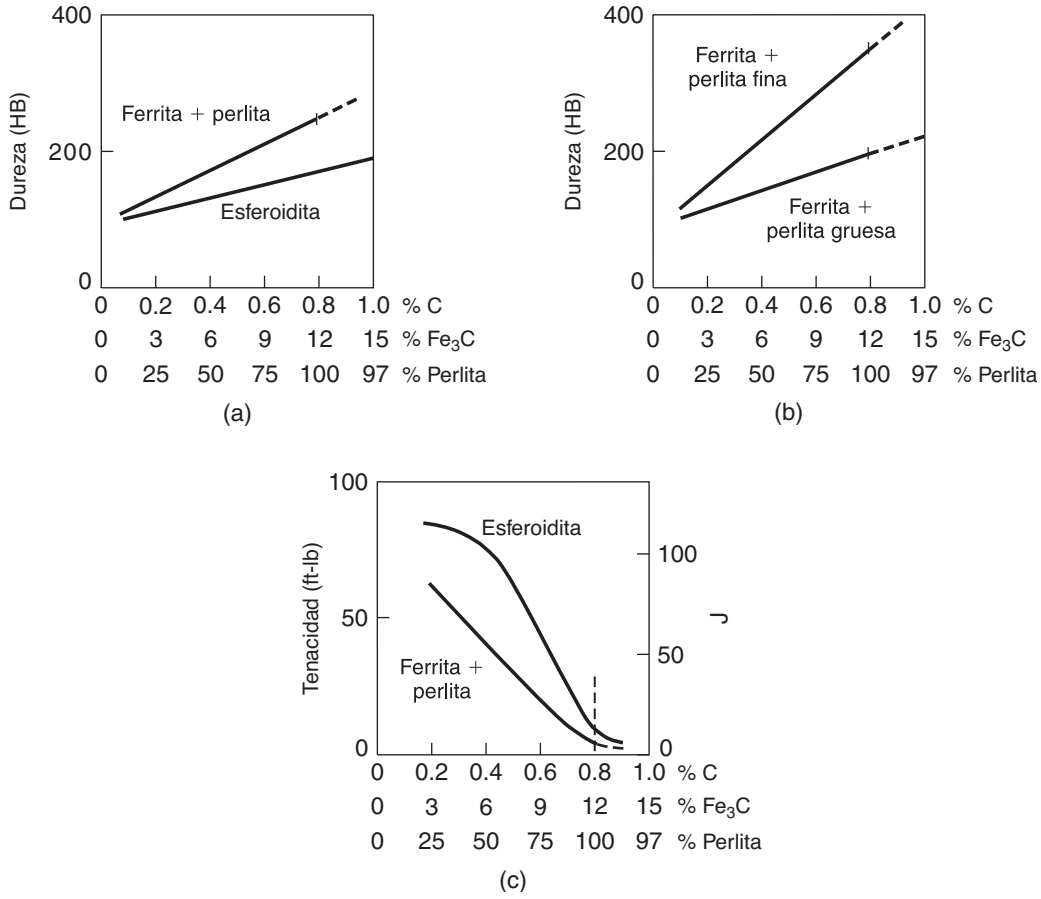


FIGURA 4.18 *(a* y *b)* Dureza y *(c)* tenacidad para los aceros simples al carbono recocidos en función de la forma del carburo. Los carburos en la perlita son laminares. La perlita fina se obtiene aumentando la velocidad de enfriamiento. La estructura de la esferoidita tiene partículas de carburo similares a esferas.

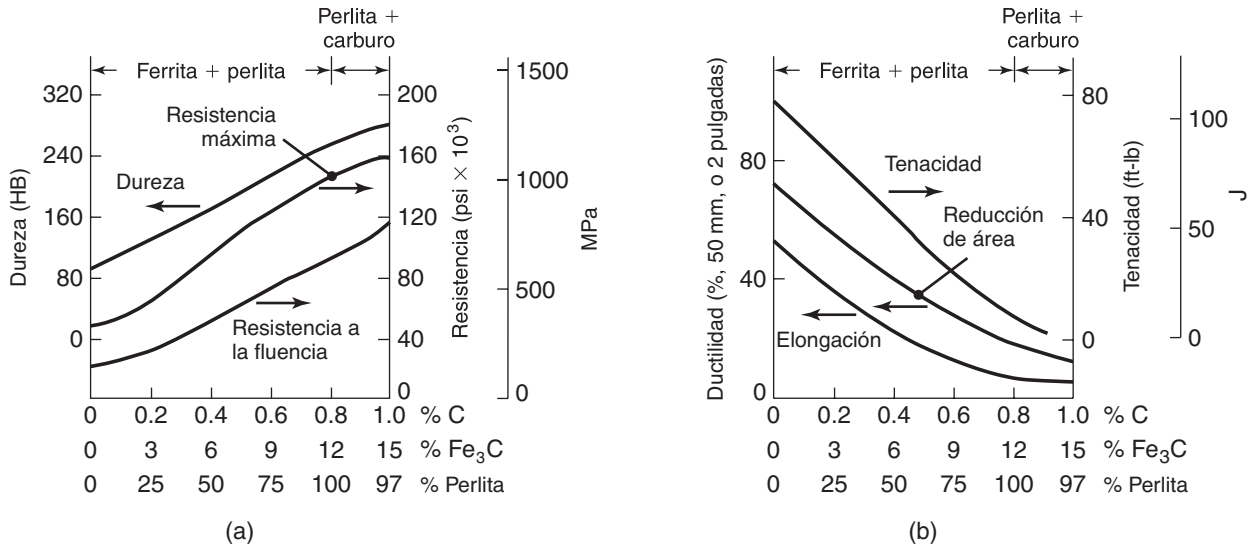


FIGURA 4.19 Propiedades mecánicas de los aceros recocidos en función de la composición y la microestructura. Obsérvese en *(a)* el incremento de dureza y resistencia, y en *(b)* la reducción de la ductilidad y la tenacidad con cantidades crecientes de perlita y carburo de hierro.

4.8 Templabilidad de las aleaciones ferrosas

A la capacidad de endurecimiento de una aleación por medio de tratamiento térmico se le llama **templabilidad**. Es una medida de la *profundidad* de la dureza que se puede obtener mediante calentamiento y enfriamiento posterior. El término "templabilidad" no debe confundirse con dureza, que es la resistencia de un material a la indentación o el rayado. Con base en lo visto hasta este punto, se puede ver que la templabilidad de las aleaciones ferrosas depende del contenido de carbono, el tamaño de grano de la austenita, los elementos de aleación presentes en el material y la velocidad de enfriamiento.

4.8.1 Prueba de templabilidad del extremo templado

En el comúnmente utilizado **ensayo de Jominy** (llamado así en honor de W. E. Jominy, 1893-1976), una barra redonda de prueba de 100 mm (4 pulgadas) de longitud, fabricada con una aleación particular, se **austeniza** (esto es, se calienta a la temperatura apropiada para formar 100% de austenita). Después se templa directamente en un extremo (fig. 4.20a) con una corriente de agua a 24 °C (75 °F). Entonces la velocidad de enfriamiento varía a todo lo largo de la barra, teniendo la mayor velocidad en el extremo menor que se encuentra en contacto con el agua. Después se mide la dureza a lo largo de la barra a diferentes distancias desde el extremo templado.

Como se esperaba de la discusión de los efectos de las velocidades de enfriamiento en la sección 4.7, la dureza decrece lejos del extremo templado de la barra (fig. 4.20b). A mayor profundidad de penetración de la dureza, mayor será la templabilidad de la aleación. Cada composición de la aleación tiene su **banda de templabilidad** particular. Obsérvese que la dureza en el extremo enfriado se incrementa al aumentar el contenido de carbono. Nótese además que los aceros 1040, 4140 y 4340 tienen el mismo contenido de carbono (0.40%) y, por lo tanto, la misma dureza (57 HRC) en el extremo templado.

Debido a que pequeñas variaciones en la composición y el tamaño de grano pueden afectar la forma de las curvas de templabilidad, hay que probar individualmente cada lote de cada aleación. Los datos se pueden graficar como una banda, más que como una simple curva. Las curvas de templabilidad son fundamentales para predecir la dure-

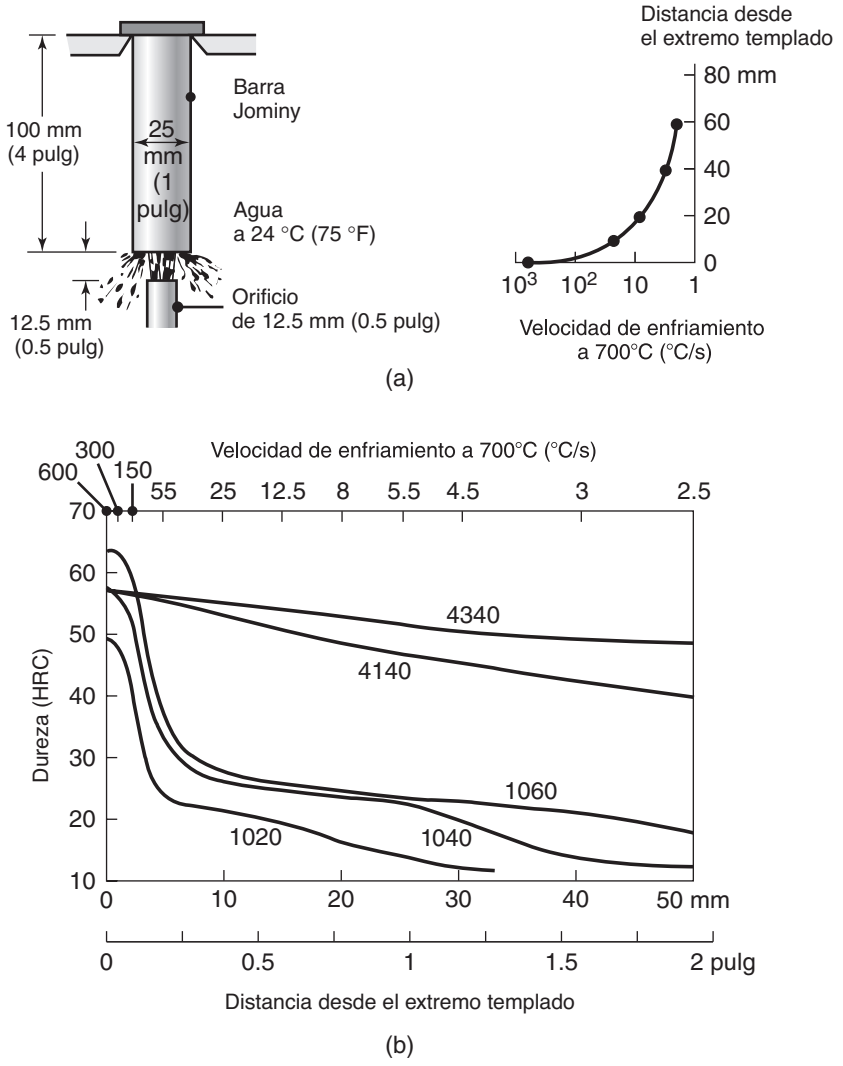


FIGURA 4.20 *(a)* Ensayo de temple del extremo y velocidad de enfriamiento. *(b)* Curvas de templabilidad para cinco aceros diferentes, obtenidos del ensayo del extremo templado. Pequeñas variaciones en la composición pueden cambiar la forma de estas curvas. En realidad cada curva es una banda, y su determinación exacta es importante en el tratamiento térmico de los metales, para mejor control de sus propiedades.

za de las partes tratadas térmicamente (como engranes, levas y otros componentes) en función de su composición.

4.8.2 Medios de temple

El fluido utilizado para templar la aleación calentada también tiene un efecto en la templabilidad. Por lo común, el temple se puede efectuar en agua, salmuera (agua salada), aceites, sales fundidas o aire. También se utilizan soluciones cáusticas, soluciones poliméricas y gases. Debido a las diferencias de conductividades térmicas, calores específicos y calores de vaporización de estos medios, también es diferente la velocidad de enfriamiento de la aleación (**severidad al temple**). En términos relativos y en orden decreciente, las capacidades de enfriamiento de varios medios de temple son las siguientes: salmuera agitada, 5; agua estancada, 1; aceite estancado, 0.3; gas frío, 0.1; aire estancado, 0.02.

La *agitación* también es un factor significativo en la velocidad de enfriamiento. Cuanto más vigorosa sea la agitación, mayor será dicha velocidad. En los aceros para herramientas, el medio de temple se especifica con una letra (ver tabla 5.5), como W para templado por agua, O para templado con aceite y A para templado con aire. La velocidad de enfriamiento también depende de la relación área-espesor, o área superficial-volumen de la parte. Cuanto mayor sea esta relación, mayor será la velocidad de enfriamiento. Entonces, por ejemplo, una placa gruesa se enfría más lentamente que una placa delgada con la misma área superficial. Estas consideraciones también son importantes en el enfriamiento de los metales y los plásticos en los procesos de fundición y de moldeo.

El agua es un medio común para el temple rápido. Sin embargo, el metal calentado puede formar una **capa de vapor** sobre sus superficies debido a las burbujas de vapor de agua que forma el líquido al hervir en la interfaz metal-agua. Esta capa crea una barrera para la conducción de calor debido a la baja conductividad térmica del vapor. Agitar el fluido o la parte ayuda a reducir o a eliminar la capa. También se puede rociar agua a presión sobre la parte. La salmuera es un medio efectivo de temple, ya que la sal ayuda a nuclear las burbujas en las interfaces, lo que mejora la agitación. Sin embargo, puede corroer la pieza.

Los **enfriadores poliméricos** se pueden utilizar para el temple de aleaciones ferrosas y no ferrosas, y por lo regular se están desarrollando nuevos enfriadores. Éstos tienen características de temple que, en general, se encuentran entre las del agua y las de los aceites de petróleo. Los enfriadores poliméricos típicos son el alcohol polivinílico, el óxido polialcalino, el polivinilo pirrolidona y el oxazolin polietílico. Estos enfriadores tienen ventajas como un mejor control de los resultados de la dureza, eliminación de humos y fuego (como los que ocurren cuando se utiliza aceite como enfriador) y la reducción de la corrosión (como la que sucede cuando se utiliza agua). La velocidad de temple se puede controlar variando la concentración de las soluciones.

4.9 Tratamiento térmico de las aleaciones no ferrosas y de los aceros inoxidables

Las aleaciones no ferrosas y algunos aceros inoxidables por lo común no se pueden tratar térmicamente con las técnicas utilizadas para las aleaciones ferrosas. La razón es que las aleaciones no ferrosas no sufren transformaciones de fase como las de los aceros; los mecanismos de endurecimiento y resistencia para estas aleaciones son fundamentalmente diferentes. Las aleaciones de aluminio y de cobre, los aceros inoxidables martensíticos y algunos otros aceros inoxidables a los que se puede dar tratamiento térmico, se endurecen y refuerzan mediante un proceso llamado **endurecimiento por precipitación**. Este tratamiento térmico es una técnica en la que pequeñas partículas (de una fase diferente y llamados **precipitados**) se dispersan de manera uniforme en la matriz de la fase original (fig. 4.3a). En este proceso, el precipitado se forma porque se excede la solubilidad sólida de un elemento (un componente de la aleación) en el otro.

En el endurecimiento por precipitación existen tres etapas; la mejor manera de describirlas es haciendo referencia al diagrama de fases del sistema aluminio-cobre (fig. 4.21a). Para una aleación con la composición 95.5% de Al-4.5% de Cu, existe una solución sólida substitucional de una sola fase (fase kapa) de cobre (soluto) en aluminio (solvente) entre 500 °C y 570 °C (930 °F y 1060 °F). Esta fase *kapa* es rica en aluminio, tiene una estructura fcc y es dúctil. Debajo de la temperatura más baja (esto es, debajo de la curva inferior de solubilidad) existen dos fases: *kapa* y *teta* (un compuesto intermetálico duro de $CuAl_2$). Esta aleación puede ser tratada térmicamente y sus propiedades se modifican mediante dos métodos diferentes: *tratamiento con solución* y *precipitación*.

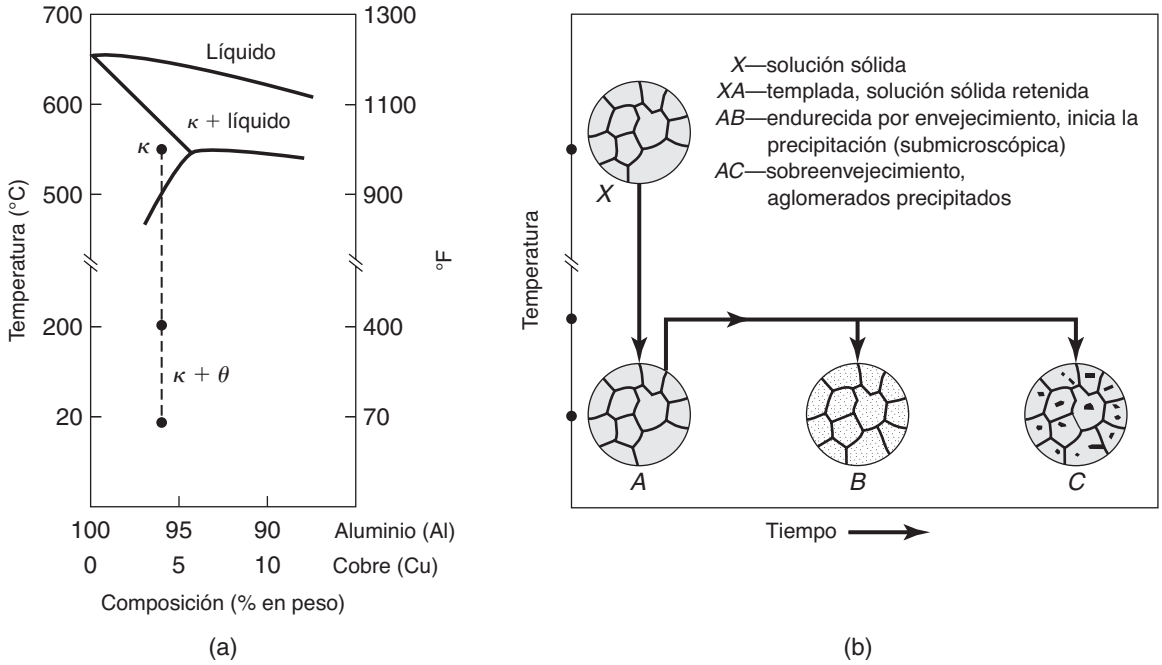


FIGURA 4.21 *(a)* Diagrama de fase para el sistema de la aleación aluminio-cobre. *(b)* Diversas microestructuras obtenidas durante el proceso de endurecimiento por envejecimiento.

4.9.1 Tratamiento con solución

En el **tratamiento con solución,** la aleación se calienta dentro de la fase kapa de la solución sólida, digamos 540 °C (1000 °F) y después se enfría rápidamente, por ejemplo en agua. La estructura obtenida poco después del enfriamiento (*A* en la fig. 4.21b) consiste sólo en la fase única kapa. Esta aleación tiene resistencia moderada y ductilidad considerable.

4.9.2 Endurecimiento por precipitación

La estructura obtenida en *A* en la figura 4.21b se puede hacer más fuerte mediante el **endurecimiento por precipitación**. La aleación se recalienta a una temperatura intermedia y se mantiene ahí por un periodo, durante el cual ocurre la precipitación. Los átomos de cobre se difunden a sitios de nucleación y se combinan con átomos de aluminio. Este proceso produce la fase teta, que forma precipitados submicroscópicos (mostrados en *B* por los puntos pequeños dentro de los granos de la fase kapa). Esta estructura es más fuerte que la de *A*, aunque menos dúctil. El incremento en resistencia se debe al aumento de resistencia al movimiento de las dislocaciones en la región de los precipitados.

Envejecimiento. Debido a que el proceso de precipitación es de tiempo y temperatura, también se le llama *envejecimiento*, y al mejoramiento de propiedades se le conoce como **endurecimiento por envejecimiento**. Si se efectúa por encima de la temperatura ambiente, al proceso se le llama **envejecimiento artificial**. Sin embargo, varias aleaciones de aluminio se endurecen y se vuelven más fuertes a través del tiempo a la temperatura ambiente; a este proceso se le llama **envejecimiento natural**. Dichas aleaciones primero se templan y después, si se desea, se les da forma mediante deformación plástica a temperatura ambiente. Al final, se les permite ganar resistencia y dureza mediante envejecimiento natural. Éste se puede hacer más lento refrigerando la aleación templada (**tratamiento criogénico**).

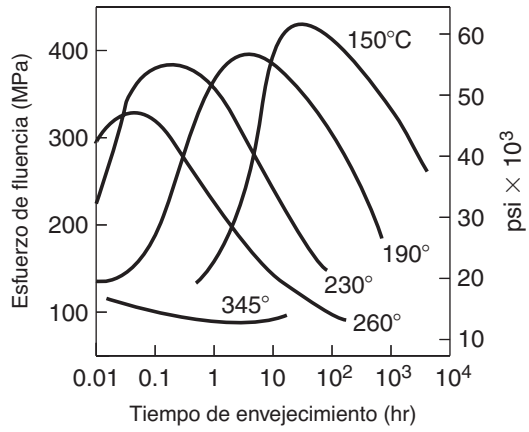


FIGURA 4.22 Efecto del tiempo de envejecimiento y de la temperatura en el esfuerzo de fluencia de la aleación de aluminio 2014-T4. Obsérvese que, en cada temperatura, existe un tiempo óptimo de envejecimiento para una resistencia máxima.

En el proceso de precipitación, si la aleación recalentada se mantiene a la temperatura elevada por un periodo largo, los precipitados comienzan a coalescer y crecer. Se vuelven más grandes, aunque más escasos, como muestran los puntos más grandes en *C* en la figura 4.21b. A este proceso se le llama **sobreenvejecimiento**, y la aleación resultante es más suave y débil.

Existe una relación óptima tiempo-temperatura en el proceso de envejecimiento que debe ser respetada para obtener las propiedades deseadas (fig. 4.22). Obviamente, una aleación envejecida sólo se puede utilizar hasta cierta temperatura máxima de servicio; en caso contrario, sobreenvejecerá y, por lo tanto, perderá su resistencia y dureza. Aunque más débil, una parte sobreenvejecida tiene mejor estabilidad dimensional.

N del RT Los aceros susceptibles a este tratamiento son conocidos como aceros martensítico-envejecidos.

Maraging[N del RT]**.** Este es un tratamiento de endurecimiento por precipitación para un grupo especial de aleaciones de base hierro de alta resistencia. La palabra *maraging* se deriva de *endurecimiento de martensita por envejecimiento* (según la descripción en inglés: *martensite age hardening*). En este proceso, uno o más compuestos intermetálicos se precipitan en una matriz de martensita de bajo carbono. Un acero típicamente maraging puede contener 18% de Ni, además de otros elementos, y el envejecimiento se termina a 480 °C (900 °F). El endurecimiento por maraging no depende de la velocidad de enfriamiento; en consecuencia, se puede obtener una dureza uniforme y plena a lo largo de grandes piezas con una distorsión mínima. Los usos característicos de los aceros maraging son en matrices y herramental para fundición, moldeo, forjado y extrusión (partes II y III).

4.10 Endurecimiento superficial

Los procesos de tratamiento térmico descritos hasta este punto comprenden alteraciones microestructurales y cambios de propiedades en *volumen* del material o del componente mediante un *endurecimiento completo*. No es deseable endurecer partes completas porque una parte dura adolece de la tenacidad necesaria para estas aplicaciones; una pequeña grieta en la superficie se podría propagar con rapidez por toda la parte y provocar una falla total. Sin embargo, en muchos casos es deseable la alteración exclusiva de las *propiedades superficiales* de una parte (y de ahí el término *endurecimiento superficial*). Este método es particularmente útil para mejorar la resistencia a la indentación, fatiga y desgaste de la superficie. Las aplicaciones características del endurecimiento superficial son los dientes de engranes, levas, flechas, rodamientos, sujetadores, pernos, placas de embragues automovilísticos, herramientas y matrices.

Existen varios procesos de endurecimiento superficial (tabla 4.1):

a. **Carburizado** (gas, líquido y carburizado en caja)
b. **Carbonitrurado**
c. **Cianurado**
d. **Nitrurado**
e. **Borurado**
f. **Endurecimiento a la flama**
g. **Endurecimiento por inducción**
h. **Endurecimiento por láser**

Básicamente, éstas son operaciones en las que el componente se calienta en una atmósfera que contiene elementos (como carbono, nitrógeno o boro) que alteran la composición, microestructura y propiedades de las superficies. Para los aceros con un contenido suficientemente alto de carbono, el endurecimiento superficial ocurre sin el uso de estos elementos adicionales. Sólo se necesitan los procesos de tratamiento térmico descritos en la sección 4.7 para alterar las microestructuras, por lo común mediante endurecimiento a la flama o por inducción, como se indica en la tabla 4.1.

Los **rayos láser** y los **haces de electrones** (secciones 27.6 y 27.7) también se utilizan para endurecer superficies pequeñas y grandes, como engranes, válvulas, punzones y cilindros de locomotoras. Estos métodos también se utilizan para endurecimiento total de partes relativamente pequeñas. Las principales ventajas del endurecimiento superficial mediante rayo láser son un riguroso control de la alimentación de potencia, baja distorsión y la capacidad de llegar a áreas que serían inaccesibles por otros medios. Sin embargo, los costos del capital pueden ser elevados y por lo común la profundidad de endurecimiento de la capa superficial es menor que 2.5 mm (0.1 pulgada).

Ya que el endurecimiento superficial es un tratamiento térmico localizado, las partes endurecidas superficialmente tienen un gradiente de dureza. En general, la dureza es máxima en la superficie y disminuye debajo de ella, con un índice de reducción que depende de la composición del metal y las variables del proceso. Las técnicas de endurecimiento superficial también se pueden utilizar para *revenido* (sección 4.11) a fin de modificar las propiedades de superficies que han sido sometidas a tratamiento térmico. Otros procesos y técnicas de endurecimiento superficial, como el granallado y el laminado superficial, mejoran la resistencia al desgaste y otras características.

La **descarburización** es el fenómeno en el cual las aleaciones que contienen carbono lo pierden por sus superficies a consecuencia del tratamiento térmico o del trabajo en caliente en un medio (usualmente oxígeno) que reacciona con el carbono. La descarburización es indeseable porque afecta la templabilidad de las superficies de la parte al reducir su contenido de carbono. También afecta de manera adversa la dureza, resistencia y vida útil de los aceros al reducir de modo significativo su límite de fatiga. La mejor manera de evitar la descarburización es procesarlas en una atmósfera inerte o en vacío, o mediante el uso de baños de sales neutras durante el tratamiento térmico.

4.11 Recocido

Recocido es un término general utilizado para describir la restauración de una aleación trabajada en frío o tratada térmicamente en sus propiedades originales. Por ejemplo, el recocido se puede utilizar para aumentar la ductilidad (y de ahí su formabilidad) y reducir la dureza y la resistencia, o para modificar su microestructura. El proceso de recocido también se utiliza para relevar esfuerzos residuales en una parte manufacturada, así como para mejorar la maquinabilidad y la estabilidad dimensional. El término recocido también se aplica al tratamiento térmico de vidrios y productos similares, fundiciones y piezas soldadas.

TABLA 4.1

Descripción de los procesos de tratamiento térmico para endurecimiento superficial

Proceso	Metales endurecidos	Elemento agregado a la superficie	Procedimiento	Características generales	Aplicaciones características
Carburizado	Acero de bajo carbono (0.2% C), aceros aleados (0.08-0.2% C)	C	Calentar el acero a 870–950°C (1600–1750°F) en una atmósfera de gases carbonosos (carburizado por gas) o sólidos que contienen carbono (carburizado en caja). Después se enfría.	Se produce una superficie dura, con alto carbono. Dureza 55 a 65 HRC. Profundidad de endurecimiento <0.5-1.5 mm (<0.020 a 0.060 pulgadas). Alguna distorsión de la parte durante el tratamiento térmico.	Engranes, levas, flechas, rodamientos, pernos para pistones, catarinas, placas de embragues.
Carbonitrurado	Acero de bajo carbono	C y N	Calentar el acero a 700–800°C (1300–1600°F) en una atmósfera carbonosa y de amoniaco. Después templar en aceite.	Dureza superficial 55 a 62 HRC. Profundidad de endurecimiento 0.07 a 0.5 mm (0.003 a 0.020 pulgadas). Menor distorsión que en el carburizado.	Pernos, tuercas, engranes.
Cianurado	Acero de bajo carbono(0.2% C), aceros aleados (0.08-0.2% C)	C y N	Calentar el acero a 760–845°C (1400–1550°F) en un baño fundido de soluciones de cianuro (por ejemplo, 30% de cianuro de sodio) y otras sales.	Dureza superficial hasta de 65 HRC. Profundidad de endurecimiento de 0.025 a 0.25 mm (0.001 a 0.10 pulgadas). Alguna distorsión.	Pernos, tuercas, tornillos, engranes pequeños.
Nitrurado	Aceros (1% Al, 1.5% Cr, 0.3% Mo), aceros aleados (Cr, Mo), aceros inoxidables, aceros de alta velocidad para herramientas	N	Calentar el acero a 500–600°C (925–1100°F) en una atmósfera de gas amoniaco o mezclas de sales fundidas de cianuro. No es necesario tratamiento posterior.	Dureza superficial hasta de 1100 HV. Profundidad de endurecimiento 0.1 a 0.6 mm (0.005 a 0.030 pulgadas) y 0.02 a 0.07 mm (0.001 a 0.003 pulgadas) para acero de alta velocidad.	Engranes, flechas, catarinas, válvulas, cortadores, barras de mandrinado, partes para bombas de inyección de combustible.
Borurado	Aceros	B	Se calienta la parte utilizando gases o sólidos que contengan boro en contacto con la parte.	Superficie extremadamente dura y resistente al desgaste. Profundidad de endurecimiento 0.025 a 0.075 mm (0.001 a 0.003 pulgadas).	Aceros para herramientas y matrices.
Endurecimiento a la flama	Aceros de medio carbono, hierros fundidos	Ninguno	Se calienta la superficie con un soplete de oxiacetileno, después se templa con rocío de agua u otros métodos de enfriado.	Dureza superficial de 50 a 60 HRC. Profundidad de endurecimiento de 0.7 a 6 mm (0.030 a 0.25 pulgadas). Pequeñas distorsiones.	Dientes de engranes y catarinas, ejes, cigüeñales, bielas, bancadas y puntos de tornos.
Endurecimiento por inducción	Igual que el anterior	Ninguno	La parte metálica se coloca en devanados de inducción de cobre y se calienta mediante corriente de alta frecuencia, después se templa.	Igual que el anterior.	Igual que el anterior.

El proceso de recocido consta de los siguientes pasos:

1. Calentamiento de la pieza de trabajo hasta un intervalo específico de temperaturas en un horno.
2. Mantenimiento de la pieza a esa temperatura por cierto periodo (*empape*).
3. Enfriamiento en aire o en un horno.

El proceso de recocido puede efectuarse en una atmósfera inerte o controlada, o a temperaturas más bajas para evitar o minimizar la oxidación de la superficie.

Una *temperatura de recocido* puede ser mayor que la temperatura de recristalización del material, lo que depende del grado de trabajo en frío. Por ejemplo, la temperatura de recristalización del cobre varía de 200 °C a 300 °C (400 °F a 600 °F), mientras que la temperatura de recocido necesaria para recuperar totalmente las propiedades originales varía de 260 °C a 650 °C (500 °F a 1200 °F), según el grado de trabajo previo en frío (ver también sección 1.6). **Recocido total** es un término aplicado al recocido de las aleaciones ferrosas. El acero se calienta por encima de A_1 o A_3 (fig. 4.23) y el enfriamiento se realiza con lentitud (comúnmente a 10 °C (20 °F) por hora) en un horno después de apagarlo. La estructura obtenida mediante el recocido completo es perlita gruesa, que es suave y dúctil y tiene granos pequeños y uniformes.

Para evitar la suavidad excesiva del recocido de los aceros, el ciclo de enfriamiento se puede realizar totalmente en aire calmado. A este proceso se le llama **normalizado**, para indicar que la parte se calienta a una temperatura por encima de A_3 o A_{cm} para transformar la estructura en austenita. Los resultados del normalizado son una resistencia y una dureza más elevadas, y una menor ductilidad que la que proporciona el recocido completo (fig. 4.24). La estructura obtenida es perlita fina, con granos pequeños y uniformes. En general, el normalizado se efectúa para refinar la estructura del grano, obtener una estructura uniforme (homogeneización), disminuir los esfuerzos residuales y mejorar la maquinabilidad. La estructura del esferoidizado, y del procedimiento para obtenerlo, se describió en la sección 4.7 y se mostró en las figuras 4.14 y 4.24. El *recocido de esferoidización* mejora la capacidad de trabajo en frío y la maquinabilidad de los aceros.

Recocido de proceso. Durante el *recocido de proceso* (también llamado *recocido intermedio*, *recocido subcrítico* o *recocido en proceso*), la pieza de trabajo se recoce para restaurar su ductilidad, parte de o toda, la cual puede haberse agotado mediante el endurecimiento por trabajo durante el trabajado en frío. Después, la parte se puede trabajar

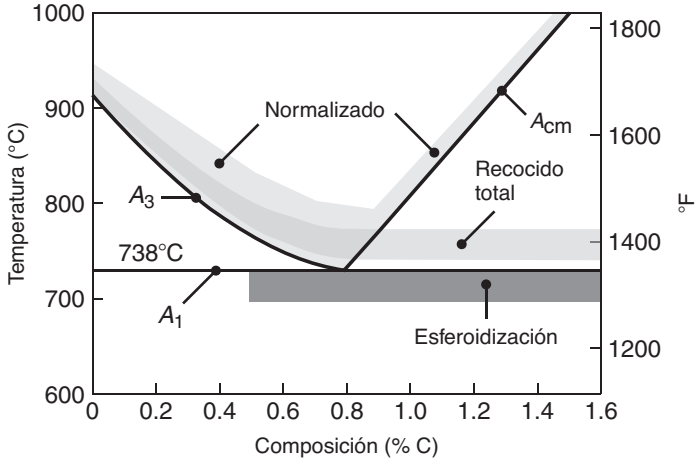


FIGURA 4.23 Intervalos de temperatura de tratamiento térmico para aceros simples al carbono, indicados en el diagrama de fases hierro-carburo de hierro.

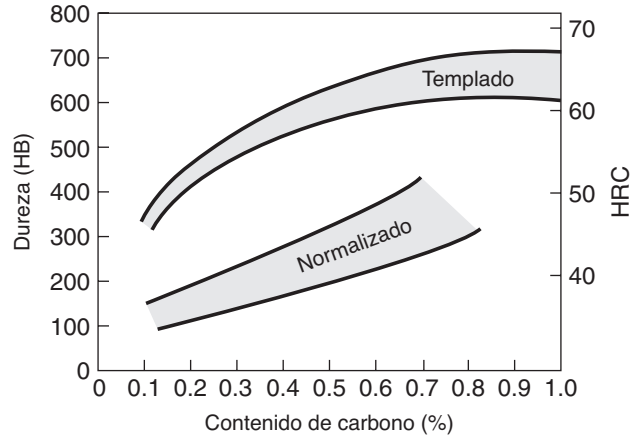


FIGURA 4.24 Dureza de los aceros en condiciones de templado y normalizado en función del contenido de carbono.

adicionalmente hasta obtener la forma deseada. Si la temperatura es alta o el tiempo de recocido es largo, puede producir el crecimiento del grano, con efectos adversos sobre la formabilidad de las partes recocidas.

Recocido para relevado de esfuerzos. En general, para reducir o eliminar los esfuerzos residuales, la pieza de trabajo se somete a *recocido para relevado de esfuerzos* (o simplemente a un **relevado de esfuerzos**). La temperatura y el tiempo requerido para este proceso dependen del material y de la magnitud de los esfuerzos residuales presentes. Los esfuerzos residuales pueden haber sido inducidos durante el formado, maquinado o algunos otros procesos, u originados por cambios de volumen durante las transformaciones de fase.

Para los aceros, la parte no se calienta hasta A_1 en la figura 4.23 para evitar las transformaciones de fase. En general, se emplea el enfriamiento lento (como ocurre en el aire calmado). El relevado de esfuerzos promueve la estabilidad dimensional en situaciones en las que un relajamiento posterior de esfuerzos residuales puede provocar distorsión de la parte cuando está en servicio por un periodo. También reduce la tendencia al agrietamiento por esfuerzos-corrosión (secciones 2.10 y 3.8).

Revenido. Si los aceros se endurecen mediante tratamiento térmico, entonces se utiliza el **revenido** para reducir la fragilidad y los esfuerzos residuales y aumentar la ductilidad y la tenacidad. El término revenido también se utiliza para los vidrios (sección 18.4). En el revenido, el acero se calienta a una temperatura específica (lo que depende de su composición) y después se enfría una velocidad prescrita. En la figura 4.25 se muestran los resultados del revenido para un acero AISI 4340 enfriado en aceite. Los aceros aleados pueden sufrir una **fragilización por revenido**, originada por la segregación de impurezas a lo largo de los límites de los granos a temperaturas entre 480 °C y 590 °C (900 °F y 1100 °F).

Bainitizado. En el bainitizado, también conocido como *austemperizado*, el acero calentado se enfría con rapidez desde la temperatura de austenización para evitar la formación de ferrita o de perlita. Se mantiene a cierta temperatura hasta que se termina la transformación isotérmica de austenita a bainita. Después se enfría a la temperatura am-

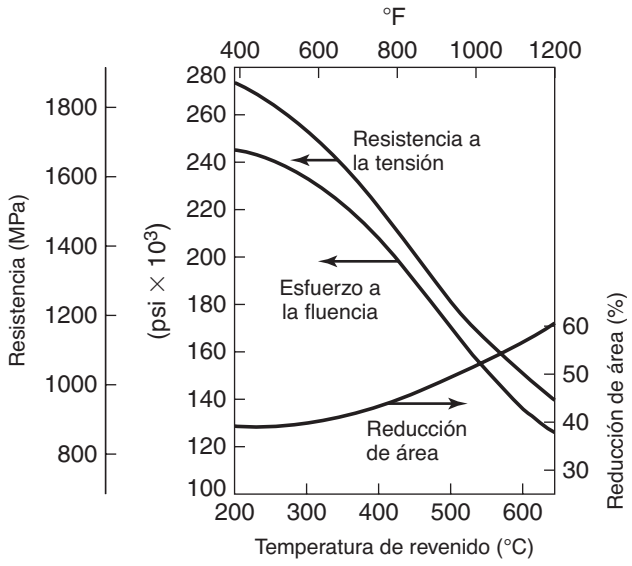


FIGURA 4.25 Propiedades mecánicas de acero 4340 templado en aceite en función de la temperatura de revenido.

biente, por lo común en aire calmado y a una velocidad moderada para evitar gradientes térmicos dentro de la parte. El medio de enfriamiento más utilizado es la sal fundida, a temperaturas que van de 160 °C a 750 °C (320 °F a 1380 °F).

Con frecuencia, el bainitizado se sustituye por enfriado y revenido convencional, ya sea para reducir la tendencia al agrietamiento y distorsión durante el temple, o para mejorar la ductilidad y la tenacidad manteniendo la dureza. Debido al ciclo de tiempo más reducido que éste implica, el proceso también es económico para muchas aplicaciones. En el **bainitizado modificado** se obtiene una estructura mixta de perlita y bainita. El mejor ejemplo de esta práctica es el **patentado**, que proporciona alta ductilidad y una resistencia moderadamente alta, como en un patentado de alambre (sección 15.8).

Temple interrumpido (martemplado). En el *temple interrumpido*, primero se templa el acero o el hierro fundido desde la temperatura de austenización en un medio fluido caliente, como aceite caliente o sal fundida. Después, se mantiene a esa temperatura hasta que es uniforme en toda la parte; luego se enfría a velocidad moderada, como en aire, para evitar gradientes excesivos de temperatura dentro de la parte. Por lo común la parte se reviene después, porque en caso contrario la estructura obtenida es fundamentalmente martensita no revenida y, por lo tanto, no resulta adecuada para la mayoría de las aplicaciones. Los aceros martemplados tienen menos tendencia al agrietamiento, distorsión, o a desarrollar esfuerzos residuales durante el tratamiento térmico. En el **temple interrumpido modificado**, la temperatura de templado es menor, y por ende, la velocidad de enfriamiento es mayor. El proceso es adecuado para aceros con una templabilidad menor.

Ausformado. En el *ausformado* (también llamado **procesamiento termomecánico**), el acero se adapta a las formas deseadas dentro de intervalos controlados de temperatura y tiempo para evitar la formación de productos de transformación no martensítica. Después se enfría la parte a diversas velocidades para obtener las microestructuras deseadas. Las partes ausformadas tienen propiedades mecánicas superiores.

EJEMPLO 4.1 Tratamiento térmico de una matriz o dado para extrusión

El tratamiento térmico de las partes para obtener cierta dureza implica considerar varios factores con respecto al material y las propiedades deseadas. El proceso de tratamiento térmico específico tiene que planearse cuidadosamente y a menudo requiere experiencia considerable, como se indica en este ejemplo.

Una matriz para extrusión en caliente (ver sección 15.3) de 200 mm (8 pulgadas) de diámetro, 75 mm (3 pulgadas) de largo y con un orificio redondo de 75 mm, está fabricada de acero H21 trabajado en caliente (ver tablas 5.6 y 5.7). Un método característico para tratar térmicamente una matriz como ésta para extrusión en caliente de metales se describe a continuación:

1. Precalentar la matriz entre 815 °C y 845 °C , ya sea en una atmósfera ligeramente oxidante o en una sal neutral.
2. Transferirla a un horno que opere a 1175 °C en una atmósfera reductora de 6 a 12%, o en un baño de sal neutral; mantener en el horno por aproximadamente 20 minutos después de que la matriz haya alcanzado 1175 °C.
3. Enfriar en aire calmado a aproximadamente 65 °C.
4. Revenir a 565 °C por cuatro horas.
5. Enfriar hasta cerca de la temperatura ambiente.
6. Revenir nuevamente a 650 °C por cuatro horas.
7. Enfriar la matriz en aire

Fuente: Cortesía de ASM International.

4.12 Hornos y equipo para tratamiento térmico

Se utilizan dos tipos básicos de hornos para tratamiento térmico: los **hornos por lotes** y los **hornos continuos**. Debido a que consumen grandes cantidades de energía, su aislamiento y eficiencia son factores de diseño que deben considerarse, así como su costo inicial, el personal necesario para su operación y mantenimiento, y la seguridad durante su uso.

La temperatura uniforme y el control preciso de los ciclos de temperatura-tiempo son importantes. Los hornos modernos están equipados con diversos controles electrónicos, entre ellos sistemas controlados por computadora, programados para correr repetidamente un ciclo completo de tratamiento térmico y con una precisión reproducible. Por lo común los combustibles del sistema de calentamiento son gas, petróleo o electricidad (para el calentamiento por resistencia o por inducción). El tipo de combustible utilizado afecta la atmósfera del horno. A diferencia del calentamiento eléctrico, el gas o el petróleo introducen productos de la combustión en el horno (una desventaja). Sin embargo, el calentamiento eléctrico tiene un tiempo de arranque más lento y es más difícil de ajustar y controlar.

Hornos por lotes. En un horno por lotes, las partes a tratar térmicamente se introducen y sacan del horno en lotes individuales. El horno consiste básicamente en una cámara aislada, un sistema de calentamiento y una puerta, o puertas, de acceso. Los hornos por lotes son de los tipos básicos siguientes:

- El **horno de caja** es una cámara rectangular horizontal con una o dos puertas de acceso a través de las cuales se introducen las partes. Este tipo de horno es de uso común y versátil, de fabricación y manejo simples, disponible además en varios tamaños. Una variación de este tipo es el **horno de plataforma móvil**. Las partes a

tratar térmicamente, en general largas o grandes, se introducen en una carretilla plana que se mueve sobre rieles dentro del horno.

- El **horno de fosa** es una fosa vertical debajo del nivel del suelo, al que se bajan las partes. Este tipo de horno es particularmente adecuado para partes largas (como varillas, flechas y tubería), ya que se pueden suspender por un extremo y (en consecuencia) es menos probable que se alabeen durante el proceso que si se colocan en forma horizontal dentro de una mufla.
- El **horno tipo campana** es una mufla redonda o rectangular sin fondo y se baja sobre las partes apiladas que se van a tratar térmicamente. Este tipo de horno es adecuado para rollos de alambre y hojas metálicas.
- El **horno de elevador** se utiliza para colocar las partes a tratar térmicamente sobre la plataforma de un carro, se ruedan hasta la posición y después se elevan dentro del horno. Este tipo de horno ahorra espacio en la planta y puede ser adecuado para aleaciones metálicas que tienen que enfriarse con rapidez, ya que se puede colocar un tanque de enfriamiento directamente debajo del horno.

Hornos continuos. En este tipo de horno, las partes a tratar térmicamente se mueven con frecuencia a través del horno sobre transportadores de diversos diseños que utilizan charolas, bandas, cadenas y otros mecanismos. Los hornos continuos son adecuados para corridas de alta producción, y se pueden diseñar y programar para realizar ciclos completos de tratamiento térmico con un control estricto.

Hornos de baño de sales. Debido a sus altas velocidades de calentamiento y mejor control de la uniformidad de la temperatura, los *baños de sales* se utilizan comúnmente en diversas operaciones de tratamiento térmico, en particular para tiras y alambres no ferrosos. Las velocidades de calentamiento son elevadas por la mayor conductividad térmica de las sales líquidas, en comparación con la del aire o de los gases. Dependiendo de la conductividad eléctrica de la sal, el calentamiento puede ser externo (para sales no conductoras) o mediante electrodos inmersos o sumergidos por medio de una corriente alterna de bajo voltaje. No se puede utilizar corriente directa porque somete la sal a electrólisis. Existen baños de sales para una amplia variedad de temperaturas. También se puede utilizar plomo como medio de calentamiento.

Lecho fluidizado. En una cámara se calientan y suspenden partículas sólidas secas, finas y sueltas (en general óxido de aluminio) mediante un flujo hacia arriba de gas caliente a diferentes velocidades. Las partes a tratar térmicamente se colocan entonces dentro de las partículas flotantes, de ahí el término de *lecho fluidizado*. Debido a la agitación constante, el sistema es eficiente, la distribución de la temperatura es uniforme y la capacidad de transferencia de calor es elevada. Estos hornos se utilizan para diversas aplicaciones del tipo por lotes.

Calentamiento por inducción. En este método, la parte se calienta con rapidez mediante un campo electromagnético generado por un *devanado de inducción* que conduce una corriente alterna, la cual induce corrientes de eddy en la parte. El devanado, al que se puede dar forma para ajustarse al contorno de la parte a tratar térmicamente (fig. 4.26), está hecho de cobre o de una aleación de base cobre; por lo común se enfría con agua y puede diseñarse tanto para enfriar como para calentar la parte. El calentamiento por inducción es deseable para tratamiento térmico localizado, como el requerido para dientes de engranes, levas y partes similares.

Atmósfera de los hornos. La atmósfera de los hornos se puede controlar para evitar (o provocar) la oxidación, deslustrado y descarburización de aleaciones ferrosas calentadas a temperaturas elevadas. El oxígeno provoca oxidación (corrosión, herrumbre y

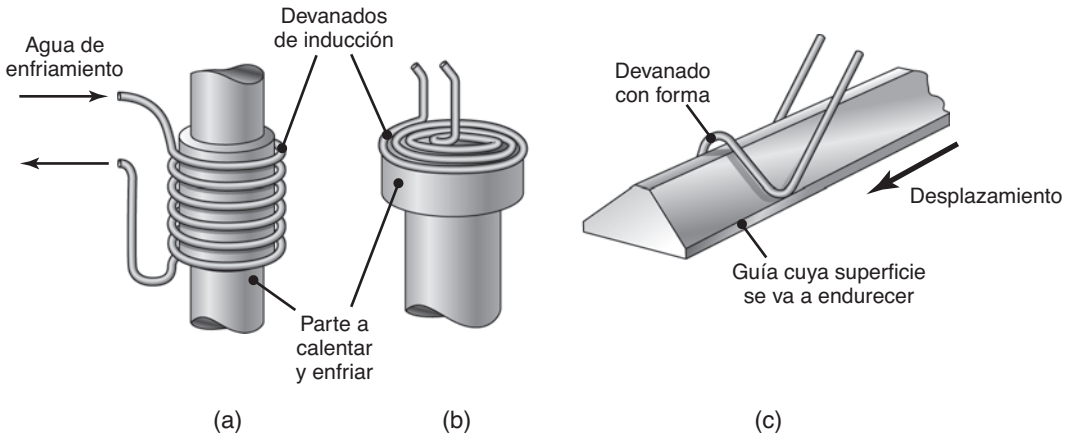


FIGURA 4.26 Tipos de devanados utilizados en el calentamiento por inducción de diversas superficies de partes.

descascarado). El bióxido de carbono tiene diversos efectos; puede ser neutro o descarburizante, lo que depende de su concentración en la atmósfera del horno. El vapor de agua en el horno oxida los aceros, lo que produce un color azul. El nitrógeno es una atmósfera neutra común, y el vacío proporciona una atmósfera totalmente neutral. El término **azulado** se utiliza para describir la formación de una delgada película azul de óxido sobre las partes terminadas para mejorar su apariencia y su resistencia a la oxidación.

4.13 | Consideraciones de diseño para el tratamiento térmico

Además de los factores metalúrgicos, el tratamiento térmico satisfactorio implica factores de diseño que deben considerarse para evitar problemas como el agrietamiento, la distorsión y la falta de uniformidad de las propiedades a lo largo de la parte tratada térmicamente. La velocidad de temple debe ser uniforme, sobre todo en formas complejas que tienen secciones transversales y espesores variables; esta falta de uniformidad puede producir severos gradientes de temperatura en la parte y también llevar a variaciones en la contracción, lo que produce esfuerzos térmicos que podrían ocasionar agrietamiento de la parte; además, el temple no uniforme causa esfuerzos residuales en la parte que pueden llevar a agrietamiento por esfuerzo-corrosión. El método seleccionado para templar, el cuidado al realizarlo, la selección y un medio apropiado de temple y temperatura son, en consecuencia, factores que hay que considerar.

Como guía general de diseño de las partes para tratamiento térmico, deben evitarse las esquinas agudas, internas o externas; en caso contrario, las concentraciones de esfuerzos en ellas pueden elevar el nivel de esfuerzos lo suficiente para provocar agrietamiento. La parte debe tener un espesor tan uniforme como sea posible; de igual manera, la transición entre regiones de diferente espesor debe ser gradual. Es posible que sea difícil tratar térmicamente las partes con orificios, ranuras, chaveteros, estrías y formas asimétricas, ya que se pueden agrietar durante el temple. Las superficies grandes con secciones transversales delgadas pueden alabearse. Las forjas en caliente y los productos de acero laminado en caliente pueden tener una **superficie descarburada** (pérdida de carbono, sección 4.10); en consecuencia, tal vez no respondan de modo satisfactorio al tratamiento térmico.

RESUMEN

- En general, los metales comercialmente puros no tienen suficiente resistencia para la mayoría de las aplicaciones de ingeniería; deben alearse con diversos elementos que alteran sus estructuras y propiedades. Conceptos importantes en la aleación son la solubilidad de los elementos de aleación en un metal base y las fases presentes a diferentes intervalos de temperatura y composición.
- Básicamente, las aleaciones tienen dos formas: las soluciones sólidas y los compuestos intermetálicos. Las soluciones sólidas pueden ser substitucionales o intersticiales. Existen ciertas condiciones relativas a la estructura cristalina y al radio atómico que deben cumplirse para desarrollar estas estructuras.
- Los diagramas de fases muestran las relaciones entre la temperatura, la composición y las fases presentes en un sistema de aleación en particular. Al disminuir la temperatura a diferentes velocidades, diversas transformaciones ocurren en las microestructuras, que tienen características y propiedades variables. Entre los sistemas binarios, el más importante es el sistema hierro-carbono, que incluye una amplia gama de aceros y hierros fundidos. Los componentes esenciales en este sistema son la ferrita, la austenita y la cementita. Los tipos básicos de hierros fundidos son el hierro gris, el dúctil (nodular), el blanco, el maleable y el de grafito compactado.
- Los mecanismos para endurecimiento y resistencia de las aleaciones metálicas implican el calentamiento de la aleación y, posteriormente, su temple a diferentes velocidades de enfriamiento. El resultado es que se efectúan importantes transformaciones de fase, produciendo estructuras como la perlita (fina o gruesa), la esferoidita, la bainita y la martensita. El tratamiento térmico de las aleaciones no ferrosas y los aceros inoxidables comprende el tratamiento en solución y el endurecimiento por precipitación.
- El control de la atmósfera del horno, los enfriadores utilizados, las características del equipo y la forma de las partes a tratar térmicamente son factores que se deben considerar. La templabilidad es la capacidad de una aleación para endurecerse por medio de tratamiento térmico. La prueba de templabilidad del extremo templado (Jominy) es un método muy utilizado para determinar las bandas de templabilidad de las aleaciones.
- El endurecimiento superficial es un proceso importante para mejorar la resistencia de las partes al desgaste y a la fatiga. Existen varios métodos, entre ellos la carburización, la nitruración, el endurecimiento por inducción y el endurecimiento por rayo láser.
- El recocido incluye varios procesos alternativos (normalizado, recocido de proceso, relevado de esfuerzos, revenido, bainitizado y temple interrumpido), cada uno con el propósito de mejorar la ductilidad y tenacidad de las partes tratadas térmicamente.

TÉRMINOS CLAVE

Aleación
Austenita
Bainita
Cementita
Compuestos intermetálicos
Descarburización
Diagrama de equilibrio
Diagrama de fases
Distorsión
Endurecimiento por envejecimiento
Endurecimiento por precipitación
Endurecimiento superficial
Ensayo de Jominy
Envejecimiento
Esferoiditas
Ferrita
Hierro fundido
Martensita
Metales puros
Normalizado
Perlita

Punto eutéctico
Reacción eutectoide
Recocido
Relevado de esfuerzos
Revenido
Sobreenvejecimiento
Soluto
Solvente
Temperatura de Curie
Templabilidad
Transformaciones de fase
Tratamiento por soluciones
Tratamiento térmico

BIBLIOGRAFÍA

ASM Handbook, Vol. 3: *Alloy Phase Diagrams,* ASM International, 1992.

ASM Handbook, Vol. 4: *Heat Treating,* ASM International, 1991.

ASM Handbook, Vol. 9: *Metallography and Microstructures,* ASM International, 2004.

Brooks, C. R., *Principles of the Heat Treatment of Plain Carbon and Low Alloy Steel*, ASM International, 1996.

Bryson, B., *Heat Treatment, Selection, and Application of Tool Steels*, Hanser Gardner, 1997.

Davies, J. R. (ed.), *Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics*, ASM International, 2002.

Haimbaugh, R. E., *Practical Induction Heat Treating*, ASM International, 2001.

Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels, ASM International, 1995.

Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Nonferrous Alloys, ASM International, 1996.

Krauss, G., *Steels: Heat Treatment and Processing Principles*, ASM International, 1990.

Totten, G. E. y Howes, M. A. H. (eds.), *Steel Heat Treatment Handbook*, Marcel Dekker, 1997.

Totten, G. E., Bates, C. E. y Clinton, N. A., *Handbook of Quenchants and Quenching Technology*, ASM International, 1992.

PREGUNTAS DE REPASO

4.1 Describa la diferencia entre un soluto y un solvente.

4.2 ¿Qué es una solución sólida?

4.3 ¿Cuáles son las condiciones para obtener soluciones sólidas *(a)* substitucionales e *(b)* intersticiales?

4.4 ¿Cuál es la diferencia entre un sistema de una sola fase y uno de dos fases?

4.5 Explique qué significa "partícula de segunda fase".

4.6 Describa las características de un diagrama de fases.

4.7 ¿Qué indican los términos "equilibrio" y "constitucional", aplicados a los diagramas de fase?

4.8 ¿Cuál es la diferencia entre "eutéctico" y "eutectoide"?

4.9 ¿Qué es el revenido? ¿Por qué se hace?

4.10 Explique lo que significa "severidad al temple".

4.11 ¿Qué son los precipitados? ¿Por qué son importantes para el endurecimiento por precipitación?

4.12 ¿Cuál es la diferencia entre el envejecimiento natural y el artificial?

4.13 Describa las características de la ferrita, la austenita y la cementita.

4.14 ¿Cuál es el propósito del recocido?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

4.15 Es posible que haya visto algunos libros técnicos sobre productos en los que se indica que algunas partes de dichos productos fueron "tratadas térmicamente". Describa brevemente lo que entiende de este término y por qué el fabricante lo menciona.

4.16 Describa por qué es importante en ingeniería la existencia de un punto eutéctico en los diagramas de fase.

4.17 Explique la diferencia entre dureza y templabilidad.

4.18 Consulte la tabla 4.1 y explique por qué los elementos listados en "aplicaciones características" son adecuados para el endurecimiento superficial.

4.19 ¿Por qué generalmente no es deseable usar acero en su condición de templado después del tratamiento térmico?

4.20 Describa las diferencias entre el endurecimiento superficial y el total, por lo que se refiere a aplicaciones de ingeniería.

4.21 Describa las características de *(a)* una aleación, *(b)* la perlita, *(c)* la austenita, *(d)* la martensita, y *(e)* la cementita.

4.22 Explique por qué el carbono, entre todos los elementos, es tan efectivo para impartir resistencia al hierro en la forma de acero.

4.23 ¿Cómo afecta la forma del grafito en el hierro fundido las propiedades de este último?

4.24 En la sección 4.8 listamos varios fluidos en términos de su capacidad de enfriamiento en el templado. ¿Qué propiedades de estos fluidos influyen en su capacidad de enfriamiento?

4.25 ¿Por qué es importante conocer las características de los hornos para tratamiento térmico?

4.26 Explique por qué, en la abscisa de la figura 4.15, el porcentaje de perlita comienza a bajar después de alcanzar el contenido de 100% de carbono.

4.27 ¿Cuál es la importancia de la descarburización? Dé algunos ejemplos.

4.28 Explique lo que entienda por distorsión de tamaño y por distorsión de forma en las partes tratadas térmicamente, y describa sus causas.

4.29 Comparta sus observaciones en relación con la figura 4.20.

4.30 Diseñe un ciclo de tratamiento térmico para acero al carbono, incluyendo temperatura y tiempos de exposición, a fin de producir *(a)* aceros perlíticos-martensíticos, y *(b)* aceros bainíticos-martensíticos.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

4.31 Mediante la figura 4.5, estime las siguientes cantidades para una aleación de 20% de Cu-80% de Ni:

(a) La temperatura de liquidus.

(b) La temperatura de solidus.

(c) El porcentaje de níquel en el líquido a 1400 °C (2250 °F).

(d) La fase mayor a 1400 °C (2250 °F).

(e) La relación de sólido a líquido a 1400 °C.

4.32 Extrapolando las curvas de la figura 4.16, estime el tiempo que se requeriría para que un acero 1080 se suavizara a 50 HRC a *(a)* 200 °C y *(b)* 300 °C.

4.33 Un acero característico para tubería es AISI 1040, y uno para cuerdas musicales es AISI 1085. Considerando sus aplicaciones, explique la razón para la diferencia en sus contenidos de carbono.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

4.34 Se ha dicho en este capítulo que, en el diseño de partes, deben evitarse las esquinas agudas para reducir la tendencia al agrietamiento durante el tratamiento térmico. Si es necesario que la parte tenga esquinas agudas para funcionar apropiadamente y aún requiere tratamiento térmico, ¿qué método recomendaría para fabricar esta parte?

4.35 Los procesos de tratamiento térmico para el endurecimiento superficial se dan en la tabla 4.1. Cada uno de ellos comprende equipo, procedimientos y ciclos de tiempo distintos; en consecuencia, para cada uno de ellos se incurre en diferentes costos. Analice la literatura disponible y póngase en contacto con diferentes fábricas. Haga una tabla similar indicando los costos comprendidos en cada proceso.

4.36 Hemos visto que, como resultado del tratamiento térmico, las partes pueden sufrir distorsión de tamaño y de forma en diversos grados. Respecto de la bibliografía al final de este capítulo, realice una investigación en la literatura técnica y elabore un informe de datos cuantitativos en relación con las distorsiones de partes que tienen diferentes formas.

4.37 En la figura 4.20 se muestran las distribuciones de dureza en pruebas de enfriamiento de extremo, medida a lo *largo de la longitud* de la barra redonda. Dibuje un croquis cualitativo sencillo que muestre la distribución de durezas a *través del diámetro* de la barra. ¿La forma de la curva dependería del contenido de carbono de la barra? Explique su respuesta.

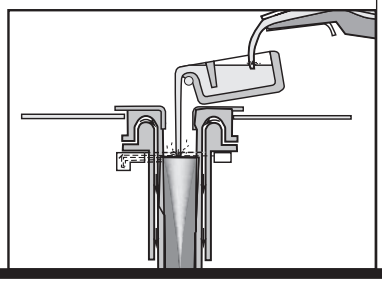
4.38 A lo largo de este capítulo se ha visto la importancia y los beneficios de tratar térmicamente las partes (o ciertas regiones de las mismas) y algunos ejemplos específicos. Investigue la literatura disponible sobre tratamiento térmico, en relación con la bibliografía al final de este capítulo. Reúna varios ejemplos e ilustraciones de partes que se hayan tratado térmicamente.

4.39 Respecto de la figura 4.26, sugiera varias otras formas de partes a ser tratadas térmicamente y diseñe devanados apropiados para ellas. Describa cómo cambiarían sus diseños si las partes tienen formas variables a lo largo de su longitud.

4.40 Revise diversas partes de su automóvil o de su hogar e identifique las que habrían sido endurecidas superficialmente. Explique sus razones.

Metales y aleaciones ferrosas: producción, propiedades generales y aplicaciones

CAPÍTULO 5



Los metales y las aleaciones ferrosas son los metales estructurales más ampliamente utilizados. En este capítulo describimos lo siguiente:

- Métodos de producción primaria de hierro y acero.
- Tipos de aleaciones ferrosas, sus propiedades y aplicaciones.
- Aplicaciones específicas para diversos tipos de aceros y hierros fundidos.
- Características de los aceros para matrices y herramentales y su selección en aplicaciones específicas.

5.1 Introducción 149
5.2 Producción de hierro y acero 150
5.3 Fundición de lingotes 153
5.4 Colada continua 154
5.5 Aceros al carbono y aleados 156
5.6 Aceros inoxidables 161
5.7 Aceros para matrices y herramentales 163

EJEMPLO:

5.1 Uso de aceros inoxidables en los automóviles 163

5.1 Introducción

En virtud de su amplia gama de propiedades mecánicas, físicas y químicas, los **metales** y las **aleaciones ferrosas** se encuentran entre los más útiles de todos los metales. Contienen hierro como metal base y sus categorías generales son *aceros al carbono y aleados*, *aceros inoxidables*, *aceros para matrices y herramentales*, hierros y *aceros fundidos*. Las aleaciones ferrosas se producen como:

- Lámina de acero para automóviles, artículos domésticos y contenedores.
- Placas para calderas, embarcaciones y puentes.
- Miembros estructurales como vigas I, varillas, ejes, cigüeñales y rieles para ferrocarril.
- Engranes, herramientas, matrices y moldes.
- Alambre musical.
- Sujetadores, como pernos, remaches y tuercas.

Un auto de pasajeros típico contiene alrededor de 800 kg de acero, lo que constituye entre 55% y 60% de su peso. Como ejemplo de la amplitud de su uso, los materiales ferrosos constituyen de 70% a 85% del peso de los miembros estructurales y componentes mecánicos. Los aceros al carbono son los menos costosos de todos los aceros estructurales. El uso del hierro y del acero como materiales estructurales ha sido uno de los desarrollos tecnológicos modernos más importantes. Las herramientas ferrosas primitivas aparecieron por primera vez entre los años 4000 y 3000 a.C. Estaban hechas de hierro meteórico, que se obtiene de meteoritos caídos a la Tierra. El verdadero trabajo

metalúrgico comenzó en Asia Menor hacia el año 1100 a.C. y marcó el advenimiento de la *Era del Hierro*. La invención del alto horno, aproximadamente en el año 1340 d. C., hizo posible la producción de grandes cantidades de hierro y acero.

5.2 Producción de hierro y acero

5.2.1 Materias primas

Los tres materiales básicos que se utilizan en la fabricación de hierro y acero son el **mineral de hierro**, la **piedra caliza** y el **coque**. Aunque no siempre aparece en estado libre en la naturaleza, el hierro es uno de los elementos más abundantes en el mundo, pues constituye alrededor de 5% de la corteza terrestre (en la forma de diversos minerales). Los principales minerales de hierro son la *taconita* (una roca negra similar al sílex), la *hematita* (un mineral de óxido de hierro) y la *limonita* (un óxido de hierro que contiene agua). Una vez que se extrae de la mina, el mineral se tritura en finas partículas, se le retiran las impurezas por diversos medios (como la separación magnética) y se le da forma de pellets, bolas o briquetas, mediante agua y diferentes aglutinantes. Los pellets son aproximadamente 65% hierro puro y tienen un diámetro de unos 25 mm (1 pulgada). Al mineral de hierro concentrado se le conoce como *beneficiado* (al igual que otros minerales concentrados). Algunos minerales ricos en hierro se utilizan directamente, sin aglutinar.

El coque se obtiene de grados especiales de carbón bituminoso (un carbón suave rico en hidrocarburos volátiles y en materia alquitranada), que se calienta en hornos verticales a temperaturas de hasta 1150 °C (2100 °F) y después se enfrían con agua en torres de enfriamiento. Tiene varias funciones en la fabricación del acero, incluyendo *(a)* generar el nivel de calor requerido para que ocurran las reacciones químicas necesarias en la producción del hierro, y *(b)* producir el monóxido de carbono (un gas reductor, lo que significa que retira oxígeno) que se utiliza así para reducir el óxido de hierro a hierro. Los productos químicos derivados del coque se emplean para elaborar plásticos y compuestos químicos. Los gases emitidos durante la conversión del carbón en coque se utilizan como combustible en las operaciones de la planta.

La función de la piedra caliza (carbonato de calcio) es retirar impurezas del hierro fundido, pues reacciona químicamente con ellas y actúa como **fundente** (esto es, fluye como un fluido), lo cual hace que se fundan a baja temperatura. La piedra caliza se combina con las impurezas y forma una **escoria** (ligera), que flota sobre el metal fundido y se retira después. También se utiliza como fundente la *dolomita* (un mineral de carbonato de magnesio y calcio). La escoria se utiliza en la fabricación de cemento, fertilizantes, vidrio, materiales de construcción, aislamiento de lana mineral y para relleno de caminos.

5.2.2 Fabricación del hierro

Las tres materias primas descritas antes se transportan hasta la parte superior de un **alto horno** (fig. 5.1) y se depositan dentro de él (a lo que se denomina *cargar el horno*). Éste es básicamente un gran cilindro de acero revestido con ladrillo refractario (resistente al calor); tiene la altura de un edificio de 10 pisos. El principio de este horno se desarrolló en Europa central. El primer alto horno se construyó en Estados Unidos y comenzó a operar en 1621. La mezcla de carga se funde en una reacción a 1650 °C (3000 °F) con el aire precalentado a unos 1100 °C (2000 °F) e *inyectado* dentro del horno (de ahí el término "*horno de inyección*" también utilizado para este reactor) mediante boquillas (llamadas *toberas*). Aunque pueden ocurrir muchas reacciones, la reacción básica es la del oxígeno con el carbono para producir monóxido de carbono, que a su vez reacciona con el óxido de hierro y lo reduce a **hierro**. Es necesario precalentar el aire de entrada porque el quemado exclusivo del coque no produce temperaturas lo suficientemente altas para que ocurran estas reacciones.

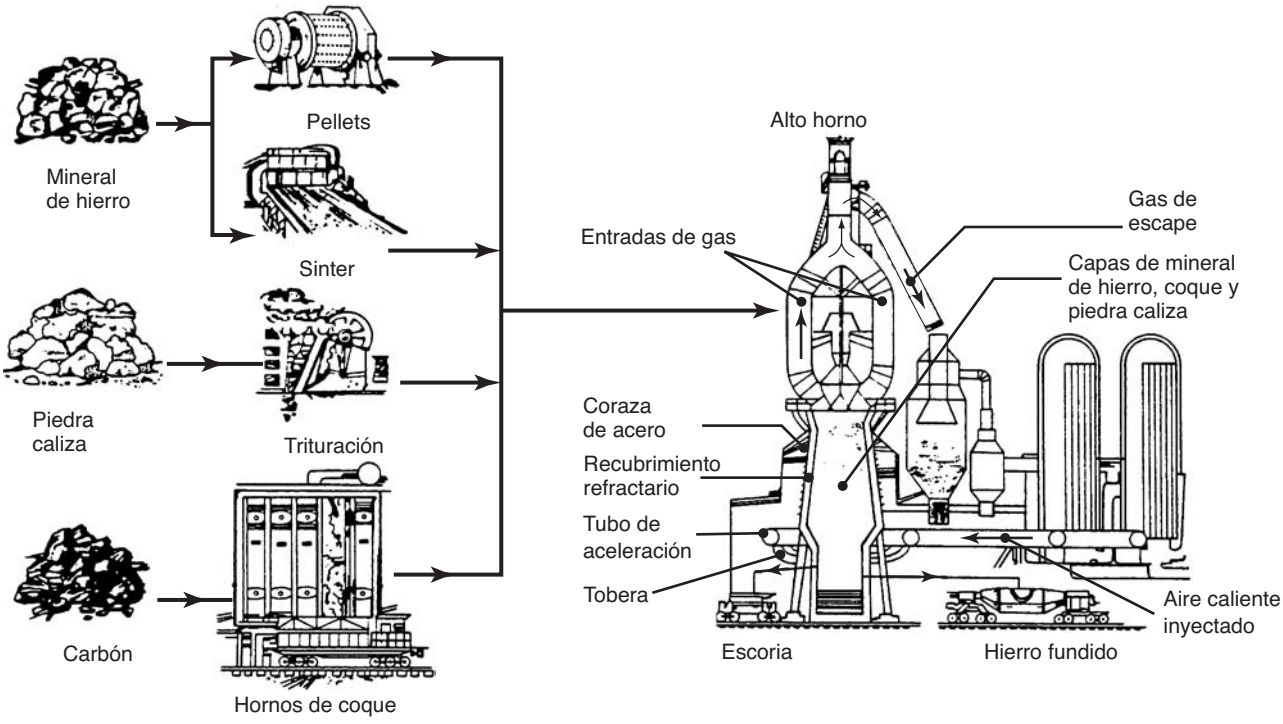


FIGURA 5.1 Esquema de un alto horno.

El metal fundido se acumula en el fondo del alto horno, mientras que las impurezas flotan arriba de él. A intervalos de cuatro a cinco horas, se extrae (*sangra*) el metal en carros olla, con hasta 160 toneladas de hierro fundido cada uno de ellos. El metal fundido en esta etapa se llama **arrabio** o **hierro cochino**, o simplemente **metal caliente**; tiene una composición característica de 4% de C, 1.5% de Si, 1% de Mn, 0.04% de S, 0.4% de P, y el resto es hierro puro. La palabra **cochino** proviene de las prácticas iniciales de verter el metal fundido en pequeños moldes de arena arreglados como una camada de cochinos alrededor de un canal principal. El metal solidificado (arrabio) se utiliza después para fabricar hierro y aceros.

5.2.3 Proceso de aceración

El acero se produjo por primera vez en China y Japón entre los años 600 y 800 d.C. El proceso de su fabricación consiste fundamentalmente en refinar el arrabio reduciendo el porcentaje de manganeso, silicio, carbono y otros elementos mediante el control de la composición del producto con la adición de varios elementos. El metal fundido que procede del alto horno se transporta a uno de tres tipos de hornos: de **hogar abierto**, **eléctrico** o **básico de oxígeno**. El nombre de "hogar abierto" deriva de la forma poco profunda del hogar que se abre directamente a las flamas que funden el metal. Desarrollado durante la década de 1860, el horno de hogar abierto aún es importante en la industria, pero ha sido reemplazado por los hornos eléctricos y por el proceso básico de oxígeno, que son más eficientes y producen aceros de mejor calidad.

Horno eléctrico. La fuente de calor de este horno es un arco eléctrico continuo que se forma entre los electrodos y el metal cargado en el horno (figs. 5.2a y b). En este tipo de aparatos se generan temperaturas tan altas como 1925 °C (3500 °F). En general existen

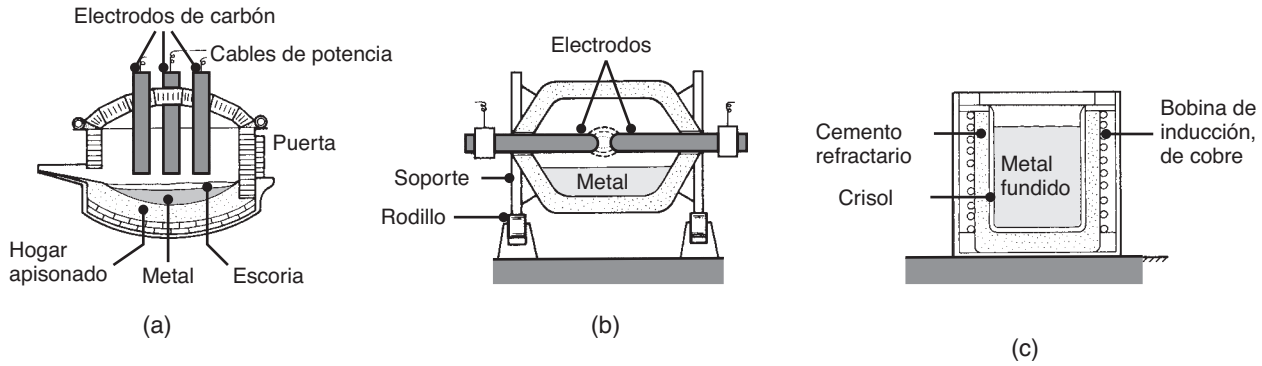


FIGURA 5.2 Esquema de los tipos de hornos eléctricos: *(a)* de arco directo, *(b)* de arco indirecto, y *(c)* de inducción.

tres electrodos de grafito, que pueden llegar a ser de 750 mm (30 pulgadas) de diámetro y de 1.5 m a 2.5 m (5 a 8 pies) de largo; su altura dentro del horno se puede ajustar en respuesta a la cantidad de metal presente y a la medida del desgaste de los electrodos.

Primero se deja caer chatarra de acero y una pequeña cantidad de carbón y piedra caliza dentro del horno eléctrico, a través del techo abierto. Después éste se cierra y se bajan los electrodos. Una vez que se enciende el horno, el metal se funde en unas dos horas. Luego se corta la corriente, se elevan los electrodos, se balancea el horno y el metal fundido se vierte en una *olla*, que es un receptáculo utilizado para transferir y colar el metal fundido. Las capacidades de los hornos eléctricos varían de 60 a 90 toneladas de acero por día. La calidad del acero producido es mejor que la del horno de hogar abierto y que la del proceso básico de oxígeno.

Para cantidades menores, los hornos eléctricos pueden ser del tipo de **inducción**. El metal se coloca en un **crisol**, un recipiente grande fabricado con material refractario y rodeado con una bobina de cobre por la que se hace pasar corriente alterna (fig. 5.2c). La corriente inducida en la carga genera calor y funde el metal. Estos hornos también se utilizan para refundir el metal para fundición.

Convertidor básico de oxígeno. El convertidor básico de oxígeno (BOF, por sus siglas en inglés) es el proceso de fabricación de acero más rápido. En general, se cargan 200 toneladas de arrabio y 90 toneladas de chatarra en un recipiente (fig. 5.3). Después se inyecta oxígeno puro dentro del horno por alrededor de 20 minutos mediante una *lanza* (un tubo largo) enfriada por agua, a una presión de unos 1250 kPa (180 psi), como se muestra en la figura 5.3. Se agregan agentes fundentes (como piedra caliza) a través de una rampa. La vigorosa agitación del oxígeno refina el metal fundido mediante un proceso de oxidación en el que se produce óxido de hierro. El óxido reacciona con el carbono en el metal fundido, produciendo monóxido y bióxido de carbono. Después se retrae la lanza y se drena el horno balanceándolo (obsérvese la abertura en la fig. 5.3 para el metal fundido). La escoria se retira balanceando el horno en la dirección opuesta. El proceso BOF es capaz de refinar 250 toneladas de acero en un tiempo de entre 30 y 50 minutos. La mayoría de los aceros BOF, que tienen niveles bajos de impurezas y son de mejor calidad que los aceros de hornos de hogar abierto, se procesan como placas, láminas y diversas formas estructurales, por ejemplo, vigas I y canales (ver fig. 13.1).

Horno de vacío. También se puede fundir acero en hornos de inducción de los que se ha retirado el aire, similares al mostrado en la figura 5.2c. Debido a que el proceso retira las impurezas gaseosas del metal fundido, la fundición al vacío produce aceros de alta calidad.

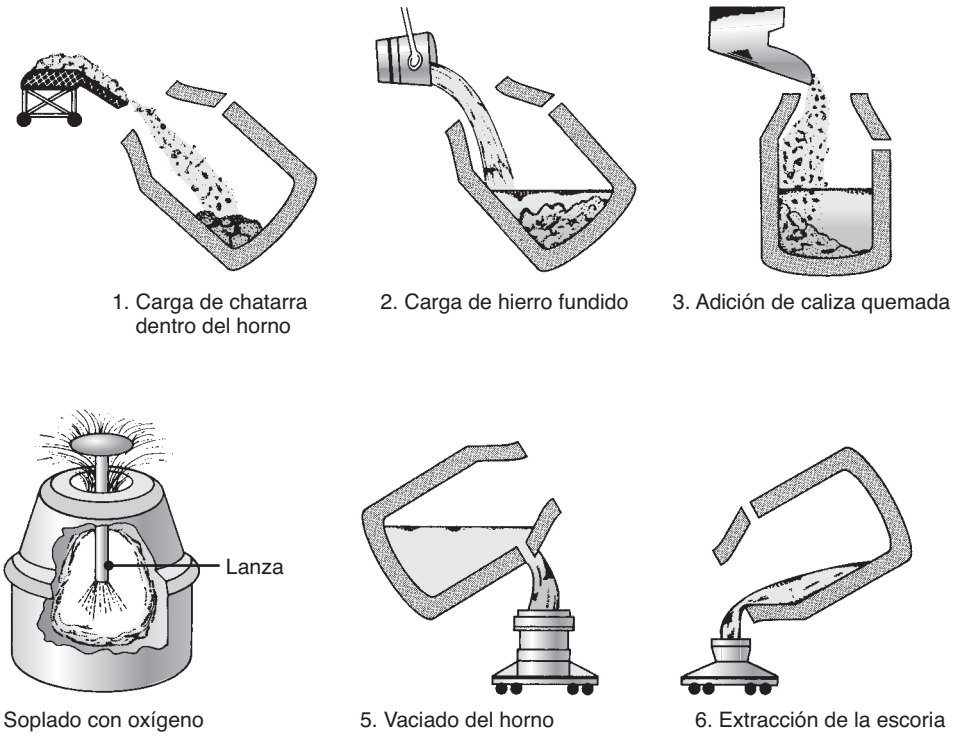


FIGURA 5.3 Esquemas que muestran la carga, fusión y el vaciado del hierro fundido en un proceso básico de oxígeno.

5.3 Fundición de lingotes

Tradicionalmente, el siguiente paso en el proceso de producción de acero consiste en formar el metal fundido en formas sólidas (**lingote**) para su procesamiento posterior, como laminado a formas determinadas, fundición en formas semiacabadas o para forjarlo. Hoy este proceso se reemplaza en gran medida por la **colada continua**, que mejora la eficiencia al eliminar la necesidad de los lingotes (ver sección 5.4). El metal fundido se vierte (cuela) de la olla a los moldes de los lingotes, o lingoteras, en los que se solidifica el metal. En general, las lingoteras se fabrican de hierro de cubilote o hierro de alto horno con 3.5% de C. Son cónicos para facilitar la remoción del metal solidificado. El fondo puede ser cerrado o abierto; si es abierto, se colocan sobre una superficie plana. Los lingotes enfriados se retiran (extraen) de los moldes y se introducen en **hornos de empape**, donde se recalientan a una temperatura uniforme de unos 1200 °C (2200 °F) para su procesamiento posterior mediante laminado. Los lingotes pueden ser de sección transversal cuadrada, rectangular o redonda y sus pesos van desde unos cuantos kilos hasta 40 toneladas.

Durante la solidificación de un lingote ocurren ciertas reacciones, que influyen de modo importante en la calidad del acero producido. Por ejemplo, al fabricar el acero se pueden disolver cantidades significativas de oxígeno y otros gases en el metal fundido. La mayoría de estos gases son expulsados cuando el metal se solidifica, ya que su límite de solubilidad en el metal disminuye abruptamente al disminuir su temperatura (ver fig. 10.15). El oxígeno expulsado se combina con carbono para formar monóxido de carbono, que provoca porosidad en el lingote solidificado.

Según la cantidad de gas desarrollado durante la solidificación, se pueden producir tres tipos de lingotes de acero: calmado, semicalmado y efervescente.

1. **Acero calmado.** Éste es un acero totalmente desoxidado; esto es, se retira el oxígeno eliminando así la porosidad. En el proceso de desoxidación, el oxígeno disuelto en el metal fundido se hace reaccionar con elementos como aluminio, silicio, manganeso y vanadio, que deben agregarse al metal fundido. Estos elementos tienen afinidad con el oxígeno y forman óxidos metálicos. Si se utiliza aluminio, al producto se le llama *acero calmado en aluminio* (ver tabla 16.4). El término *calmado* se refiere a que el acero queda quieto después de colarse en el molde.

   Las inclusiones de óxido en el baño fundido (si son lo suficientemente grandes) flotan y se adhieren a (o se disuelven en) la escoria. Por lo tanto, un acero calmado por completo carece de cualquier porosidad provocada por gases; tampoco tiene **sopladuras** (agujeros esféricos grandes cerca de las superficies del lingote). En consecuencia, las propiedades químicas y mecánicas de un lingote de acero calmado son relativamente uniformes en toda la masa. Sin embargo, debido a la contracción durante la solidificación, un lingote de este tipo desarrolla un **rechupe** en la parte superior (también denominada **cavidad por contracción**). Tiene la apariencia de un embudo y puede consumir un volumen sustancial del lingote, ya que debe cortarse y manejarse como chatarra.
2. **Acero semicalmado.** El acero semicalmado es un *acero parcialmente desoxidado*. Contiene alguna porosidad (por lo general en la sección central superior del lingote), aunque muy poco, o ningún, rechupe. El resultado es que se reduce el desperdicio. Aunque el rechupe en el acero semicalmado es menor, esta ventaja se ve superada por la presencia de porosidad en esa región. La producción de los aceros semicalmados es económica.
3. **Acero efervescente.** En un acero efervescente, que en general tiene un contenido bajo de carbono (menos de 0.15%), los gases desarrollados se calman (o controlan) parcialmente mediante la adición de otros elementos, como el aluminio. Los gases producen sopladuras a lo largo del anillo exterior del lingote, de aquí el término *efervescente*. Los aceros efervescentes tienen poco o ningún rechupe y poseen una superficie dúctil con un buen acabado superficial. Además, las impurezas y las inclusiones tienden a segregarse hacia el centro del lingote. Por lo tanto, los productos fabricados con este acero pueden resultar defectuosos y debe inspeccionarse.

Refinación. Las propiedades y características de manufactura de las aleaciones ferrosas se ven afectadas adversamente por la cantidad de impurezas, inclusiones y otros elementos presentes (ver sección 2.10). A la remoción de impurezas se le conoce como *refinación*. La mayor parte de la refinación se efectúa en hornos de fusión o en ollas por medio de la adición de diversos elementos. Existe una demanda creciente por aceros más limpios, que tienen mejores y más uniformes propiedades y una composición con mayor consistencia. La refinación es importante, sobre todo al producir aceros y aleaciones de alto grado para aplicaciones críticas y de alto desempeño, como los componentes para aeronaves. Además, los periodos de garantía de flechas, árboles de levas, cigüeñales para camiones a diesel y partes similares se pueden incrementar de modo significativo utilizando aceros de mayor calidad. Estos aceros se someten a una **refinación secundaria** en ollas (**metalurgia de olla**) y a la refinación en ollas (**refinación por inyección**), que por lo general consiste en fundir y procesar el acero en vacío. Se han desarrollado varios procesos mediante atmósferas controladas (como la fusión por haz de electrones, la refusión por arco al vacío, la descarburización argón-oxígeno y la refusión de doble electrodo por arco al vacío).

5.4 Colada continua

Las ineficiencias y los problemas implícitos en la fabricación tradicional de acero en lingotes se remedian mediante procesos de *colada continua*, que producen metal de mejor

calidad a costos reducidos (ver también la sección 13.5.1 sobre *minimolinos*). Concebida en la década de 1860, la colada continua, o **fundición en hilos**[N del RT], se desarrolló inicialmente para fundir tiras de metales no ferrosos. Ahora el proceso se utiliza ampliamente para producir acero, con mejoras importantes en la productividad y reducción de costos. En la figura 5.4 se muestra de modo esquemático un sistema para colada continua. El metal fundido en la olla se limpia y luego se iguala su temperatura soplando gas nitrógeno a través de él durante cinco o diez minutos. Después se vierte en un recipiente intermedio de colada, revestido de refractario (**distribuidor**), donde se retiran las impurezas. El distribuidor contiene hasta tres toneladas de acero. El metal fundido se mueve hacia abajo a través de moldes de cobre enfriados por agua y se comienza a solidificar en una trayectoria soportada por rodillos (llamados *rodillos de apriete*).

N del RT A cada lingote producido por cada cristalizador se le llama "hilo".

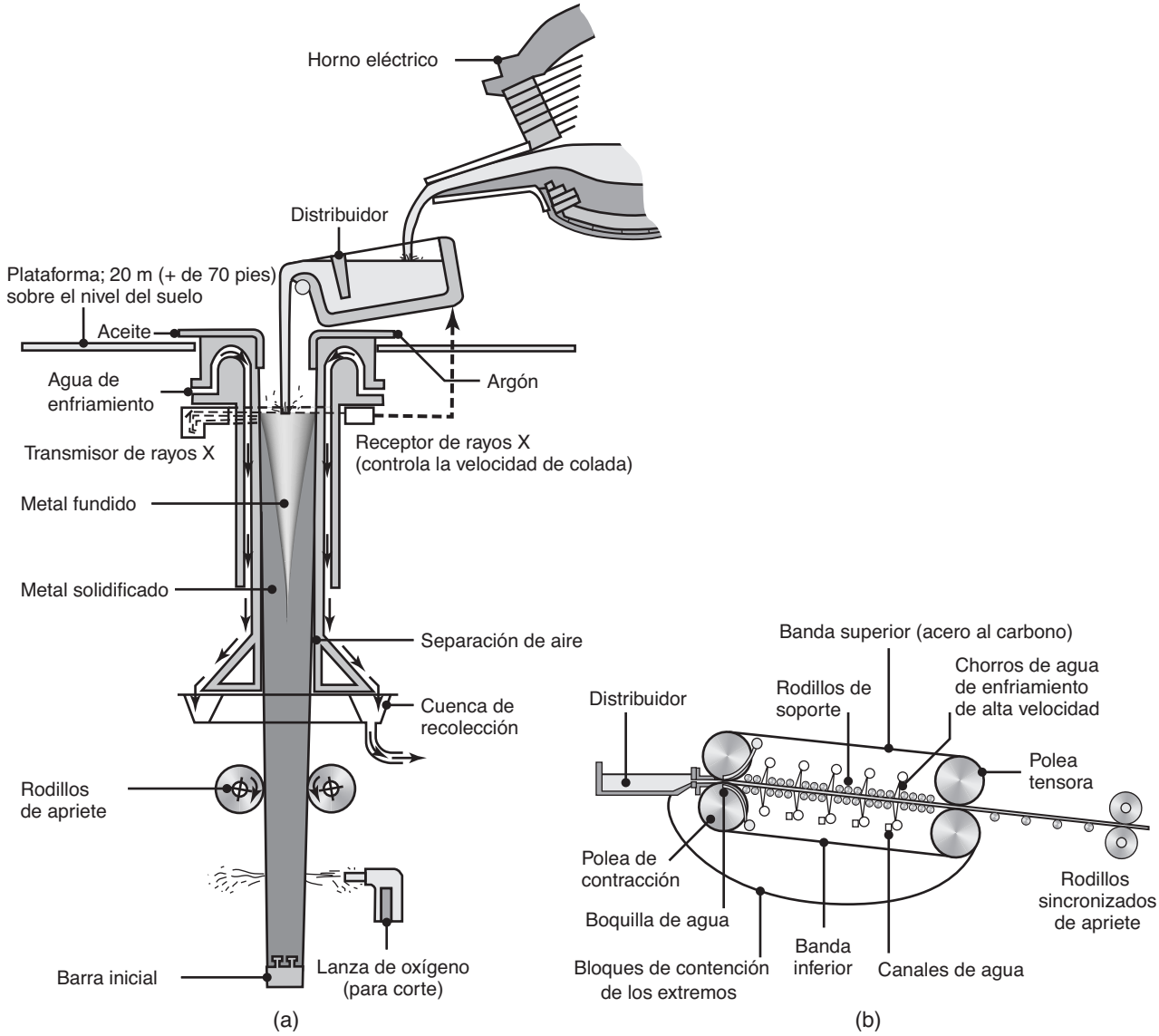


FIGURA 5.4 *(a)* Proceso de colada continua para acero. Por lo común, el metal solidificado desciende a una velocidad de 25 mm/s (1 pulgada/s). Obsérvese que la plataforma se encuentra a unos 20 m sobre el nivel del suelo. *Fuente: Metalcaster's Reference and Guide*, American Foundrymen's Society. *(b)* Fundición continua de cinta metálica no ferrosa. *Fuente:* Cortesía de Hazelett.

Antes de iniciar el proceso de colada, se inserta una *barra inicial* (*barra ficticia*) en el fondo del molde. Cuando se cuela el metal fundido se solidifica sobre dicha barra, la cual se retira a la misma velocidad que a la que se vierte el metal. La velocidad de enfriamiento es tanta que el metal desarrolla una superficie exterior solidificada (costra) que lo soporta durante su recorrido hacia abajo, de manera característica a unos 25 mm/s (1 pulgada/s). El espesor de la costra en el extremo de salida del molde es de entre 12 mm a 18 mm (0.5 a 0.75 pulgadas). Se provee enfriamiento adicional mediante rociado de agua a lo largo de la trayectoria del metal que está solidificándose. En general, los moldes se recubren con grafito o con lubricantes sólidos similares para reducir tanto la fricción como la adhesión en las interfaces molde-metal. De igual manera, se someten a vibración para disminuir la fricción y el pegado.

El metal colado se puede cortar a menudo en las longitudes deseadas mediante cizallamiento o corte por soplete controlado por computadora, o es posible alimentar directamente un molino de rodillos a fin de reducir después el espesor y darle forma de productos como canales y vigas I. Además de costar menos, los metales colados con frecuencia tienen composiciones y propiedades más uniformes que las obtenidas mediante la fundición en lingotes. Las instalaciones modernas utilizan operaciones de laminado en caliente controladas por computadora, en tiras coladas continuamente, con espesores finales de la lámina de 2 mm a 6 mm para aceros al carbono, inoxidables y eléctricos, y con capacidades para un cambio rápido de un tipo de acero a otro. Luego, las placas o formas de acero se pasan por uno o más procesos adicionales, como *(a)* limpieza y decapado mediante productos químicos para retirar óxidos de la superficie; *(b)* laminado en frío para mejorar la resistencia y el acabado superficial; *(c)* recocido y *(d)* recubrimiento (galvanizado o aluminizado) para mejorar la resistencia a la corrosión.

En la **fundición de cinta** se producen placas o tiras delgadas a partir del metal fundido. Éste se solidifica de manera similar a la de la colada continua, pero el sólido caliente se lamina después para darle la forma final (fig. 5.4b). Los esfuerzos de compresión en el laminado (ver sección 13.2) sirven para reducir la porosidad y proveer mejores propiedades al material. En efecto, la fundición de cinta elimina la operación de laminado en caliente en la producción de cintas o placas de metal. En las instalaciones modernas se pueden obtener espesores finales de 2 mm a 6 mm (0.08 a 0.25 pulgadas) para aceros al carbono, inoxidables y eléctricos, así como en otros metales.

5.5 Aceros al carbono y aleados

Los aceros al carbono y aleados son uno de los metales más utilizados y tienen una amplia variedad de aplicaciones (tabla 5.1). Las composiciones y su procesamiento se con-

TABLA 5.1

Selección típica de aceros al carbono y aleados para diversas aplicaciones

Producto	Acero	Producto	Acero
Alambre	1045, 1055	Pernos	1035, 4042, 4815
Alambre (musical)	1085	Resortes (de hojas)	1085, 4063, 9260, 6150
Árboles de levas	1020, 1040	Resortes (helicoidales)	1095, 4063, 6150
Bielas	1040, 3141, 4340	Resortes helicoidales	4063
Cadenas (de transmisión)	3135, 3140	Rieles y ruedas para ferrocarril	1080
Carrocerías automotrices	1010	Rodamientos de bolas y pistas	52100
Cigüeñales (forjados)	1045, 1145, 3135, 3140	Rondanas	1060
Ejes	1040, 4140	Tren de aterrizaje	4140, 4340, 8740
Engranes (automóviles y camiones)	4027, 4032	Tubería	1040
Engranes diferenciales	4023	Tuercas	3130
Forjas, tubería y accesorios para aeronaves	4140, 8740		

trolan de manera que sean adecuados para numerosas aplicaciones. Se encuentran disponibles en diferentes formas básicas como placa, hojalata, cinta, barra, alambre, tubo, fundiciones y forjas.

5.5.1 Efectos de diversos elementos en los aceros

A los aceros se agregan diversos elementos para impartirles propiedades como templabilidad, resistencia, dureza, tenacidad, resistencia al desgaste y capacidad para trabajarlos, soldarlos y maquinarlos. Estos elementos se mencionan en orden alfabético, con resúmenes sobre sus efectos benéficos y perjudiciales. En general, cuanto mayor porcentaje de estos elementos contengan los aceros, mayores serán sus propiedades particulares. Por ejemplo, a mayor contenido de carbono, mayor será la templabilidad del acero y tendrá más resistencia, dureza y resistencia al desgaste. En cambio, la ductilidad, soldabilidad y tenacidad se reducen con el aumento del carbono.

Azufre: mejora la maquinabilidad cuando se combina con manganeso; reduce la resistencia al impacto y la ductilidad, además de dañar la calidad de la superficie y la soldabilidad.
Boro: mejora la templabilidad con pérdida (o incluso con alguna mejora) en la maquinabilidad y la formabilidad.
Calcio: desoxida los aceros, mejora la tenacidad y puede mejorar la formabilidad y la maquinabilidad.
Carbono: mejora la templabilidad, resistencia, dureza y resistencia al desgaste; reduce la ductilidad, la soldabilidad y la tenacidad.
Cerio: controla la forma de las inclusiones y mejora la tenacidad en los aceros de baja aleación de alta resistencia; desoxida los aceros.
Cobalto: mejora la resistencia y la dureza a temperaturas elevadas.
Cobre: mejora la resistencia a la corrosión atmosférica y, en menor medida, incrementa la resistencia con una pequeña pérdida de ductilidad; afecta el trabajo en caliente y la calidad de la superficie.
Cromo: mejora la tenacidad, templabilidad y resistencia al desgaste, a la corrosión y a la alta temperatura; incrementa la profundidad de penetración de dureza resultante del tratamiento térmico, al promover la carburización.
Fósforo: mejora la resistencia, templabilidad, resistencia a la corrosión y maquinabilidad; reduce severamente la ductilidad y la tenacidad.
Magnesio: tiene los mismos efectos del cerio.
Manganeso: mejora la templabilidad, resistencia, resistencia a la abrasión y maquinabilidad; desoxida el acero fundido, reduce la fragilización en caliente y disminuye la soldabilidad.
Molibdeno: mejora la templabilidad, resistencia al desgaste, tenacidad, resistencia a la temperatura elevada, resistencia a la termofluencia y dureza; minimiza la fragilización por revenido.
Niobio (*columbio*): refina el tamaño del grano y mejora la resistencia y tenacidad al impacto; reduce la temperatura de transición y puede disminuir la templabilidad.
Níquel: mejora la resistencia, tenacidad y resistencia a la corrosión; mejora la templabilidad.
Plomo: mejora la maquinabilidad; provoca la fragilización por metal líquido.
Selenio: mejora la maquinabilidad.
Silicio: mejora la resistencia, dureza, resistencia a la corrosión y conductividad eléctrica; disminuye la pérdida por histéresis magnética, maquinabilidad y formabilidad en frío.
Tantalio: tiene efectos similares a los del niobio.
Telurio: mejora la maquinabilidad, formabilidad y tenacidad.
Titanio: mejora la templabilidad; desoxida los aceros.

Tungsteno: tiene los mismos efectos que el cobalto.
Vanadio: mejora la resistencia, tenacidad, resistencia a la abrasión y dureza a temperaturas elevadas; inhibe el crecimiento del grano durante el tratamiento térmico.
Zirconio: tiene los mismos efectos que el cerio..

5.5.2 Elementos residuales en los aceros

Durante la producción, refinación y el procesamiento del acero, suelen quedar algunos *elementos residuales* (**trazas de elementos**). Aunque los de la lista anterior también se pueden considerar residuales, por lo general los elementos residuales indeseables son los que se indican a continuación:

Antimonio y **arsénico**: provocan fragilización por revenido.
Estaño: provoca fragilización en caliente y por revenido.
Hidrógeno: fragiliza severamente los aceros; sin embargo, el calentamiento durante el proceso expele la mayoría del hidrógeno.
Nitrógeno: mejora la resistencia, dureza y maquinabilidad; en los aceros desoxidados con aluminio, controla el tamaño de las inclusiones, mejora la resistencia y la tenacidad y disminuye la ductilidad y la tenacidad.
Oxígeno: aumenta ligeramente la resistencia de los aceros efervescentes; reduce de modo severo la tenacidad.

5.5.3 Denominaciones de los aceros

Tradicionalmente, el *American Iron and Steel Institute* (AISI) y la *Society of Automotive Engineers* (SAE) han denominado los aceros al carbono y aleados utilizando cuatro dígitos. Los dos primeros dígitos indican los elementos aleantes y sus porcentajes; y los dos últimos indican el contenido de carbono en peso. Las denominaciones de la *American Society for Testing and Materials* (ASTM) son otro sistema de numeración que incorpora las denominaciones de AISI y SAE e incluye especificaciones estándar para los productos de acero. Para los metales ferrosos, la denominación consiste en la letra "A" seguida de números arbitrarios (en general tres).

Al sistema de numeración actual se le conoce como *Sistema Unificado de Numeración* (UNS, por sus siglas en inglés) y ha sido ampliamente adoptado por las industrias de metales ferrosos y no ferrosos. Consta de una letra que indica la clase general de la aleación, seguida de cinco dígitos que denominan su composición química. Las letras utilizadas para denominación son:

G: para aceros AISI y SAE al carbono y aleados
J: para aceros fundidos
K: para aceros diversos y aleaciones ferrosas
S: para aceros inoxidables y superaleaciones
T: para aceros para herramientas

Los ejemplos son: G41300 para acero aleado AISI 4130, y T30108 para acero para herramientas AISI A-8.

5.5.4 Aceros al carbono

Los **aceros al carbono** suelen clasificarse por su proporción (en peso) de contenido de carbono. En la tabla 5.2 se muestran las propiedades mecánicas generales de los aceros al carbono y aleados. La maquinabilidad, formabilidad y soldabilidad de dichos aceros se describen en diversos capítulos a lo largo de este texto.

TABLA 5.2

Propiedades mecánicas características de aceros al carbono y aleados seleccionados, en condiciones de laminado en caliente, normalizado y recocido

AISI	Condición	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Reducción de área (%)	Dureza (HB)
1020	Laminado	448	346	36	59	143
	Normalizado	441	330	35	67	131
	Recocido	393	294	36	66	111
1080	Laminado	1010	586	12	17	293
	Normalizado	965	524	11	20	293
	Recocido	615	375	24	45	174
3140	Normalizado	891	599	19	57	262
	Recocido	689	422	24	50	197
4340	Normalizado	1279	861	12	36	363
	Recocido	744	472	22	49	217
8620	Normalizado	632	385	26	59	183
	Recocido	536	357	31	62	149

- **Acero al bajo carbono**, también llamado **acero dulce**, tiene menos de 0.30% de C. Con frecuencia se utiliza para productos industriales comunes (como pernos, tuercas, hojas, placas y tubos) y para componentes de máquinas que no requieren alta resistencia.
- **Acero al medio carbono,** tiene de 0.30% a 0.60% de C. Generalmente se utiliza en aplicaciones que requieren una mayor resistencia que la disponible en los aceros al bajo carbono, como en maquinaria, partes de equipos automotores y agrícolas (engranes, ejes, bielas, cigüeñales), equipo ferroviario y partes de maquinaria para el trabajo de los metales.
- **Acero al alto carbono,** tiene más de 0.60% de C. En general, el acero de alto carbono se utiliza en partes que requieren resistencia, dureza y resistencia al desgaste, como herramientas de corte, cables, alambre musical, resortes y cuchillería. Después de formársele, usualmente se da tratamiento térmico y revenido a las partes. Cuanto más carbono tenga el acero, mayores serán su dureza, resistencia y resistencia al desgaste luego del tratamiento térmico.
- Los aceros al carbono que contienen azufre y fósforo se conocen como aceros al carbono **resulfurizados** (serie 11xx) y como aceros al carbono **refosforizados y resulfurizados** (serie 12xx). Por ejemplo, el acero 1112 es resulfurizado con un contenido de carbono de 0.12%. Estos aceros tienen una maquinabilidad mejorada, como se indica en la sección 21.7.

5.5.5 Aceros aleados

A los aceros con cantidades significativas de elementos aleados se les llama **aceros aleados**; por lo común se fabrican con mayor cuidado que los aceros al carbono. Los **aceros aleados grado estructural** se utilizan sobre todo en las industrias de la construcción y del transporte, debido a su mayor resistencia. Otros aceros aleados se usan en aplicaciones donde se requiere resistencia, dureza, resistencia a la termofluencia y a la fatiga, así como tenacidad. Estos aceros se pueden tratar térmicamente para obtener las propiedades deseadas.

5.5.6 Aceros de alta resistencia y de baja aleación

Para mejorar la relación resistencia a peso de los aceros se han desarrollado numerosos **aceros de alta resistencia y de baja aleación** (**HSLA**, por sus siglas en inglés), que tienen

un bajo contenido de carbono (en general menos de 0.30%) y se caracterizan por una microestructura consistente en una fase de ferrita de grano fino y una segunda fase de martensita y austenita. Desarrollados a principios de la década de 1930, los aceros HSLA se producen por lo común en la forma de lámina mediante microaleación y laminado en caliente controlado. A partir de estos aceros se fabrican placas, barras y formas estructurales. Sin embargo, la ductilidad, formabilidad y soldabilidad de los aceros HSLA suelen ser inferiores a las de los aceros convencionales de baja aleación. Para mejorar estas propiedades, se han desarrollado los **aceros bifásicos** (ver sección 5.5.7).

Típicamente, las láminas de aceros HSLA se utilizan en partes de carrocerías automotrices y otros equipos de transporte (para reducir el peso, y de ahí, el consumo de combustible) y en minería, agricultura y diversas aplicaciones industriales. Las placas de HSLA se emplean además en barcos, puentes, construcción de edificios y para formas como vigas I, canales y ángulos que se usan en edificios y estructuras variadas.

Denominaciones. Tres categorías integran el sistema de denominaciones AISI para la lámina de acero de alta resistencia (tabla 5.3): la *calidad estructural* (S) incluye los elementos C, Mn, P y N; las *aleaciones bajas* (X) contienen Nb, Cr, Cu, Mo, Ni, Si, Ti, V y Zr, solos o combinados; los *aceros resistentes al ambiente* (W) tienen una resistencia a la corrosión ambiental casi cuatro veces mayor que la de los aceros convencionales al bajo carbono y contienen Si, P, Cu, Ni y Cr en diversas combinaciones. Además, la formabilidad de esta lámina de acero se clasifica mediante las letras F (excelente), K (buena) y O (regular).

Aceros microaleados. Estos aceros HSLA desarrollados recientemente proporcionan propiedades superiores y pueden eliminar la necesidad de tratamiento térmico. Tienen una microestructura de ferrita-perlita con partículas finas dispersas de nitruro de carbono. Aunque se han producido numerosos aceros microaleados, el característico es el que contiene 0.5% de C, 0.8% de Mn y 0.1% de V. Cuando se someten a un enfriamiento cuidadosamente controlado (por lo general en aire), estos materiales desarrollan una resistencia mejorada y uniforme. Comparados con los aceros al medio carbono, los aceros microaleados también pueden aportar ahorros de costos de hasta 10%, pues no se requieren los pasos de manufactura de temple, revenido y relevo de esfuerzos.

TABLA 5.3

Denominación AISI para hoja de acero de alta resistencia

Resistencia a la fluencia		Composición química	Práctica de desoxidación
psi $\times 10^3$	MPa		
35	240	S = calidad estructural	F = calmado más control de inclusiones de sulfuros
40	275		
45	310		
50	350	X = baja aleación	
60	415		K = calmado
70	485	W = resistente al clima	
80	550		O = no calmado
100	690	D = bifásico	
120	830		
140	970		
Ejemplo			
50 50×10^3 psi mínimo de resistencia a la fluencia		X Baja aleación	F Calmado más control de inclusiones de sulfuros

Aceros nanoaleados. Actualmente en desarrollo, estos aceros tienen tamaños de grano muy pequeños (10–100 nm) y se producen mediante vidrios metálicos (sección 6.14) como precursores. El vidrio metálico se somete a un proceso de vitrificación (cristalización) cuidadosamente controlado, a una velocidad de nucleación muy alta, lo que produce finas fases a escala nanométrica. (Ver también sección 6.16.)

5.5.7 Aceros bifásicos

Los **aceros bifásicos**, denominados con la letra "D" en la tabla 5.3, se procesan especialmente para tener una estructura mixta de ferrita y martensita. Desarrollados a finales de la década de 1960, estos aceros tienen una característica elevada de endurecimiento por trabajo (valor alto de n en la ecuación 2.8), que mejora su ductilidad y formabilidad. Las denominaciones SAE para ellos son similares a las dadas en la tabla 5.3, con la excepción de que se agrega otra letra para indicar el contenido de carbono. Así, por ejemplo, 050XF se convierte en 050XLF, donde L indica la proporción (en este caso, baja) de carbono.

5.6 Aceros inoxidables

Los **aceros inoxidables** se caracterizan por su resistencia a la corrosión, alta resistencia y ductilidad, así como por su elevado contenido de cromo. Se les llama *inoxidables* porque, en la presencia de oxígeno (aire), desarrollan una delgada película de óxido de cromo, dura y adherente, que protege al metal de la corrosión (*pasivación*, ver sección 3.8). Esta película protectora se vuelve a acumular en caso de que se raye la superficie; para que la pasivación ocurra, el contenido mínimo de cromo debe ser de 10% a 12% en peso.

Además del cromo, otros elementos de aleación típicos de los aceros inoxidables son el níquel, molibdeno, cobre, titanio, silicio, manganeso, columbio, aluminio, nitrógeno y azufre. La letra L se utiliza para identificar los aceros de bajo carbono. A mayor contenido de carbono, menor será la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables, debido a que el carbono se combina con el cromo en el acero y forma carburo de cromo; la reducida disponibilidad de cromo reduce la pasividad del acero. De igual manera, el carburo de cromo introduce una segunda fase y, a partir de ahí, promueve la corrosión galvánica. (Las estatuas de los soldados en el Monumento a los Veteranos de la Guerra de Corea en Washington, D.C., están fundidas en acero inoxidable 316L).

Desarrollados a principios de 1900, los aceros inoxidables se fabrican mediante hornos eléctricos o por el proceso básico de oxígeno y se procesan mediante técnicas similares a las utilizadas en otros tipos de producción de acero. El nivel de pureza se controla por medio de diversas técnicas de refinación. Los aceros inoxidables están disponibles en una amplia variedad de formas; las aplicaciones típicas incluyen cuchillería, equipos para cocina, para el cuidado de la salud y quirúrgico, y se usan en las industrias química, de procesamiento de alimento y del petróleo. Un uso reciente del acero inoxidable es como varilla de refuerzo (rebar) en concreto reforzado para algunas secciones de puentes, carreteras, edificios y otras formas de construcción, sobre todo en el ambiente marino. Las ventajas son: mejores propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión contra cloruros como la sal, así como contra el concreto en el que se embute la varilla. Aunque el costo inicial es elevado, se estima que, debido a los menores costos de mantenimiento, el acero inoxidable es más económico que las varillas de acero al carbono a lo largo de la vida útil de la estructura.

Generalmente, los aceros inoxidables se dividen en cinco tipos (ver tabla 5.4):

Austeníticos (series 200 y 300). En general, estos aceros están compuestos de cromo, níquel y manganeso en hierro. No son magnéticos y tienen excelente resistencia a la corrosión, pero son susceptibles al agrietamiento por esfuerzo-corrosión. Los aceros inoxidables austeníticos se endurecen mediante el trabajo en frío. Son los aceros inoxida-

TABLA 5.4

Propiedades mecánicas a temperatura ambiente y aplicaciones típicas de aceros inoxidables recocidos seleccionados

AISI (UNS)	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Características y aplicaciones típicas
303 (S30300)	550–620	240–260	53–50	Productos de máquinas roscadoras (flechas, válvulas, pernos, bujes y tuercas) y accesorios para aeronaves (pernos, tuercas, remaches, tornillos, espárragos).
304 (S30400)	5–620	240–290	60–55	Equipo químico y de proceso de alimentos, recipientes criogénicos, canales, caños y placas de escurrimiento.
316 (S31600)	50–590	210–290	60–55	Alta resistencia a la corrosión y alta resistencia a la termofluencia, equipo químico y para manejo de pulpas, equipo fotográfico, cubas para brandy, partes para fertilizadoras, jarras para cocinar salsa de tomate y tinas para levadura.
410 (S41000)	480–520	240–310	35–25	Partes para máquinas, flechas para bombas, pernos, bujes, canales para carbón, cuchillería, polipastos, herramientas, partes para motores de aviones, maquinaria para minería, cañones para armas, tornillos y válvulas.
416 (S41600)	480–520	275	30–20	Accesorios para aviones, pernos, tuercas, insertos para extinción de incendios, remaches y tornillos.

bles más dúctiles y se pueden formar con facilidad, aunque su formabilidad se reduce con mayor trabajo en frío. Se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, como los artículos de cocina, accesorios, construcción soldada, equipo ligero de transporte, partes para hornos e intercambiadores de calor, así como en componentes para ambientes químicos severos.

Ferríticos (serie 400). Estos aceros tienen un alto contenido de cromo (hasta 27%), son magnéticos y poseen buena resistencia a la corrosión, pero su ductilidad es más baja que la de los aceros inoxidables austeníticos. Los ferríticos se endurecen mediante trabajo en frío y no se les puede dar tratamiento térmico. En general se utilizan en aplicaciones no estructurales, como equipo para cocina y guardafangos automovilísticos.

Martensíticos (series 400 y 500). La mayoría de los aceros inoxidables martensíticos carecen de níquel y se endurecen mediante tratamiento térmico. Su contenido de cromo puede ser hasta de 18%, son magnéticos y tienen alta resistencia, dureza y resistencia a la fatiga, buena ductilidad y resistencia moderada a la corrosión. Se utilizan comúnmente en cuchillería, herramientas quirúrgicas, instrumentos, válvulas y resortes.

De endurecimiento por precipitación (PH, por sus siglas en inglés). Estos aceros contienen cromo y níquel, junto con cobre, aluminio, titanio o molibdeno. Tienen buena resistencia a la corrosión, ductilidad y alta resistencia a temperaturas elevadas. Se aplican principalmente en aeronaves y componentes estructurales aeroespaciales.

De estructura dúplex. Estos aceros tienen una mezcla de austenita y ferrita. Poseen buena resistencia y una mayor resistencia a la corrosión (en la mayoría de los ambientes) y al agrietamiento por esfuerzo-corrosión que los aceros austeníticos de la serie 300. Se aplican sobre todo en plantas de tratamiento de aguas y en componentes de intercambiadores de calor.

EJEMPLO 5.1 Uso de aceros inoxidables en los automóviles

Los tipos de aceros inoxidables que generalmente seleccionan los ingenieros de materiales para usarlos en partes automotrices son el 301, 409, 430 y 434. Debido a su buena resistencia a la corrosión y propiedades mecánicas, el tipo 301 se utiliza en tapones para ruedas. El trabajo en frío durante el proceso de formado aumenta su resistencia a la fluencia (merced al endurecimiento por deformación) y proporciona al tapón una acción similar a la de un resorte.

El tipo 409 se utiliza extensamente en convertidores catalíticos. El tipo 430 se había utilizado en guardafangos automovilísticos, pero no es tan resistente como el 434 contra las sales para descongelación utilizadas en los climas más fríos durante el invierno, de modo que su uso ahora es limitado. Además de ser más resistente a la corrosión, el tipo 434 se asemeja mucho al color del recubrimiento con cromo, por lo que se ha convertido en una alternativa atractiva. Los aceros inoxidables también están bien adaptados a fin de usarse en otros componentes para automóviles: múltiples de escape (reemplazando múltiples de hierro fundido para reducir el peso, aumentar la durabilidad, proporcionar mayor conductividad térmica y reducir las emisiones), silenciadores y tubos de escape (para ofrecer mejor protección contra la corrosión y los ambientes agresivos), así como en la tubería de los frenos.

5.7 Aceros para matrices y herramentales

Los **aceros para matrices y herramentales** (tablas 5.5 y 5.6) son aceros aleados especialmente diseñados para alta resistencia, tenacidad al impacto y resistencia al desgaste a temperatura ambiente y a temperaturas elevadas. Se utilizan por lo común en el formado y maquinado de metales (partes III y IV).

5.7.1 Aceros de alta velocidad

Los **aceros de alta velocidad** (**HSS**, por sus siglas en inglés) son los aceros para herramentales y matrices con mayores aleaciones. Desarrollados a principios de 1900, mantienen su dureza y resistencia a elevadas temperaturas de operación. Existen dos tipos básicos de aceros de alta velocidad: el **tipo molibdeno** (serie M) y el **tipo tungsteno** (serie T).

TABLA 5.5

Tipos básicos de aceros para matrices y herramentales

Tipo	AISI
De alta velocidad	M (base de molibdeno)
	T (base de tungsteno)
De trabajado en caliente	H1 a H19 (base de cromo)
	H20 a H39 (base de tungsteno)
	H40 a H59 (base de molibdeno)
De trabajado en frío	D (alto carbono, alto cromo)
	A (aleación media, alta templabilidad)
	O (templabilidad en aceite)
Resistente al impacto	S
Aceros para moldes	P1 a P19 (bajo carbono)
	P20 a P39 (otros)
De propósito especial	L (baja aleación)
	F (carbono-tungsteno)
Templables al agua	W

TABLA 5.6

Características de procesamiento y de servicio de aceros comunes para matrices y herramentales

Denominación AISI	Resistencia a la descarburización	Resistencia al agrietamiento	Dureza aproximada (HRC)	Maquinabilidad	Tenacidad	Resistencia al ablandamiento	Resistencia al desgaste
M2	Media	Media	60–65	Media	Baja	Muy alta	Muy alta
T1	Alta	Alta	60–65	Media	Baja	Muy alta	Muy alta
T5	Baja	Media	60–65	Media	Baja	La más alta	Muy alta
H11, 12, 13	Media	La más alta	38–55	Media a alta	Muy alta	Alta	Media
A2	Media	La más alta	57–62	Media	Media	Alta	Alta
A9	Media	La más alta	35–56	Media	Alta	Alta	Media a alta
D2	Media	La más alta	54–61	Baja	Baja	Alta	Alta a muy alta
D3	Media	Alta	54–61	Baja	Baja	Alta	Muy alta
H21	Media	Alta	36–54	Media	Alta	Alta	Media a alta
H26	Media	Alta	43–58	Media	Media	Muy alta	Alta
P20	Alta	Alta	28–37	Media a alta	Alta	Baja	Baja a media
P21	Alta	La más alta	30–40	Media	Media	Media	Media
W1, W2	La más alta	Media	50–64	La más alta	Alta	Baja	Baja a media

La **serie M** contiene hasta 10% de molibdeno, con cromo, vanadio, tungsteno y cobalto como otros elementos de aleación. La **serie T** contiene de 12% a 18% de tungsteno, con cromo, vanadio y cobalto como otros elementos de aleación. Los aceros de la serie M por lo general tienen una mayor resistencia a la abrasión que los de la serie T, sufren menos distorsión durante el tratamiento térmico y su costo es menor. La serie M constituye casi 95% de todos los aceros de alta velocidad producidos en Estados Unidos. Las herramientas de acero de alta velocidad se pueden recubrir con nitruro de titanio y con carburo de titanio para mejorar la resistencia al desgaste.

5.7.2 Aceros para matrices

Los **aceros para trabajo en caliente** (serie H) están diseñados para usarse en temperaturas elevadas. Tienen una alta tenacidad, así como una gran resistencia al desgaste y al agrietamiento. En general, los elementos de aleación son tungsteno, molibdeno, cromo y vanadio. Los **aceros para trabajo en frío** (series A, D y O) se utilizan en operaciones de trabajo en frío; están disponibles en los tipos templables al aceite y al aire. Los **aceros resistentes al impacto** (serie S) se diseñan para tener tenacidad al impacto y se utilizan en aplicaciones como matrices para cabeceado, punzones y cinceles. Otras propiedades de estos aceros dependen de su composición en particular. En la tabla 5.7 se presentan diversos materiales para herramentales y matrices para una variedad de aplicaciones de manufactura.

TABLA 5.7

Materiales típicos para matrices y herramental para trabajo de los metales

Proceso	Material
Fundición a presión	H13, P20
Metalurgia de polvos	
Punzones	A2, S7, D2, D3, M2
Matrices	WC, D2, M2
Moldes para plásticos y hule	S1, O1, A2, D2, 6F5, 6F6, P6, P20, P21, H13
Forjado en caliente	6F2, 6G, H11, H12
Extrusión en caliente	H11, H12, H13, H21
Cabeceado en frío	W1, W2, M1, M2, D2, WC
Extrusión en frío	
Punzones	A2, D2, M2, M4
Matrices	O1, W1, A2, D2
Acuñado	52100, W1, O1, A2, D2, D3, D4, H11, H12, H13
Estirado	
Alambre	WC, diamante
Formas	WC, D2, M2
Barras y tubos	WC, W1, D2
Laminados	
Laminado	Hierro fundido, acero fundido, acero forjado, WC
Laminado de cuerdas	A2, D2, M2
Laminado de corte	A2, D2, D3
Hojas metálicas	
Cizallado	
En frío	D2, A2, A9, S2, S5, S7
En caliente	H11, H12, H13
Prensado	Aleaciones de zinc, acero 4140, hierro fundido, compósitos de epóxicas, A2, D2, O1
Embutido profundo	W1, O1, hierro fundido, A2, D2
Maquinado	Carburos, aceros de alta velocidad, cerámicas, diamante, nitruro de boro cúbico

Notas: Usualmente, los materiales para matrices y herramental se endurecen de 55 a 65 HRC para trabajado en frío, y de 30 a 55 HRC para trabajado en caliente. Los aceros para matrices y herramental contienen uno o más de los siguientes elementos principales de aleación: cromo, molibdeno, tungsteno y vanadio. Para mayores detalles, véase la bibliografía al final de este capítulo.

RESUMEN

- Las categorías más importantes de metales y aleaciones ferrosas son los aceros al carbono, aleados, inoxidables y para herramentales y matrices. Su amplia gama de propiedades y bajo costo en general los han convertido en los materiales metálicos más útiles.
- Los procesos de fabricación de acero han mejorado continuamente, de manera notable mediante las técnicas de colado continuo y refinación secundaria. Estos avances han producido aceros de mayor calidad y una mayor eficiencia y productividad.
- Los elementos de aleación influyen en gran medida en las propiedades mecánicas, físicas, químicas y de manufactura (templabilidad, colabilidad, formabilidad, maquinabilidad y soldabilidad) y en el desempeño durante el servicio.
- Por lo general, los aceros al carbono se clasifican como aceros de bajo carbono (acero dulce), medio carbono y alto carbono. Los aceros aleados contienen una variedad de elementos, en particular cromo, níquel y molibdeno. Los aceros inoxidables generalmente se clasifican como austeníticos, ferríticos, martensíticos y de endurecimiento por precipitación.

- Los aceros para herramentales y matrices se encuentran entre los materiales más importantes; se utilizan ampliamente en operaciones de fundición, formado y maquinado, tanto para materiales metálicos como no metálicos. Por lo general consisten en aceros de alta velocidad (tipos molibdeno y tungsteno), aceros para trabajo en caliente y en frío, y aceros resistentes al impacto.

TÉRMINOS CLAVE

Acero calmado
Acero efervescente
Acero semicalmado
Aceros al carbono
Aceros aleados
Aceros bifásicos
Aceros de baja aleación de alta resistencia
Aceros inoxidables
Aceros microaleados
Aceros nanoaleados
Aceros para herramentales y matrices
Alto horno
Arrabio
Cochino
Colada continua
Convertidor básico de oxígeno
Elementos residuales o traza de elementos
Fundición de hilos
Horno de hogar abierto
Horno eléctrico
Lingote
Refinación

BIBLIOGRAFÍA

ASM Handbook, Vol. 1: *Properties and Selection: Iron, Steels, and High-Performance Alloys*, ASM International, 1990.

ASM Specialty Handbook: Carbon and Alloy Steels, ASM International, 1995.

ASM Specialty Handbook: Stainless Steels, ASM International, 1994.

ASM Specialty Handbook: Tool Materials, ASM International, 1995.

Beddoes, J. y Parr, J. G., *Introduction to Stainless Steels*, 3a. ed., ASM International, 1999.

Bryson, B., *Heat Treatment, Selection and Application of Tool Steels*, Hanser Gardner, 1997.

Donachie, N. J. y Donachie, S. J., *Superalloys: A Technical Guide*, 2a. ed., ASM International, 2001.

Farag, M. M., *Materials Selection for Engineering Design*, Prentice Hall, 1997.

Harper, C. (ed.), *Handbook for Materials for Product Design*, 3a. ed., McGraw-Hill, 2001.

Llewellyn, D. T. y Hudd, R. C., *Steels: Metallurgy and Applications*, 3a. ed., Butterworth-Heinemann, 1999.

Roberts, G. A., Krauss, G. y Kennedy, R., *Tool Steels*, 5a. ed., ASM International, 1998.

PREGUNTAS DE REPASO

5.1 ¿Cuáles son las categorías más importantes de las aleaciones ferrosas?

5.2 Liste las materias primas básicas utilizadas para fabricar hierro y acero, y explique sus funciones.

5.3 Liste los tipos de hornos más utilizados en el proceso de aceración y describa sus características.

5.4 Liste y explique las características de los tipos de lingotes de acero.

5.5 ¿Qué significa refinación? ¿Cómo se realiza?

5.6 ¿Qué ventajas tiene la colada continua sobre la fundición en lingote?

5.7 Nombre los cuatro elementos de aleación que tienen el mayor efecto en las propiedades de los aceros.

5.8 ¿Qué son los elementos residuales o traza?

5.9 ¿Cuáles son los porcentajes de contenido de carbono de los aceros de bajo carbono, medio carbono y alto carbono?

5.10 ¿Cómo se vuelve inoxidable el acero?

5.11 ¿Cuáles son los principales elementos de aleación en los aceros para herramentales y matrices y en los aceros de alta velocidad?

5.12 ¿Cómo afecta el cromo las características de la superficie de los aceros inoxidables?

5.13 ¿Qué tipo de hornos se utilizan para refinar aceros?

5.14 ¿Qué es el acero de alta velocidad?

5.15 ¿De dónde proviene el termino “hierro cochino”?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

5.16 Identifique varios productos que estén fabricados con acero inoxidable y diga por qué se elaboran con este material.

5.17 Como probablemente sepa, los cocineros profesionales prefieren los cuchillos de acero al carbono en lugar de los de acero inoxidable, aunque estos últimos son más populares entre los consumidores. Explique las razones de esa preferencia.

5.18 ¿Por qué es importante controlar la estructura de un lingote?

5.19 Explique por qué la colada continua es un avance tecnológico tan importante.

5.20 Describa aplicaciones en las que no querría utilizar aceros al carbono.

5.21 Explique qué pasaría si la velocidad del proceso de colada continua (fig. 5.4) fuere *(a)* mayor, o *(b)* menor que la indicada (normalmente 25 mm/s).

5.22 El costo de los productos laminados de metales aumenta al disminuir el espesor y el tamaño de la sección. Explique por qué.

5.23 Describa sus observaciones en relación con la información dada en la tabla 5.7.

5.24 ¿Cómo afectan los elementos residuales en la ductilidad de los aceros?

5.25 Comente sus observaciones en relación con la tabla 5.1.

5.26 En la tabla 5.7, el acero D2 se lista como material para herramentales y matrices para la mayoría de las aplicaciones. ¿Por qué?

5.27 Liste las impurezas comunes en el acero. ¿Cuáles son las más probables de minimizar si el acero se funde en un horno de vacío?

5.28 Explique el propósito del aceite en la figura 5.4, dado que las temperaturas del acero fundido son mucho más elevadas que las de ignición del aceite.

5.29 Una investigación reciente ha identificado texturas de la superficie de los moldes que *(a)* inhiben la separación de un acero solidificado del molde, o *(b)* lo fuerzan a permanecer en contacto durante la colada continua. ¿Cuál es la ventaja de un molde que mantiene íntimo contacto con el acero?

5.30 Identifique productos que no se puedan fabricar con acero y diga por qué es así. Por ejemplo, los contactos eléctricos suelen fabricarse con oro o cobre, debido a que su blandura provoca una baja resistencia al contacto, mientras que en el caso del acero la resistencia al contacto sería muy elevada.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

5.31 Consultando la bibliografía disponible, estime el costo de las materias primas para *(a)* una lata de aluminio para bebidas, *(b)* un recipiente para cocina de dos litros de acero inoxidable, *(c)* la tapa del motor (cofre) de acero de un automóvil.

5.32 En la tabla 5.1 se indica más de un tipo de acero para algunas aplicaciones. Consulte los datos en la literatura técnica listada en la bibliografía y determine la gama de propiedades de estos aceros en diferentes condiciones (como trabajado en frío, trabajado en caliente y recocido).

5.33 Ahora algunas bebidas se expenden en latas de acero (con tapas de aluminio) que se ven iguales a las latas de aluminio. Consiga una de cada una de ellas, péselas cuando estén vacías y determine sus espesores de pared correspondientes.

5.34 Utilizando los datos de resistencia y densidad, determine el peso mínimo de un miembro a tensión de dos pies de largo, que debe soportar 1000 lb, fabricado con *(a)* acero inoxidable 303 recocido, *(b)* acero 8620 normalizado, *(c)* acero 1080 laminado, *(d)* cualesquiera dos aleaciones de aluminio, *(e)* cualquier aleación de latón, o *(f)* cobre puro.

5.35 El límite de resistencia a la fatiga del acero es aproximadamente la mitad de la resistencia máxima (ver fig. 2.16), aunque nunca mayor que 100 ksi (700 MPa). Para el hierro, el límite de resistencia a la fatiga es 40% de la resistencia máxima, aunque nunca mayor que 24 ksi (170 MPa). Grafique el límite de resistencia a la fatiga contra la resistencia máxima de los aceros descritos en este capítulo y para los hierros fundidos en la tabla 12.3. En la misma gráfica, muestre el efecto del acabado superficial trazando el límite de resistencia a la fatiga; suponga que el material está en la condición de colada (ver fig. 2.28).

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

5.36 Con base en la información dada en la sección 5.5.1, haga una tabla con columnas para cada propiedad mejorada (es decir, templabilidad, resistencia, tenacidad y maquinabilidad). En cada columna, indique los elementos que mejoran esa propiedad e identifique el elemento que tiene mayor influencia.

5.37 Suponga que está a cargo de las relaciones públicas de una compañía productora de acero. Describa todas las características atractivas de los aceros que le gustaría que conocieran sus clientes.

5.38 Suponga que está compitiendo con la industria del acero, y se le pide que liste las características de los aceros que no son atractivas. Haga una lista de estas características y explique su importancia en la ingeniería.

5.39 En la sección 5.5.1 hicimos notar los efectos de diversos elementos individuales (como el plomo o el azufre solos) sobre las propiedades y características de los aceros. Sin embargo, no discutimos el papel de las combinaciones de los elementos (como plomo y azufre juntos). Revise la bibliografía técnica y elabore una tabla que indique los efectos combinados de varios elementos en los aceros.

5.40 En el pasado, los cazadores de aves acuáticas utilizaban balas de plomo, pero esta práctica provocaba el envenenamiento por plomo de las aves a las que no les disparaban y que ingerían las partículas de plomo (junto con piedras) para ayudarse a digerir la comida. Recientemente, se han utilizado el acero y el tungsteno como materiales de reemplazo. Si todas las partículas tienen la misma velocidad al salir del cañón del arma, ¿qué le interesaría saber respecto de esta sustitución de material? Considere los efectos ambientales y de desempeño.

5.41 Se ha mencionado al aluminio como un posible material sustituto del acero en los automóviles. ¿Qué le preocuparía antes de comprar un automóvil de aluminio?

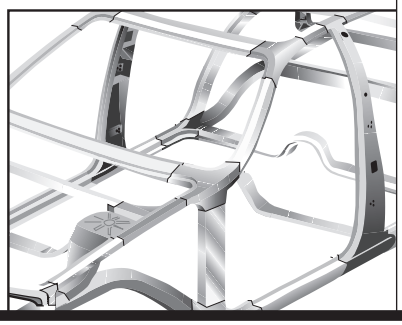
5.42 En la década de 1940, el *Yamato* fue el barco de guerra más grande jamás construido. Encuentre el peso de esta embarcación y determine cuántos automóviles podrían fabricarse con el acero de la nave. ¿Cuánto tiempo requeriría fundir esta cantidad de acero mediante colada continua?

5.43 Busque en la bibliografía técnica y agregue más partes y materiales a los mostrados en la tabla 5.1.

CAPÍTULO

6

Metales y aleaciones no ferrosas: producción, propiedades generales y aplicaciones



Una extensa variedad de metales y aleaciones no ferrosas, que van del aluminio al zinc, son indispensables para una amplia variedad de aplicaciones en ingeniería. En este capítulo se describen:

- Métodos de producción para metales no ferrosos.
- Propiedades físicas y mecánicas de los metales y aleaciones no ferrosas y su importancia.
- Aplicaciones para estas aleaciones.
- Aleaciones con memoria de forma, aleaciones amorfas y nanomateriales y sus usos únicos.

6.1 Introducción 169
6.2 Aluminio y sus aleaciones 170
6.3 Magnesio y sus aleaciones 174
6.4 Cobre y sus aleaciones 176
6.5 Níquel y sus aleaciones 178
6.6 Superaleaciones 179
6.7 Titanio y sus aleaciones 180
6.8 Metales y aleaciones refractarias 181
6.9 Berilio 183
6.10 Zirconio 183
6.11 Aleaciones de baja fusión 183
6.12 Metales preciosos 185
6.13 Aleaciones con memoria de forma 185
6.14 Aleaciones amorfas (vidrios metálicos) 186
6.15 Espumas metálicas 186
6.16 Nanomateriales 186

EJEMPLO:

6.1 Un automóvil totalmente de aluminio 174

6.1 Introducción

Los **metales y las aleaciones no ferrosas** cubren una amplia gama, desde los metales más comunes (como el aluminio, cobre y magnesio) hasta aleaciones de alta temperatura y alta resistencia (como el tungsteno, tantalio y molibdeno). Aunque por lo general cuestan más que los metales ferrosos (tabla 6.1), los metales y aleaciones no ferrosas tienen aplicaciones importantes debido a propiedades como la resistencia a la corrosión, alta conductividad térmica y eléctrica, baja densidad y facilidad de fabricación (tabla 6.2). Ejemplos típicos de sus aplicaciones son el aluminio para los utensilios de cocina y los fuselajes de los aviones, el alambre de cobre empleado en electricidad, la tubería de cobre para suministro de agua residencial, el zinc para láminas metálicas galvanizadas que se utilizan en carrocerías de automóviles, el titanio para álabes de turbinas de motores de propulsión e implantes ortopédicos, y el tantalio para motores de cohetes.

Un motor a propulsión de turboventilador para el avión Boeing 757 contiene en general los siguientes metales y aleaciones no ferrosas: 38% de Ti, 37% de Ni, 12% de Cr, 6% de Co, 5% de Al, 1% de Nb y 0.02% de Ta. Sin estos materiales, no podría diseñarse, fabricarse, y accionarse un motor de propulsión (fig. 6.1) con los niveles de potencia y eficiencia requeridos.

En este capítulo se presentan las propiedades generales, los métodos de producción y las importantes aplicaciones de ingeniería para los metales y aleaciones no ferrosas. Las propiedades de manufactura de estos materiales (como la formabilidad, maquinabilidad y soldabilidad) se describen en varios capítulos a lo largo de este texto.

TABLA 6.1

Costo aproximado por unidad de volumen para metales forjables y plásticos, en relación con el costo del acero al carbono

Oro	60,000	Aleaciones de magnesio	2–4
Plata	600	Aleaciones de aluminio	2–3
Aleaciones de molibdeno	200–250	Aceros de baja aleación de alta resistencia	1.4
Níquel	35	Hierro fundido gris	1.2
Aleaciones de titanio	20–40	Acero al carbono	1
Aleaciones de cobre	5–6	Nailons, acetales y hule de silicio*	1.1–2
Aleaciones de zinc	1.5–3.5	Otros plásticos y elastómeros*	0.2–1
Aceros inoxidables	2–9		

*Como compuestos moldeables.
Nota: Los costos varían significativamente según la cantidad de compra, oferta y demanda, forma y tamaño, además de otros factores.

TABLA 6.2

Características generales de los metales y aleaciones no ferrosas

Material	Características
Aleaciones no ferrosas	Más costosas que los aceros y plásticos; amplia gama de propiedades mecánicas, físicas y eléctricas; buena resistencia a la corrosión; aplicaciones a alta temperatura.
Aluminio	Alta relación resistencia-peso; alta conductividad térmica y eléctrica; buena resistencia a la corrosión; buenas propiedades de manufactura.
Magnesio	El metal más ligero; buena relación resistencia-peso.
Cobre	Alta conductividad eléctrica y térmica; buena resistencia a la corrosión; buenas propiedades de manufactura.
Superaleaciones	Buena resistencia y resistencia a la corrosión a temperaturas elevadas; pueden ser aleaciones a base de hierro, cobalto y níquel.
Titanio	La más alta relación resistencia-peso de todos los metales; buena resistencia y resistencia a la corrosión a temperaturas elevadas.
Metales refractarios	Molibdeno, niobio (columbio), tungsteno y tantalio; alta resistencia a temperaturas elevadas.
Metales preciosos	Oro, plata y platino; generalmente tienen buena resistencia a la corrosión.

6.2 Aluminio y sus aleaciones

Las propiedades que favorecen la selección del **aluminio** (Al) y sus aleaciones son su alta relación de resistencia-peso, resistencia a la corrosión de muchos productos químicos, alta conductividad térmica y eléctrica, atoxicidad, reflectividad, apariencia y formabilidad y maquinabilidad; además, son no magnéticos. Los usos principales del aluminio y sus aleaciones, en orden decreciente de consumo, se dan en contenedores y empaques (latas y papel aluminio), edificios y otros tipos de construcción, transporte (aplicaciones en aviones y naves aeroespaciales, autobuses, automóviles, carros de ferrocarril y artículos marinos), aplicaciones eléctricas (como conductor eléctrico económico y no magnético), productos de consumo durables (artículos domésticos, utensilios de cocina y muebles) y herramientas portátiles (tablas 6.3 y 6.4). Casi todo el cableado para transmisión de alto voltaje se fabrica con aluminio. El 82% de los componentes estructurales (de soporte de carga) del avión Boeing 747, y 70% del Boeing 777, son de aluminio.

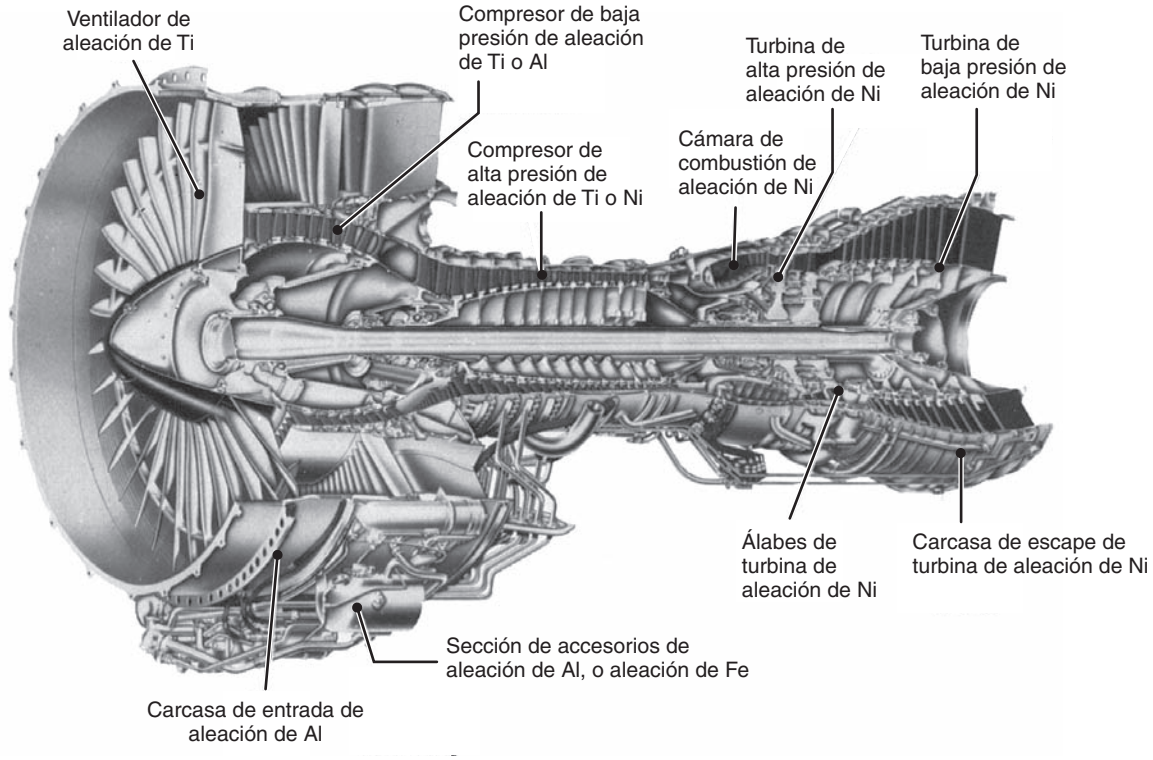


FIGURA 6.1 Sección transversal de un motor de propulsión (PW2037) mostrando diversos componentes y las aleaciones utilizadas para fabricarlos. *Fuente:* Cortesía de United Aircraft Pratt & Whitney.

TABLA 6.3

Propiedades de aleaciones seleccionadas de aluminio a temperatura ambiente

Aleación (UNS)	Temple	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)
1100 (A91100)	O	90	35	35–45
1100	H14	125	120	9–20
2024 (A92024)	O	190	75	20–22
2024	T4	470	325	19–20
3003 (A93003)	O	110	40	30–40
3003	H14	150	145	8–16
5052 (A95052)	O	190	90	25–30
5052	H34	260	215	10–14
6061 (A96061)	O	125	55	25–30
6061	T6	310	275	12–17
7075 (A97075)	O	230	105	16–17
7075	T6	570	500	11

Existen aleaciones de aluminio disponibles como productos laminados, esto es, como productos forjables a los que se dan diferentes formas mediante laminado, extrusión, embutido y forjado (capítulos 13 a 15). Existen lingotes de aluminio para fundición, al

TABLA 6.4

Propiedades de manufactura y aplicaciones típicas de aleaciones forjables de aluminio seleccionadas

Aleación	Características*			Aplicaciones típicas
	Resistencia a la corrosión	Maquinabilidad	Soldabilidad	
1100	A	C–D	A	Trabajo de lámina metálica, artículos huecos producidos por rechazado, recipientes.
2024	C	B–C	B–C	Ruedas para camiones, productos para máquinas roscadoras, estructuras para aeronaves.
3003	A	C–D	A	Utensilios de cocina, equipo químico, recipientes a presión, trabajos de láminas metálicas, artículos para constructores, tanques de almacenamiento.
5052	A	C–D	A	Trabajos de láminas metálicas, tubos hidráulicos y artículos domésticos; autobuses, camiones y usos marinos.
6061	B	C–D	A	Estructuras de trabajo pesado donde se necesita resistencia a la corrosión; camiones y estructuras marinas, carros de ferrocarril, muebles, ductos, pasamanos en puentes, tubería hidráulica.
7075	C	B–D	D	Aeronaves y otras estructuras, llaves, accesorios hidráulicos.

*A = excelente; D = deficiente

igual que aluminio en forma de polvo para aplicaciones de metalurgia de polvos (capítulo 17). La mayoría de las aleaciones de aluminio se pueden maquinar, formar y soldar con relativa facilidad.

Existen dos tipos de aleaciones forjables de aluminio:

1. Aleaciones que se pueden *endurecer mediante trabajo en frío* y que no se pueden tratar térmicamente.
2. Aleaciones que se pueden *endurecer mediante tratamiento térmico*.

Denominación de las aleaciones de aluminio forjable. Las aleaciones de aluminio forjable se identifican mediante cuatro dígitos más la **severidad de temple** que muestra la condición del material. (Ver también el Sistema de Numeración Unificado en esta sección). El primer dígito identifica el principal elemento de aleación.

1xxx—Aluminio comercialmente puro. Excelente resistencia a la corrosión, alta conductividad eléctrica y térmica, buena capacidad de trabajo, baja resistencia, no tratable térmicamente.
2xxx—Cobre. Alta relación resistencia-peso, baja resistencia a la corrosión, tratable térmicamente.
3xxx—Manganeso. Buena capacidad de trabajo, resistencia moderada, por lo general no tratable térmicamente.
4xxx—Silicio. Punto de fusión más bajo, forma una película de óxido de color gris oscuro a negro, en general no tratable térmicamente.
5xxx—Magnesio. Buena resistencia a la corrosión y soldabilidad, resistencia de moderada a elevada, no tratable térmicamente.
6xxx—Magnesio y silicio. Resistencia media; buena formabilidad, maquinabilidad, soldabilidad y resistencia a la corrosión; tratable térmicamente.
7xxx—Zinc. Resistencia de moderada a muy elevada, tratable térmicamente.
8xxx—Otro elemento.

El segundo dígito en estas denominaciones indica modificaciones a la aleación. Para la serie 1xxx, el tercero y cuarto dígitos representan la cantidad mínima de aluminio en la aleación. Por ejemplo, 1050 indica un mínimo de 99.50% de Al y 1090 indica un mínimo de 99.90% de Al. En otras series, el tercero y cuarto dígitos identifican las diferentes aleaciones en el grupo y no tienen importancia numérica. Una lata de aluminio pa-

ra bebidas puede tener las siguientes aleaciones de aluminio, todas en la condición H19 (que es el mayor estado de trabajo en frío): 3004 o 3104 para el cuerpo de la lata, 5182 para la tapa y 5042 para la pestaña. Estas aleaciones se seleccionan por sus características de manufactura y por su economía.

Denominación de las aleaciones de aluminio fundido. Las denominaciones para las aleaciones de aluminio fundido también constan de cuatro dígitos. El primer dígito indica el grupo principal de la aleación, como sigue:

1xx.x—Aluminio (99.00% mínimo)
2xx.x—Aluminio-cobre
3xx.x—Aluminio-silicio (con cobre y/o magnesio)
4xx.x—Aluminio-silicio
5xx.x—Aluminio-magnesio
6xx.x—Serie no utilizada
7xx.x—Aluminio-zinc
8xx.x—Aluminio-estaño

En la serie 1xx.x, el segundo y tercer dígitos indican el contenido mínimo de aluminio, al igual que el tercero y cuarto dígitos en el aluminio forjable. Para las otras series, el segundo y tercer dígitos no tienen importancia numérica. El cuarto dígito (a la derecha del punto decimal) indica la forma del producto.

Denominaciones de temple. Las denominaciones de temple tanto para el aluminio forjable como para el fundido son las siguientes:

- F—Como se fabrica (mediante trabajo en frío o en caliente, o por fundición).
- O—Recocido (desde el estado de trabajado en frío o fundido).
- H—Endurecido por deformación mediante trabajo en frío (sólo para productos forjados).
- T—Tratado térmicamente.
- W—Sólo tratado con soluciones (temple inestable).

Sistema Unificado de Numeración. Al igual que los aceros, ahora se identifica internacionalmente el aluminio y otros metales no ferrosos y sus aleaciones mediante el Sistema Unificado de Numeración (UNS, por sus siglas en inglés), que consta de una letra que indica la clase general de la aleación, seguida de cinco dígitos que indican su composición química. Por ejemplo, A es para el aluminio, C para el cobre, N para las aleaciones de níquel, P para los metales preciosos y Z para el zinc. En la denominación UNS, la aleación de aluminio forjable 2024 es A92024.

Producción. El aluminio se produjo por primera vez en 1825. Es el elemento metálico más abundante, pues constituye casi 8% de la corteza terrestre, y su producción se encuentra en segundo lugar, sólo detrás de la del acero. El principal mineral para el aluminio es la *bauxita*, un óxido hidratado (que contiene agua) de aluminio e incluye diversos óxidos. Después de lavarlo para retirar la arcilla y la suciedad, el mineral se tritura y se trata con sosa cáustica caliente (hidróxido de sodio) para retirar impurezas. De esta solución se extrae la alúmina (óxido de aluminio) y después se disuelve en un baño fundido de fluoruro de sodio y fluoruro de aluminio de 940 °C a 980 °C (1725 °F a 1800 °F). Después, la mezcla se somete a electrólisis con corriente directa. El aluminio metálico se forma en el cátodo (polo negativo), mientras que en el ánodo (polo positivo) se libera oxígeno. El *aluminio comercialmente puro* tiene hasta 99.99% de Al; en la industria también se le conoce como aluminio de "cuatro nueves". El proceso de su producción consume una gran cantidad de electricidad, lo que contribuye de modo significativo al costo del aluminio.

Aluminio poroso. Se han producido bloques de aluminio 37% más ligeros que el aluminio sólido y con una permeabilidad (*microporosidad*) uniforme. Esta característica permite usarlos en aplicaciones donde debe mantenerse un vacío o una presión diferencial. Ejemplos de ello son la sujeción al vacío de soportes para ensamble y automatización y el formado o termoformado de plásticos al vacío (sección 19.6). Estos bloques tienen entre 70% y 90% de aluminio; el resto es resina epóxica. Se pueden maquinar con relativa facilidad y pueden unirse mediante adhesivos.

EJEMPLO 6.1 Un automóvil totalmente de aluminio

El uso del aluminio en automóviles y camiones ligeros ha aumentado con firmeza: en 1990 no había en producción vehículos con estructuras de aluminio en ninguna parte del mundo; pero en 1997 ya había siete de ellos, incluyendo el Plymouth Prowler y el Audi A8 (fig. 6.2). Con ahorros de peso hasta de 47% respecto de los vehículos de acero, estos carros utilizan menos combustible, producen menos contaminación y son reciclables.

Tenían que desarrollarse nuevas aleaciones y otras metodologías de diseño y manufactura. Por ejemplo, debían refinarse procedimientos de soldadura y unión con adhesivos, optimizarse el diseño del marco estructural y desarrollarse nuevos diseños de herramental (para permitir dar forma al aluminio). Debido a estas nuevas tecnologías, los ahorros ambientales deseados pudieron realizarse sin disminuir el desempeño o la seguridad. De hecho, el Audi A8 es el primer automóvil de lujo que obtiene una clasificación de cinco estrellas doble (la mayor seguridad) tanto para el conductor como para el pasajero del asiento delantero en el New Car Assessment Program (Programa de Evaluación de Automóviles Nuevos) de la National Highway Transportation Safety Administration (NHSTA) en Estados Unidos.

6.3 Magnesio y sus aleaciones

El **magnesio** (Mg) es el metal de ingeniería más ligero que existe y tiene buena capacidad de amortiguamiento de las vibraciones. Sus aleaciones se utilizan en aplicaciones estructurales y no estructurales en cualquier lugar donde el peso es de suma importancia. El magnesio también es un elemento de aleación en diversos metales no ferrosos.

Las aleaciones de magnesio suelen utilizarse en aeronaves y componentes de misiles, equipo para manejo de materiales, herramientas portátiles de potencia, escaleras, equipajes, bicicletas, artículos deportivos y componentes ligeros en general. Estas aleaciones se encuentran disponibles como fundiciones (estructuras para cámaras fundidas a presión) o como productos forjables (barras y formas extruidas, forjas, placas y hojas laminadas). También se utilizan en maquinaria para impresión y textil, a fin de minimizar las fuerzas de inercia en componentes de alta velocidad (sección 3.2).

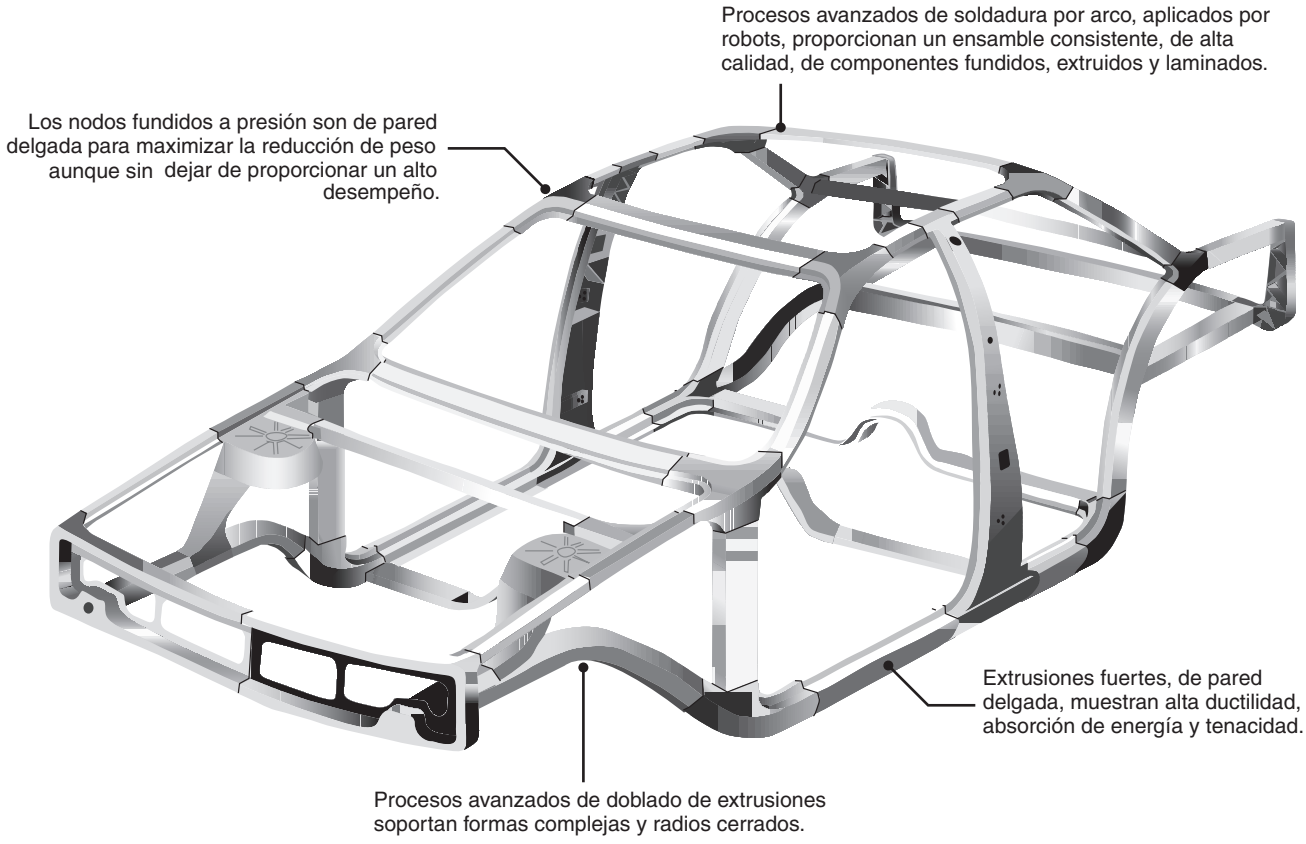
Debido a que en su forma pura no es suficientemente fuerte, el magnesio se alea con diversos elementos (tabla 6.5) para obtener propiedades específicas, en particular una alta relación de resistencia a peso. Varias aleaciones de magnesio tienen buenas características de colabilidad, formado y maquinado. Como estas aleaciones se oxidan rápidamente (son *pirofóricas*), existe el riesgo de que se incendien y deben tomarse precauciones al maquinarlas, rectificarlas o fundirlas en arena. Sin embargo, durante su uso normal los productos fabricados con magnesio y sus aleaciones no presentan mayor riesgo de incendio.

Denominación de las aleaciones de magnesio. Las aleaciones de magnesio se denominan como sigue:

a. Una o dos letras como prefijo, que indican los principales elementos de aleación.
b. Dos o tres números, que indican el porcentaje de los principales elementos de aleación redondeados al decimal más próximo.



(a)



(b)

FIGURA 6.2 *(a)* Automóvil Audi A8; la estructura de su carrocería es toda de aluminio. *(b)* Estructura de carrocería de aluminio; muestra diversos componentes fabricados por procesos de extrusión, formado de lámina y fundición. *Fuente*: Cortesía de ALCOA, Inc.

c. Una letra del alfabeto (excepto las letras I y O), que indican la aleación normalizada con variaciones menores en la composición.

d. Un símbolo para el temple del material, que sigue el sistema utilizado para las aleaciones de aluminio.

TABLA 6.5

Propiedades y formas típicas de aleaciones forjables de magnesio seleccionadas

Aleación	Composición (%)					Condición	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Formas típicas
	Al	Zn	Mn	Zr	Th					
AZ31 B	3.0	1.0	0.2	—	—	F	260	200	15	Extrusiones
						H24	290	220	15	Láminas y placas
AZ80A	8.5	0.5	0.2	—	—	T5	380	275	7	Extrusiones y forjas
HK31A	—	—	—	0.7	3	H24	255	200	8	Láminas y placas
ZK60A	—	5.7	—	0.55	—	T5	365	300	11	Extrusiones y forjas

Por ejemplo, considérese la aleación AZ91C-T6:

- Los principales elementos de aleación son el aluminio (A a 9%, redondeado) y zinc (Z a 1%).
- La letra C, la tercera del alfabeto, indica que esta aleación fue la tercera normalizada (después de la A y la B, que fueron la primera y segunda aleaciones que se normalizaron, respectivamente).
- T6 indica que esta aleación fue tratada con solución y se envejeció artificialmente.

Producción. El magnesio es el tercer elemento metálico más abundante (2%) en la corteza terrestre, después del hierro y el aluminio. La mayor parte proviene del agua de mar, que contiene 0.13% de magnesio en forma de cloruro de magnesio. Producido por primera vez en 1808, el magnesio metálico se puede obtener por electrólisis o por reducción térmica. En el *método electrolítico*, el agua de mar se mezcla con cal (hidróxido de calcio) en tanques de asentamiento. El hidróxido de magnesio se precipita en el fondo y se filtra y mezcla con ácido clorhídrico. Esta solución se somete a electrólisis (como se hace con el aluminio); la operación produce magnesio metálico, que después se funde en lingotes para su procesamiento y formado posterior. En el *método de reducción térmica*, la roca mineral que contiene magnesio (dolomita, magnesita y otras rocas) se separa con agentes reductores (como ferrosilicio en polvo y una aleación de hierro y silicio) calentando la mezcla en una cámara al vacío. Como resultado de esta reacción se forman vapores de magnesio, que se condensan en cristales de magnesio. Luego estos cristales se funden, refinan y vierten en lingotes para procesarlos y darles distintas formas.

6.4 Cobre y sus aleaciones

Producido por primera vez hacia el año 4000 a.C., el **cobre** (Cu, del latín *cuprum*) y sus aleaciones tienen propiedades similares a las del aluminio y sus aleaciones. Además, se encuentran entre los mejores conductores de electricidad y calor (tablas 3.1 y 3.2) y tienen buena resistencia a la corrosión. Se pueden procesar fácilmente por medio de diversas técnicas de formado, maquinado, fundido y unión.

Con frecuencia, las aleaciones de cobre son atractivas para aplicaciones en las que se requiere una combinación de cualidades eléctricas, mecánicas, no magnéticas, de resistencia a la corrosión, de conductividad térmica y de resistencia al desgaste. Por ejemplo, componentes eléctricos y electrónicos, resortes, cartuchos para armas pequeñas, plomería, intercambiadores de calor, artículos marinos y bienes de consumo (como utensilios de cocina, joyería y otros objetos decorativos). Aunque el aluminio es el material más común para matrices en el moldeo de polímeros por inyección (sección 19.3), a menudo se utiliza cobre porque tiene mejores propiedades térmicas. El cobre puro

también se puede utilizar como lubricante sólido en las operaciones de formado de metal caliente.

Las aleaciones de cobre pueden adquirir una amplia variedad de propiedades mediante la adición de elementos de aleación y por tratamiento térmico para mejorar sus características de manufactura. Las aleaciones más comunes de cobre son los latones y bronces. El **latón** (aleación de cobre y zinc) es una de las primeras aleaciones desarrolladas y tiene numerosas aplicaciones, incluyendo objetos decorativos (tabla 6.6). El **bronce** es una aleación de cobre y estaño (tabla 6.7). Existen otros bronces, como el *bronce de aluminio* (aleación de cobre y aluminio) y bronces de estaño. El **cobre-berilio** (o **bronce de berilio**) y el **bronce de fósforo** tienen buena resistencia y dureza en aplicaciones como resortes y rodamientos. Otras aleaciones importantes de cobre son los *cuproníqueles* y los *níqueles de plata*.

Denominación de las aleaciones de cobre. En el Sistema Unificado de Numeración, el cobre se identifica con la letra C. Por ejemplo, el bronce para cartuchos es C26200, que reemplaza la obsoleta numeración de tres dígitos de CDA 262 (por Copper Development Association). Además de identificarse por su composición, el cobre y sus aleaciones se conocen por varios nombres (tablas 6.5 y 6.6). Las denominaciones de temples (como *1/2 duro*, *extra duro*, *extra elástico*, etc.) se basan en la reducción de porcentaje mediante el trabajado en frío (como laminado o estirado).

Producción. El cobre se encuentra en varios tipos de minerales, siendo los más comunes las menas de sulfuros. En general, las menas son de bajo grado (aunque algunos contienen hasta 15% de Cu) y se obtienen de minas a cielo abierto. Primero se tritura el mineral y después se le da forma de lodo (mezcla acuosa con partículas sólidas insolubles). El lodo se muele hasta obtener partículas finas en molinos de bolas (cilindros giratorios con bolas metálicas dentro para triturar el mineral, ver fig. 17.6). Después se agregan productos químicos y aceite y se agita la mezcla. Las partículas minerales for-

TABLA 6.6

Propiedades y aplicaciones típicas de aleaciones forjables de cobre y latones seleccionadas

Tipo y número UNS	Composición nominal (%)	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Elongación en 50mm (%)	Aplicaciones típicas
Cobre electrolítico tenaz (C11000)	99.90 Cu, 0.04 O	220–450	70–365	55–4	Tubos de bajada, canales, techados, juntas, radiadores automotores, barras de autobuses, clavos, rodillos de impresión, remaches.
Latón rojo, 85% (C23000)	85.0 Cu, 15.0 Zn	270–725	70–435	55–3	Forro para medio ambiente, *conduits*, zócalos, sujetadores, extintores de incendio, tubería para condensadores e intercambiadores de calor.
Latón para cartuchos, 70% (C26000)	70.0 Cu, 30.0 Zn	300–900	75–450	66–3	Núcleos de radiadores y tanques, cubiertas para luces de destello, soportes para lámparas, sujetadores, candados, bisagras, componentes de municiones, accesorios de plomería.
Latón libre maquinado (C36000)	61.5 Cu, 3.0 Pb, 35.5 Zn	340–470	125–310	53–18	Engranes, piñones, partes de máquinas roscadoras automáticas de alta velocidad.
Latón naval (C46400 a C46700)	60.0 Cu, 39.25 Zn, 0.75 Sn	380–610	170–455	50–17	Aeronaves; tambores tensores, bolas, pernos; accesorios marinos; flechas para impulsores, remaches, vástagos de válvulas, placas de condensadores.

TABLA 6.7

Propiedades y aplicaciones típicas de bronces forjables seleccionadas

Tipo y número UNS	Composición nominal (%)	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Elongación en 50mm (%)	Aplicaciones típicas
Bronce arquitectónico (C38500)	57.0 Cu, 3.0 Pb, 40.0 Zn	415 (extruido)	140	30	Extrusiones arquitectónicas, marquesinas, remates, juntas, travesaños, bisagras.
Bronce al fósforo, 5% A (C51000)	95.0 Cu, 5.0 Sn, trazas de P	325–960	130–550	64–2	Fuelles, discos para embragues, pasadores de retención, diafragmas, sujetadores, brochas de alambre, equipo químico, maquinaria textil.
Bronce al fósforo libre maquinado (C54400)	88.0 Cu, 4.0 Pb, 4.0 Zn, 4.0 Sn	300–520	130–435	50–15	Rodamientos, bujes, engranes, piñones, flechas, rondanas de empuje, partes para válvulas.
Bronce de bajo silicio, B (C65100)	98.5 Cu, 1.5 Si	275–655	100–475	55–11	Líneas de presión hidráulica, pernos, accesorios marinos, *conduits* eléctricos, tubería para intercambiadores de calor.
Níquel plata, 65–10 (C74500)	65.0 Cu, 25.0 Zn, 10.0 Ni	340–900	125–525	50–1	Remaches, tornillos, sujetadores para diapositivas, artículos huecos, placas de equipo.

man una espuma, que se raspa y se seca. Tradicionalmente, el concentrado seco de cobre (del cual casi un tercio es cobre) se **funde** y se refina; a este proceso se le llama **pirometalurgia**, ya que se utiliza calor para refinar el metal. En aplicaciones como los conductores eléctricos, el cobre posteriormente se refina mediante electrólisis hasta obtener una pureza de 99.95% cuando menos (*cobre electrolítico libre de oxígeno*). Una técnica más reciente para procesar el cobre es la **hidrometalurgia**, un proceso que comprende reacciones químicas y electrolíticas.

6.5 Níquel y sus aleaciones

El **níquel** (Ni) es un metal blanco plateado descubierto en 1751 y uno de los principales elementos de aleación, ya que imparte resistencia, tenacidad y resistencia a la corrosión. Se utiliza con amplitud en aceros inoxidables y en aleaciones con base de níquel (también llamadas **superaleaciones**). Las aleaciones de níquel se utilizan en aplicaciones de alta temperatura (como componentes de motores a reacción, cohetes y plantas nucleares de potencia), equipos de manejo de alimentos y de procesamiento químico, monedas y aplicaciones marinas. Debido a que el níquel es magnético, sus aleaciones también se utilizan en aplicaciones electromagnéticas, por ejemplo, los solenoides. El principal uso del níquel como metal ocurre en la electrodeposición de partes para mejorar su apariencia y su resistencia a la corrosión y al desgaste. Las aleaciones de níquel tienen una alta resistencia y resistencia a la corrosión a temperaturas elevadas. Los elementos de aleación en el níquel son el cromo, cobalto y molibdeno. El comportamiento de las aleaciones de níquel en el maquinado, formado, fundido y soldado se puede modificar mediante otros elementos de aleación.

Se han desarrollado varias aleaciones de níquel con una amplia gama de resistencias a diferentes temperaturas (tabla 6.8). Aunque aún se utilizan mucho los nombres comerciales, las aleaciones de níquel se identifican hoy en el sistema UNS con la letra N. Así, el Hastelloy G ahora es N06007. El **Monel** es una aleación níquel-cobre. El **Inconel** es una aleación níquel-cromo con una resistencia a la tensión de hasta 1400 MPa (200 ksi). El **Hastelloy** (una aleación níquel-cromo) tiene buena resistencia a la corrosión

TABLA 6.8

Propiedades y aplicaciones típicas de aleaciones de níquel seleccionadas (todos son nombres comerciales)

Tipo y número UNS	Composición nominal (%)	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Elongación en 50mm (%)	Aplicaciones típicas
Níquel 200 (recocido)	Ninguna	380–550	100–275	60–40	Industria química y de procesamiento de alimentos, equipo aeroespacial, partes electrónicas.
Duranickel 301 (endurecido por envejecimiento)	4.4 Al, 0.6 Ti	1300	900	28	Resortes, equipo para extrusión de plásticos, moldes para vidrios, diafragmas.
Monel R-405 (laminado en caliente)	30 Cu	525	230	35	Productos para máquinas para tornillos, partes para medidores de agua.
Monel K-500 (endurecido por envejecimiento)	29 Cu, 3 Al	1050	750	30	Flechas para bombas, vástagos de válvulas, resortes.
Inconel 600 (recocido)	15 Cr, 8 Fe	640	210	48	Partes para turbinas de gas, equipo para tratamiento térmico, partes electrónicas, reactores nucleares.
Hastelloy C-4 (tratado con solución y enfriado)	16 Cr, 15 Mo	785	400	54	Partes que requieren estabilidad en alta temperatura y resistencia al agrietamiento por esfuerzo-corrosión.

y alta resistencia a temperaturas elevadas. El **Nichrome** (una aleación de níquel, cromo y hierro) tiene alta resistencia eléctrica y una fuerte resistencia a la oxidación, y se utiliza para elementos calefactores eléctricos. El **Invar** y el **Kovar** (aleaciones de hierro y níquel) tienen una sensibilidad relativamente baja a la temperatura (sección 3.6).

Producción. Las principales fuentes de níquel son minerales de sulfuros y óxidos, que tienen bajas concentraciones del metal. El níquel metálico se produce mediante procesos preliminares de sedimentación y térmicos, seguidos de electrólisis; esta secuencia rinde 99.95% de níquel puro. Aunque también hay cantidades significativas en el lecho marino, la minería submarina aún no es económica.

6.6 Superaleaciones

Las *superaleaciones* son importantes en las aplicaciones de alta temperatura, de ahí que también se les conozca como **aleaciones resistentes al calor** o de **alta temperatura**. En general, las superaleaciones tienen buena resistencia a la corrosión, a la fatiga mecánica y térmica, al impacto mecánico y térmico, a la termofluencia y a la erosión a temperaturas elevadas. Las superaleaciones se aplican principalmente en motores a reacción y en turbinas de gas, motores reciprocantes, motores de cohetes, herramentales y matrices para trabajo en caliente de los metales, así como en las industrias nuclear, química y petroquímica. En general, las superaleaciones se identifican mediante nombres comerciales o con sistemas especiales de numeración, y se encuentran disponibles en varias formas. La mayoría de las superaleaciones tienen una temperatura máxima de servicio de alrededor de 1000 °C (1800 °F) en aplicaciones estructurales. Las temperaturas pueden llegar a 1200 °C (2200 °F) para componentes de rodamientos sin carga.

TABLA 6.9

Propiedades y aplicaciones típicas de superaleaciones base níquel seleccionadas a 870 °C (1600 °F) (todos son nombres comerciales)

Aleación	Condición	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Aplicaciones típicas
Astroloy	Forjable	770	690	25	Forjas para uso en alta temperatura
Hastelloy X	Forjable	255	180	50	Parte de lámina de motores de propulsión
IN-100	Fundido	885	695	6	Álabes y ruedas para motores de propulsión
IN-102	Forjable	215	200	110	Partes para sobrecalentadores y motores de propulsión
Inconel 625	Forjable	285	275	125	Motores y estructuras de aviones, equipo para procesamiento químico
lnconel 718	Forjable	340	330	88	Partes para motores de propulsión y cohetes
MAR-M 200	Fundido	840	760	4	Álabes para motores de propulsión
MAR-M 432	Fundido	730	605	8	Ruedas para turbinas fundidas integralmente
René 41	Forjable	620	550	19	Partes para motores de propulsión
Udimet 700	Forjable	690	635	27	Partes para motores de propulsión
Waspaloy	Forjable	525	515	35	Partes para motores de propulsión

Hay superaleaciones *de base hierro*, *de base cobalto* o *de base níquel*.

- **Las superaleaciones de base hierro** generalmente contienen de 32% a 67% de Fe, de 15% a 22% de Cr y de 9% a 38% de Ni. Las aleaciones comunes en este grupo son la serie *Incoloy*.
- **Las superaleaciones de base cobalto** por lo general contienen de 35% a 65% de Co, de 19% a 30% de Cr y hasta 35% de Ni. No son tan fuertes como las superaleaciones de base níquel, pero mantienen su resistencia a mayores temperaturas.
- **Las superaleaciones de base níquel** son las más comunes y se encuentran disponibles en una amplia variedad de composiciones (tabla 6.9). La proporción de níquel es de 38% a 76%. También contienen hasta 27% de Cr y 20% de Co. Las aleaciones comunes en este grupo son las series del *Hastelloy*, *Inconel*, *Nimonic*, *René*, *Udimet*, *Astroloy* y *Waspaloy*.

6.7 Titanio y sus aleaciones

El **titanio** (Ti, nombrado así en honor del gigante griego Titán) es un metal blanco plateado que fue descubierto en 1791, pero no se produjo comercialmente sino hasta la década de 1950. Aunque es costoso, su alta relación resistencia-peso y su resistencia a la corrosión a temperatura ambiente y a temperaturas elevadas lo hace atractivo para muchas aplicaciones, como aeronaves, motores de propulsión (ver fig. 6.1), autos de carreras, palos de golf, componentes químicos, petroquímicos y marinos, cascos de submarinos, placas de blindaje y biomateriales, como implantes ortopédicos (tabla 6.10). Se han desarrollado aleaciones de titanio para servicio a 550 °C (1000 °F) por largos periodos y de hasta 750 °C (1400 °F) para lapsos más cortos.

El titanio no aleado, conocido como *titanio comercialmente puro*, tiene una excelente resistencia a la corrosión, para aplicaciones donde la resistencia pasa a segundo término. El aluminio, vanadio, molibdeno, manganeso y otros elementos de aleación le imparten propiedades como mejor capacidad de trabajo, resistencia y templabilidad.

TABLA 6.10

Propiedades y aplicaciones típicas de aleaciones de titanio seleccionadas a diferentes temperaturas

Composición nominal (%)	UNS	Condición	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Elongación (%)	Reducción de área (%)	Temp. (°C)	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)
99.5 Ti	R50250	Recocido	330	240	30	55	300	150	95
5 Al, 2.5 Sn	R54520	Recocido	860	810	16	40	300	565	450
6 Al, 4 V	R56400	Recocido	1000	925	14	30	300	725	650
		Solución + Envejecimiento	1175	1100	10	20	300	980	900
13 V, 11 Cr, 3 Al	R58010	Solución + Envejecimiento	1275	1210	8	—	425	1100	830

Las propiedades y características de manufactura de las aleaciones de titanio son extremadamente sensibles a pequeñas variaciones en los elementos de aleación y residuales. Por lo tanto, es importante controlar la composición y el procesamiento, y sobre todo prevenir la contaminación de la superficie con hidrógeno, oxígeno o nitrógeno durante el proceso; estos elementos provocan fragilización del titanio y, en consecuencia, reducen su tenacidad y ductilidad.

La estructura cúbica centrada en el cuerpo del titanio (titanio beta) se da en temperaturas mayores a 880 °C (1600 °F) y es dúctil, mientras que su estructura hexagonal de empaquetamiento compacto (titanio alfa) es frágil y muy sensible a la corrosión por esfuerzo. Se pueden obtener otras estructuras (alfa, cercano a alfa, alfa-beta y beta) mediante aleación y tratamiento térmico, a fin de optimizarlo para aplicaciones específicas. Los **intermetálicos de aluminuro de titanio** (TiAl y Ti_3Al) tienen mayor rigidez y menor densidad que las aleaciones convencionales de titanio y pueden soportar mayores temperaturas.

Producción. Primero, los minerales que contienen titanio se reducen a tetracloruro de titanio en un horno de arco y después se convierten en cloruro de titanio en una atmósfera clorada. Este compuesto se reduce luego a titanio metálico mediante destilación y lixiviado (disolución). Esta secuencia forma *titanio esponja*, que después se prensa como palanquillas, se funde y se vierte en lingotes para procesarlo y darle varias formas. La complejidad de estas operaciones termoquímicas de pasos múltiples (*proceso Kroll* desarrollado en las décadas de 1940 y 1950) aumenta de modo considerable el costo del titanio. En la actualidad hay nuevos desarrollos en procesos de extracción electroquímica para reducir tanto el número de pasos comprendidos como el consumo de energía y así bajar el costo de producción.

6.8 Metales y aleaciones refractarias

Existen cuatro **metales refractarios**: molibdeno, niobio, tungsteno y tantalio. Se les llama *refractarios* por su elevado punto de fusión. Aunque se descubrieron hace unos 200 años y se han utilizado como elementos importantes de aleación en aceros y superaleaciones, su uso en la ingeniería no comenzó sino hasta 1940. Más que la mayoría de los otros metales y aleaciones, estos metales mantienen su resistencia a temperaturas elevadas. Por lo tanto, son de gran importancia y uso en motores de cohetes, turbinas de gas y otras aplicaciones aeroespaciales; en las industrias electrónica, de potencia nuclear y química; y como materiales para herramentales y matrices. La gama de temperaturas para algunas

de estas aplicaciones es de entre 1100 °C y 2200 ºC (2000 °F a 4000 ºF), por lo que la resistencia y la oxidación son las mayores preocupaciones.

6.8.1 Molibdeno

El **molibdeno** (Mo) es un metal blanco plateado descubierto en el siglo XVIII; tiene un alto punto de fusión, elevado módulo de elasticidad, buena resistencia al impacto térmico y gran conductividad eléctrica y térmica. Se utiliza más que cualquier otro metal refractario en cohetes a base de propulsores sólidos, motores a reacción, estructuras de panal, componentes electrónicos, elementos calefactores y matrices para fundición a presión. Los principales elementos de aleación del molibdeno son el titanio y el zirconio. Por sí mismo es un elemento importante de aleación en los aceros aleados colados y forjados y en las aleaciones resistentes al calor; les imparte resistencia, tenacidad y resistencia a la corrosión. Una limitación importante de las aleaciones de molibdeno es su baja resistencia a la oxidación a temperaturas superiores a 500 ºC (950 ºF), por lo que requiere cubiertas protectoras.

Producción. La principal fuente de molibdeno es el mineral *molibdenita* (bisulfuro de molibdeno), que primero se procesa y se concentra; después se reduce por reacción, al principio con oxígeno y luego con hidrógeno. También se utilizan técnicas de metalurgia de polvos a fin de producir lingotes, para procesarlo y darle diversas formas.

6.8.2 Niobio (columbio)

El **niobio** (Nb, llamado así en honor de Niobe, la hija del mítico rey griego Tántalo) fue identificado por primera vez en 1801; también se le conoce como **columbio** (por su mineral fuente, *columbita*). Posee buena ductilidad y formabilidad y tiene mayor resistencia a la oxidación que otros metales refractarios. Con diversos elementos de aleación se pueden producir aleaciones de niobio con resistencia moderada y buenas características de fabricación, las cuales se utilizan en cohetes y misiles, superconductores, y en aplicaciones nucleares y químicas. El niobio también es un elemento de aleación en diferentes aleaciones y superaleaciones. Se procesa a partir de minerales, por reducción y refinación, y a partir de polvo mediante mezcla y formado en lingotes.

6.8.3 Tungsteno

El **tungsteno** (W, por wolframio, su nombre europeo, y de su mineral fuente, *wolframita*; en sueco *tung* significa "pesado" y *sten* significa "piedra") se identificó por primera vez en 1781; es el más abundante de todos los metales refractarios y tiene el punto de fusión más elevado (3410 ºC, 6170 ºF). En consecuencia, se caracteriza por su alta resistencia a temperaturas elevadas. Sin embargo, posee alta densidad (por lo que se usa para equilibrar pesos y como contrapeso en sistemas mecánicos, incluyendo los relojes automáticos de pulso), es frágil a bajas temperaturas y ofrece una pobre resistencia a la oxidación. El tungsteno imparte resistencia y dureza a los aceros a temperaturas elevadas.

Las aleaciones de tungsteno se utilizan en aplicaciones que implican temperaturas superiores a 1650 °C (3000 °F), como los recubrimientos en gargantas de toberas en misiles, en las partes más calientes de los motores de propulsión y en cohetes, cortacircuitos, electrodos de soldadura, herramental para maquinado por descarga eléctrica y electrodos de bujías para motores. El filamento de alambre en los focos (sección I.1) se fabrica con tungsteno puro mediante técnicas de metalurgia de polvos y estirado de cable. El carburo de tungsteno, con cobalto como aglutinante para las partículas de carburo, es uno de los materiales más importantes para herramientas de corte y matrices. El tungsteno se procesa a partir de concentrados minerales mediante descomposición química y luego se reduce. Después se procesa con técnicas de metalurgia de polvos en una atmósfera de hidrógeno.

6.8.4 Tantalio

Identificado en 1802, el **tantalio** (Ta, llamado así en honor del rey griego Tántalo) se caracteriza por su alto punto de fusión (3000 °C, 5425 °F), elevada densidad, buena ductilidad y resistencia a la corrosión. Sin embargo, tiene una resistencia pobre a los productos químicos a temperaturas superiores a 150 °C (300 °F). Se utiliza mucho en capacitores electrolíticos y en diversos componentes en las industrias eléctrica, electrónica y química; también se emplea en aplicaciones térmicas, como hornos e intercambiadores de calor resistentes a los ácidos. Numerosas aleaciones con base en tantalio se usan de muchas formas en misiles y aeronaves. También sirve como elemento de aleación. Se procesa por medio de técnicas similares a las utilizadas para procesar niobio.

6.9 Berilio

De color gris acero, el **berilio** (Be, del mineral *berilo*) tiene una alta relación resistencia-peso. El berilio no aleado se utiliza en toberas de cohetes, estructuras espaciales y misiles, discos de frenos para aeronaves e instrumentos de precisión y espejos. Se emplea en aplicaciones nucleares y de rayos X debido a su baja absorción de neutrones. También es un elemento de aleación, y sus aleaciones de cobre y níquel se utilizan en diversas aplicaciones, entre ellas resortes (*cobre-berilio*), contactos eléctricos y herramientas que no producen chispas para emplearlas en ambientes explosivos, como las minas, y en la producción de polvos metálicos (sección 17.2). El berilio y su óxido son tóxicos; no deben inhalarse el polvo ni los humos que produce.

6.10 Zirconio

El **zirconio** (Zr) tiene apariencia plateada; buena resistencia y ductilidad a temperaturas elevadas y buena resistencia a la corrosión debido a una película de óxido adherente. Este elemento se utiliza en componentes electrónicos y en reactores nucleares de potencia por su baja absorción de neutrones.

6.11 Aleaciones de baja fusión

Las aleaciones de baja fusión se llaman así por sus puntos de fusión relativamente bajos. Los principales metales incluidos en esta categoría son el plomo, zinc, estaño y sus aleaciones.

6.11.1 Plomo

El **plomo** (Pb, por *plumbum*, la raíz de la palabra "plomero") tiene alta densidad, resistencia a la corrosión (en virtud de la capa estable de óxido de plomo que se forma para proteger su superficie), blando, baja resistencia, ductilidad y buena capacidad de trabajo. La aleación con diversos elementos (como el antimonio y el estaño) realza sus propiedades deseables y lo hace adecuado para tubería, tubos colapsables, aleaciones para cojinetes, fundas para cables, tejados y baterías de almacenamiento plomo-ácido. El plomo también se utiliza para amortiguar sonido y vibraciones, como protección contra radiaciones de rayos X, municiones, pesos y en la industria química.

Los artefactos de plomo más antiguos conocidos se fabricaron alrededor del año 3000 a.C. Algunos tubos fabricados por los romanos e instalados en los baños romanos en Bath, Inglaterra, hace dos milenios, aún se encuentran en uso. El plomo también es un elemento de aleación en *soldaduras blandas*, acero y aleaciones de cobre; promueve la re-

sistencia a la corrosión y la maquinabilidad. Se usa además como lubricante sólido en las operaciones de formado del metal caliente. Sin embargo, debido a su toxicidad, la contaminación ambiental por plomo (que provoca envenenamiento) constituye una preocupación importante; se están haciendo esfuerzos para reemplazar el plomo con otros elementos (como *soldaduras blandas sin plomo*). La fuente mineral básica para el plomo es la *galena* (PbS). Se extrae de minas, se funde y refina mediante tratamientos químicos.

6.11.2 Zinc

El **zinc** (Zn) tiene un color blanco azulado y es el cuarto metal más utilizado en la industria, después del hierro, el aluminio y el cobre. Aunque se sabía de su existencia desde la antigüedad, el zinc no se desarrolló sino hasta el siglo XVIII. Tiene dos usos principales: (1) para galvanizar hierro, láminas de acero y alambre, y (2) como base de aleación para fundición.

En el **galvanizado**, el zinc sirve como ánodo y protege el acero (cátodo) de ataques corrosivos en caso de que el recubrimiento se raye o agujere. También se utiliza como elemento de aleación; el latón, por ejemplo, es una aleación de cobre y zinc. Elementos de aleación importantes en las aleaciones a base de zinc son el aluminio, cobre y magnesio, que imparten resistencia y proveen control dimensional durante el colado del metal. Las aleaciones de base zinc se usan ampliamente en la fundición a presión para fabricar productos como bombas de combustible y parrillas de automóviles, componentes para electrodomésticos como aspiradoras y lavadoras, equipo de cocina, diversas partes para maquinaria y equipo de fotograbado. Se usa también en las aleaciones superplásticas que tienen buenas características de formabilidad, por su capacidad de sufrir grandes deformaciones sin fallar. Un ejemplo de aleación superplástica de zinc es una lámina de grano muy fino, de 78% de Zn-22% de Al, que se puede formar mediante métodos utilizados para formar plásticos o metales.

Producción. En la naturaleza hay muchos minerales que contienen zinc. La principal fuente es el sulfuro de zinc, también llamado *zincblenda*. Primero se calcina al aire y se convierte en óxido de zinc; después se reduce a zinc mediante electrólisis (con ácido sulfúrico) o por calentamiento en un horno con carbón (lo que hace que se separe el zinc fundido).

6.11.3 Estaño

Aunque se utiliza en pequeñas cantidades, el **estaño** (Sn, del latín *stannum*) es un metal importante. El uso más extendido de este metal, de un blanco plateado brillante, es como cubierta protectora de láminas de acero (*lámina estañada*) para fabricar contenedores (*latas estañadas*) de alimentos y otros productos. La baja resistencia al corte de los recubrimientos de estaño sobre láminas de acero mejora su desempeño en el embutido profundo y en general en el trabajo de prensado. A diferencia de los aceros galvanizados, si el recubrimiento se agujera o se destruye, el acero se corroe porque el estaño es catódico con respecto a este último.

El estaño no aleado se utiliza en material de recubrimiento para plantas de destilación de agua y como capa fundida de metal sobre la que se fabrican placas de vidrio (sección 18.3). Las aleaciones de base estaño (también llamadas **metales blancos**) por lo general contienen cobre, antimonio y plomo. Los elementos de aleación aportan dureza, resistencia mecánica y resistencia a la corrosión. El estaño es un elemento de aleación en las aleaciones dentales y de bronce (aleación cobre-estaño), titanio y zirconio. Las aleaciones estaño-plomo son materiales comunes en las soldaduras blandas, con una amplia gama de composiciones y puntos de fusión.

Debido a sus mínimos coeficientes de fricción (resultantes de su baja resistencia al corte y baja adhesión), algunas aleaciones de estaño se utilizan como materiales para bujes de extremos de flechas. A estas aleaciones se les llama **babbitts** (en honor de I. Babbitt,

1799-1862) y contienen estaño, cobre y antimonio. El **pewter** es una aleación de estaño, cobre y antimonio. Se desarrolló en el siglo XV y se ha utilizado para accesorios de mesa, artículos huecos y objetos decorativos. Los tubos de los órganos musicales se fabrican con aleaciones de estaño. El mineral de estaño más importante es la *casiterita* (óxido de estaño), que es de grado bajo. El mineral se extrae de minas, se concentra mediante diversas técnicas y se funde, refina y vacía en lingotes para su procesamiento posterior.

6.12 Metales preciosos

Los metales *preciosos* (costosos) más importantes, también llamados **metales nobles**, se describen a continuación.

- El **oro** (Au, de *aurum*) es blando y dúctil, además de tener buena resistencia a la corrosión a cualquier temperatura. Las aplicaciones típicas incluyen joyería, acuñado, reflectores, láminas para decoración, trabajo dental, electrodeposición, contactos y terminales eléctricas.
- La **plata** (Ag, de *argentum*) es un metal dúctil que tiene la mayor conductividad eléctrica y térmica (tabla 3.1). Sin embargo, desarrolla una película de óxido que afecta sus características superficiales y apariencia. Suele aplicarse en artículos de mesa, joyería, acuñado, electrodeposición, película fotográfica, contactos eléctricos, soldaduras blandas, recubrimientos para rodamientos, equipo para alimentos y productos químicos. La *plata sterling* es una aleación de plata y 7.5% de cobre.
- El **platino** (Pt) es un metal blanco-grisáceo blando, dúctil, que tiene buena resistencia a la corrosión incluso a temperaturas elevadas. Las aleaciones de platino se utilizan en contactos eléctricos, electrodos de bujías, catalizadores para controlar la contaminación automotriz, filamentos, boquillas y matrices para la extrusión de fibras de vidrio (sección 18.3), termopares, joyería, industria electroquímica y trabajos dentales.

6.13 Aleaciones con memoria de forma

Las *aleaciones con memoria de forma* son únicas, ya que después de ser deformadas plásticamente a temperatura ambiente, proceso en el que adquieren diversas formas, regresan a su configuración original mediante calentamiento. Por ejemplo, una pieza de alambre recto fabricada con este material se puede enrollar dándole la apariencia de un resorte helicoidal; cuando se calienta con un cerillo, el resorte se desenrolla y regresa a su forma original recta. Las aleaciones con memoria de forma pueden utilizarse para generar movimiento o fuerza en actuadores sensibles a la temperatura. Su comportamiento también puede ser *reversible*, esto es, la figura puede cambiar una y otra vez al aplicar y retirar el calor. Una aleación típica con memoria de forma es 55% de Ni-45% de Ti (*Nitinol*). Otras aleaciones como ésta son cobre-aluminio-níquel, cobre-zinc-aluminio, hierro-manganeso-silicio y titanio-níquel-hafnio. Las aleaciones con memoria de forma por lo general tienen buena ductilidad, resistencia a la corrosión y alta conductividad eléctrica.

Las aleaciones con memoria de forma se aplican en sensores, armaduras para anteojos, *stents*, relevadores, bombas, interruptores, conexiones, abrazaderas, sujetadores y sellos. Como ejemplo, se ha desarrollado una válvula de níquel-titanio contra quemaduras para proteger a la gente en lavabos, tinas y regaderas. Se instala directamente en el sistema de tubería y reduce el flujo del agua a un goteo 3 segundos después de que la temperatura del líquido llega a 47 °C (116 °F). Los nuevos desarrollos incluyen películas delgadas de aleaciones con memoria de forma depositadas sobre sustratos de silicio pulido para usarlas en dispositivos microelectromecánicos (MEMS) (ver capítulo 29).

6.14 Aleaciones amorfas (vidrios metálicos)

Las aleaciones metálicas que, a diferencia de los metales, no tienen una estructura cristalina de largo alcance se llaman *aleaciones amorfas*; no tienen límites de granos y los átomos se empacan apretadamente y al azar. La estructura amorfa se obtuvo a finales de la década de 1960 mediante la **solidificación extremadamente rápida** de la aleación fundida (sección 11.5). Debido a que su estructura se parece a la de los vidrios, a estas aleaciones también se les llama *vidrios metálicos*. Contienen hierro, níquel y cromo, que se alean con carbono, fósforo, boro, aluminio y silicio. Se encuentran disponibles como alambre, cintas, tiras y en polvo. Se aplican como insertos en la placa frontal de las cabezas de los palos de golf; esta aleación se compone de zirconio, berilio, cobre, titanio y níquel, y se fabrica mediante fundición a presión. Se aplican también en los bates huecos de aluminio para béisbol recubiertos con un *compósito* de metal amorfo mediante rociado térmico, y se dice que mejoran el bate.

Las aleaciones amorfas muestran una excelente resistencia a la corrosión, buena ductilidad, alta resistencia y una muy baja pérdida por histéresis magnética. Esta última propiedad se utiliza en la fabricación de núcleos de acero magnético para transformadores, generadores, motores, balastros para lámparas, amplificadores magnéticos y aceleradores lineales. La baja pérdida por histéresis magnética mejora la eficiencia; sin embargo, sus costos de fabricación son significativos. Se están desarrollando aceros amorfos cuya resistencia es dos veces superior a la de los aceros de alta resistencia, con aplicaciones potenciales en grandes estructuras; no obstante, sus costos son prohibitivos. Una aplicación importante de las superaleaciones de polvos solidificados rápidamente es la consolidación en formas cercanas a las finales para partes utilizadas en motores aeroespaciales.

6.15 Espumas metálicas

Las *espumas metálicas* son estructuras materiales en las que el metal constituye sólo de 5% a 20% del volumen de la estructura. Generalmente fabricadas con aleaciones de aluminio (aunque también de titanio o de tantalio), las espumas metálicas se pueden producir inyectando aire en el metal fundido y extrayendo la espuma que se forma en la superficie; esta espuma se solidifica después. Otros métodos para producir espuma metálica incluyen *(a)* la deposición química de vapor (sección 34.6) en una red de espuma de polímero o de carbono, y *(b)* dopando metales fundidos o en polvo (capítulo 17) con hidruro de titanio (TiH_2), que después libera hidrógeno en forma de gas a las temperaturas elevadas de fundición o de sinterización.

Las espumas metálicas tienen combinaciones únicas de proporciones resistencia-densidad y rigidez-densidad, aunque estas proporciones no son tan altas como las de los metales base por sí mismos. Sin embargo, son muy ligeras y, por lo tanto, resultan materiales atractivos para aplicaciones aeroespaciales. Debido a su porosidad, las espumas metálicas también se aplican en filtros e implantes ortopédicos.

6.16 Nanomateriales

Existen desarrollos importantes que comprenden la producción de materiales con granos, fibras, películas y compósitos que tienen partículas de 1 a 100 nm de tamaño. Investigados a principios de la década de 1980, y por lo general llamados *nanomateriales*, poseen ciertas propiedades que con frecuencia son superiores a las de los materiales tradicionales y comercialmente existentes. Estas características incluyen la resistencia, dureza, ductilidad, resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión adecuadas para aplicaciones estruc-

turales (cargas dinámicas) y no estructurales, combinadas con propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas, únicas.

Un nanomaterial puede estar compuesto por cualquier combinación de elementos químicos. Entre las composiciones más importantes están los carburos, óxidos, nitruros, metales y aleaciones, polímeros orgánicos y varios compósitos. Los métodos de síntesis incluyen la condensación por gas inerte, síntesis de plasma, electrodeposición, síntesis sol-gel y aleación mecánica o molino de bolas.

Los polvos sintetizados se consolidan en materiales en masa mediante diversas técnicas, como la compactación y la sinterización. Están disponibles en varias formas y tienen diversos nombres, como materiales nanocristalinos, nanoestructurados, de nanofase, nanopolvos, nanofibras, nanoalambres, nanotubos y nanopelículas. Debido a que la síntesis de estos productos se efectúa a niveles atómicos, se controla estrictamente su pureza (del orden de 99.9999%), su homogeneidad y la uniformidad de su microestructura; por consiguiente, también se pueden controlar con precisión sus propiedades mecánicas, físicas y químicas.

Entre las aplicaciones actuales y potenciales de los nanomateriales se encuentran las siguientes:

a. Herramientas de corte e insertos fabricados con carburos y otros cerámicos nanocristalinos.

b. Cerámicas de nanofase, que son dúctiles y maquinables.

c. Polvos para procesamiento de metalurgia de polvos.

d. Chips para computadoras de siguiente generación que utilizan materiales nanocristalinos de inicio, con muy alta pureza, mejor conductividad térmica e interconexiones más durables.

e. Pantallas planas para computadoras portátiles y televisiones fabricadas mediante síntesis de fósforo nanocristalino, a fin de mejorar la resolución de la pantalla.

f. Electrodos para bujías, *ignitores* y combustibles para cohetes, implantes médicos, sensores de alta sensibilidad, catalizadores para eliminación de contaminantes, magnetos de alta potencia y baterías de gran energía y densidad.

RESUMEN

- Los metales y las aleaciones no ferrosas cubren una amplia gama de materiales. Pueden estar constituidos por aluminio, magnesio y cobre y sus aleaciones, que tienen una amplia variedad de aplicaciones. Para servir a temperaturas más elevadas pueden contener níquel, titanio, aleaciones refractarias (molibdeno, niobio, tungsteno, tantalio) y superaleaciones. Otras categorías de materiales no ferrosos incluyen aleaciones de baja fusión (plomo, zinc, estaño) y metales preciosos (oro, plata y platino).
- Las aleaciones no ferrosas tienen una amplia variedad de propiedades deseables, como resistencia, tenacidad, dureza y ductilidad; resistencia a alta temperatura, termofluencia y oxidación; una extensa gama de propiedades físicas, térmicas y químicas; y elevadas proporciones resistencia-peso y rigidez-peso (en particular para el aluminio y el titanio). Se les puede dar tratamiento térmico a fin de aportarles ciertas propiedades. Como en todos los materiales, la selección de un material no ferroso para una aplicación en particular requiere considerar muchos factores, incluyendo requerimientos de diseño y servicio, efectos de largo plazo, afinidad química con otros materiales, ataques del medio ambiente y costo.
- Las aleaciones con memoria de forma, las aleaciones amorfas (vidrios metálicos) y los nanomateriales tienen algunas propiedades que son superiores a las de los materiales convencionales. Cada uno tiene varias aplicaciones únicas en el diseño y la manufactura de productos.

TÉRMINOS CLAVE

Aleaciones amorfas
Aleaciones con memoria de forma
Aleaciones de baja fusión
Babbitts
Bronce
Espuma metálica
Fundido
Galvanizado
Latón
Metales preciosos
Metales refractarios
Nanomateriales
Pewter
Pirometalurgia
Superaleaciones
Vidrios metálicos

BIBLIOGRAFÍA

ASM Handbook, *Vol. 2: Properties and Selection: Non-ferrous Alloys and Special-Purpose Materials,* ASM International, 1990.
ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, 1993.
ASM Specialty Handbook: Copper and Cooper Alloys, ASM International, 2001.
ASM Specialty Handbook: Heat-Resistant Materials, ASM International, 1997.
ASM Specialty Handbook: Magnesium and Magnesium Alloys, ASM International, 1999.
ASM Specialty Handbook: Nickel, Cobalt, and Their Alloys, ASM International, 2000.
Bhushan, B. (ed.), *Handbook of Nanotechnology,* Springer, 2004.
Donachie, M. J. (ed.), *Titanium: A Technical Guide,* 2a. ed., ASM International, 2000.
Donachie, M. J. y Donachie, S. J., *Superalloys: A Technical Guide,* 2a. ed., ASM International, 2002.
Edelstein, A. S. y Cammarata, R. C. (eds.), *Nanomaterials: Synthesis, Properties, and Applications,* Institute of Physics, 1998.
Farag, M. M., *Materials Selection for Engineering Design*, Prentice Hall, 1997.
Fremond, M. y Miyazaki, S., *Shape-Memory Alloys,* Springer Verlag, 1996.
Harper, C. (ed.), *Handbook for Materials for Product Design*, 3a. ed., McGraw-Hill, 2001.
Kaufman, J. G., *Introduction to Aluminum Alloys and Tempers*, ASM International, 2000.
Mitura, S., *Nanomaterials*, Elsevier, 2000.
Superalloys: A Technical Guide, 2a. ed., ASM International, 2002.

PREGUNTAS DE REPASO

6.1 Dada la abundancia de aluminio en la corteza terrestre, explique por qué es más caro que el acero.
6.2 ¿Por qué el magnesio se utiliza con frecuencia como material estructural en las herramientas manuales de potencia? ¿Por qué se usan sus aleaciones en lugar de magnesio puro?
6.3 ¿Cuáles son los usos más importantes del cobre? ¿Cuáles son los elementos de aleación en el latón y en el bronce?
6.4 ¿Qué son las superaleaciones? ¿Por qué se llaman así?
6.5 ¿Qué propiedades del titanio lo hacen atractivo para usarlo en componentes de autos de carreras y en motores de propulsión? ¿Por qué no se utiliza ampliamente en motores de automóviles?
6.6 ¿Cuáles son las propiedades de cada uno de los principales metales refractarios que definen sus aplicaciones más útiles?
6.7 ¿Qué son los vidrios metálicos? ¿Por qué se utiliza la palabra "vidrio" para estos materiales?
6.8 ¿Cuál es la composición de *(a)* los babbitts, *(b)* el pewter, y *(c)* la plata sterling?
6.9 ¿Qué materiales descritos en este capítulo tienen mayor *(a)* densidad, *(b)* conductividad eléctrica, *(c)* conductividad térmica, (d) resistencia y *(e)* costo?
6.10 ¿Cuáles son los usos más importantes del oro, distintos de la joyería?
6.11 ¿Cuáles son las ventajas de usar el zinc como recubrimiento para el acero?
6.12 ¿Qué son los nanomateriales? ¿Por qué se les ha desarrollado?
6.13 ¿Por qué las cubiertas de los aviones se fabrican con aleaciones de aluminio, si el magnesio es el metal más ligero?
6.14 ¿Cuáles son los usos principales del plomo?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

6.15 Explique por qué los utensilios de cocina se fabrican generalmente con aceros inoxidables, aluminio o cobre.
6.16 ¿Tendría alguna ventaja graficar los datos de la tabla 6.1 en términos de costo por peso unitario en lugar de costo por unidad de volumen? Explique y dé algunos ejemplos.
6.17 Revise la tabla 6.2 y comente cuál de los dos procesos de endurecimiento (tratamiento térmico y endurecimiento por trabajo) es más efectivo para mejorar la resistencia de las aleaciones de aluminio.
6.18 Además de la resistencia mecánica, ¿qué otros factores deben considerarse al seleccionar metales y aleaciones para aplicaciones a temperaturas elevadas?
6.19 Explique por qué quisiera conocer la ductilidad de metales y aleaciones antes de seleccionarlos.
6.20 Explique las técnicas que utilizaría para aumentar la resistencia de las aleaciones de aluminio.
6.21 Supóngase que, por razones geopolíticas, el precio del cobre aumenta rápidamente. Nombre dos metales con propiedades mecánicas y físicas similares que pudieran sustituir al cobre. Comente su selección.
6.22 Si los aviones (como el Boeing 757) se fabrican con 79% de aluminio, ¿por qué los automóviles están hechos predominantemente con acero?
6.23 La caja de las computadoras portátiles se fabrica con magnesio. ¿Por qué?
6.24 En la tabla 6.3 se listan las propiedades de manufactura de las aleaciones de aluminio forjables. Compare sus características relativas con las de otros metales.
6.25 La mayor parte de los cableados domésticos son de cable de cobre. Por el contrario, el alambre de tierra que va a las antenas satelitales y similares está hecho de aluminio. Explique la razón.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

6.26 Una viga rectangular simple tiene 25 mm de ancho y 1 m de largo, y se somete a una carga vertical de 30 kg en el centro. Suponga que esta viga pudiera estar fabricada con cualquiera de los materiales indicados en la tabla 6.1. Seleccione tres materiales y calcule, para cada uno, la altura de la viga que haría que cada viga tenga la misma deflexión máxima. Calcule la razón de costo para cada una de las tres vigas.
6.27 Consiga algunas latas de aluminio para bebidas, córtelas y mida el espesor de su pared. Utilizando los datos de este capítulo y fórmulas simples para recipientes a presión de extremo cerrado y pared delgada, calcule la presión interna máxima que pueden soportar estas latas antes de que empiece la fluencia (esto es, a deformarse).
6.28 Usualmente, las latas para bebidas se apilan una sobre otra en las tiendas. Utilice la información del problema 6.27 y consulte libros de texto sobre mecánica de sólidos para estimar la carga de colapsado que puede soportar cada una de estas latas.
6.29 Utilice datos de resistencia y densidad para determinar el peso mínimo de un miembro a tensión de dos pies de largo, que debe soportar 750 libras, si se manufactura con *(a)* aluminio 3003-O, *(b)* aluminio 5052-H34, *(c)* magnesio AZ31B-F, *(d)* cualquier aleación de latón, y *(e)* cualquier aleación de bronce.
6.30 El motor de un automóvil opera hasta a 7000 rpm. Si la longitud de carrera de un pistón es de 6 pulgadas y éste está hecho de una fundición de acero de 10 libras, estime el esfuerzo inercial sobre la biela de 1 pulgada de diámetro. Si se reemplaza el pistón por el mismo volumen de aleación de aluminio, ¿cuál sería la velocidad para el mismo esfuerzo inercial inducido?
6.31 Grafique lo siguiente para los materiales descritos en este capítulo: *(a)* resistencia a la fluencia contra densidad, *(b)* módulo de elasticidad contra resistencia, y *(c)* módulo de elasticidad contra costo relativo.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

6.32 Debido al número de procesos que implica fabricarlas, el costo de las materias primas para metales depende de su condición (laminado en caliente o en frío), forma (placa, lámina, barra, tubo) y tamaño. Investigue la bibliografía técnica y listas de precios (o póngase en contacto con proveedores) y elabore una lista que indique el costo de 100 kg de los materiales no ferrosos descritos en este capítulo, según su disponibilidad en diferentes condiciones, formas y tamaños.

6.33 Los materiales descritos en este capítulo tienen numerosas aplicaciones. Investigue la bibliografia disponible y liste varios productos específicos y sus aplicaciones, indicando los tipos de materiales utilizados en ellos.

6.34 Nombre varios productos que no se habrían desarrollado hasta sus etapas avanzadas (como los encontramos hoy en día) si no se hubieran desarrollado aleaciones con alta resistencia mecánica, alta resistencia a la corrosión y a la termofluencia (todas a temperaturas elevadas).

6.35 Suponga que es el gerente de ventas de una compañía que produce metales no ferrosos. Elija cualquiera de los metales y aleaciones descritos en este capítulo y prepare un folleto, incluyendo algunas ilustraciones, para que su personal lo utilice como apoyo en su contacto con clientes potenciales.

6.36 Revise varios productos y componentes metálicos y sugiera de qué materiales están hechos. Justifique sus suposiciones. Si indica dos o más posibilidades, explique su razonamiento.

6.37 Dé aplicaciones para *(a)* metales amorfos, *(b)* metales preciosos, *(c)* aleaciones de baja fusión, y *(d)* nanomateriales.

6.38 Describa las ventajes de fabricar productos con materiales multicapas. (Por ejemplo, aluminio unido al fondo de ollas de acero inoxidable).

6.39 Describa aplicaciones y diseños que utilicen aleaciones con memoria de forma.

6.40 A la Edad de Bronce se le conoce así porque los metales más duros conocidos en esa época eran bronces. Por lo tanto, las herramientas, armas y armaduras se fabricaban con bronce. Investigue las fuentes geográficas de los metales necesarios para fabricar bronce e identifique las fuentes conocidas en ese periodo. (*Nota:* ¿Explica esto el interés de los griegos por las islas británicas?).

6.41 Las tapas de las latas de aluminio para bebidas se fabrican con aleación 5182, mientras que los fondos se elaboran con aleación 3004. Estudie las propiedades de estas aleaciones y explique por qué se utilizan en estas aplicaciones.

6.42 Consiga especímenes de cobre puro, aluminio puro y aleaciones de cobre y de aluminio. Efectúe ensayos de tensión en cada uno de ellos, grafique los diagramas esfuerzo-deformación y evalúe los resultados.

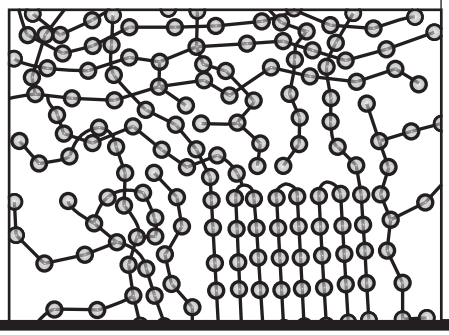
6.43 Comente sus observaciones respecto de los tipos de materiales utilizados en secciones particulares del motor de propulsión mostrado en la figura 6.1.

6.44 Revise diversos electrodomésticos pequeños o grandes en su casa e identifique los metales y las aleaciones que crea que se han utilizado en su construcción.

6.45 Consulte la bibliografía técnica reciente y comente las tendencias en el uso de materiales metálicos en *(a)* vehículos militares, *(b)* equipo para deportes, *(c)* equipo médico, *(d)* aplicaciones automotrices y *(e)* aeronaves.

Polímeros: estructura, propiedades generales y aplicaciones

CAPÍTULO 7



Con propiedades y aplicaciones muy distintas, los plásticos continúan estando entre los materiales más utilizados en la fabricación de productos. Para entender mejor sus características, en este capítulo se describe lo siguiente:

- Estructura de los polímeros, procesos de polimerización, cristalinidad y temperatura de transición vítrea.
- Cómo afectan la temperatura y la velocidad de deformación las propiedades de los termoplásticos.
- Diferencias entre termoplásticos y termofijos.
- Propiedades y aplicaciones de los polímeros, sus ventajas y sus limitaciones.

7.1 Introducción 191
7.2 Estructura de los polímeros 193
7.3 Termoplásticos 202
7.4 Plásticos termofijos 206
7.5 Aditivos en plásticos 207
7.6 Propiedades generales y aplicaciones de los termoplásticos 208
7.7 Propiedades generales y aplicaciones de los plásticos termofijos 211
7.8 Plásticos biodegradables 212
7.9 Elastómeros (hules) 214

EJEMPLOS:

7.1 Cemento para huesos dental y médico 198
7.2 Uso de polímeros conductores eléctricos en baterías recargables 206
7.3 Materiales para recubrimiento de puertas de refrigerador 212

7.1 Introducción

La palabra **plásticos** se utilizó por primera vez como sustantivo en 1909 y suele emplearse como sinónimo de **polímeros**. Los plásticos son uno de los numerosos materiales poliméricos y tienen moléculas extremadamente grandes (*macromoléculas* o *moléculas gigantes*). Entre los productos de consumo e industriales fabricados con polímeros están los recipientes para alimentos y bebidas, empaques, artículos de señalización, partes o piezas de computadoras y monitores, textiles, material médico, espumas, pinturas, blindajes de seguridad, juguetes, aparatos domésticos y electrodomésticos, lentes, engranes, productos eléctricos y electrónicos, así como carrocerías y componentes para automóviles.

Debido a sus múltiples propiedades, únicas y diversas, los polímeros han reemplazado de manera creciente a los componentes metálicos en aplicaciones como automóviles, aeronaves civiles y militares, artículos deportivos, juguetes, electrodomésticos y equipo de oficina. Estas sustituciones reflejan las ventajas de los polímeros en función de las siguientes características:

- Resistencia a la corrosión y resistencia a los productos químicos.
- Baja conductividad eléctrica y térmica.
- Baja densidad.
- Alta relación resistencia a peso (particularmente cuando son reforzados).
- Reducción del ruido.
- Amplias opciones de colores y transparencias.

TABLA 7.1

Gama de propiedades mecánicas para diversos plásticos de ingeniería a temperatura ambiente

Material	UTS (MPa)	*E* (GPa)	Elongación (%)	Relación de Poisson (ν)
ABS	28–55	1.4–2.8	75–5	—
ABS, reforzado	100	7.5	—	0.35
Acetal	55–70	1.4–3.5	75–25	—
Acetal, reforzado	135	10	—	0.35–0.40
Acrílico	40–75	1.4–3.5	50–5	—
Celulósico	10–48	0.4–1.4	100–5	—
Epóxico	35–140	3.5–17	10–1	—
Epóxico, reforzado	70–1400	21–52	4–2	—
Fluorocarbono	7–48	0.7–2	300–100	0.46–0.48
Nailon	55–83	1.4–2.8	200–60	0.32–0.40
Nailon, reforzado	70–210	2–10	10–1	—
Fenólico	28–70	2.8–21	2–0	—
Policarbonato	55–70	2.5–3	125–10	0.38
Policarbonato, reforzado	110	6	6–4	—
Poliéster	55	2	300–5	0.38
Poliéster, reforzado	110–160	8.3–12	3–1	—
Polietileno	7–40	0.1–1.4	1000–15	0.46
Polipropileno	20–35	0.7–1.2	500–10	—
Polipropileno, reforzado	40–100	3.5–6	4–2	—
Poliestireno	14–83	1.4–4	60–1	0.35
Cloruro de polivinilo	7–55	0.014–4	450–40	—

- Facilidad de manufactura y posibilidades de diseño complejo.
- Costo relativamente bajo (ver tabla 6.1).
- Otras características que pueden ser deseables o no (lo que depende de la aplicación), como baja resistencia y rigidez (tabla 7.1), alto coeficiente de expansión térmica, gama de temperatura útil baja: hasta 350 °C (660 °F), y menor estabilidad dimensional en servicio por cierto periodo.

La palabra *plástico* procede del griego *plastikos*, que significa "capaz de ser moldeado y formado". Los plásticos se pueden formar, maquinar, fundir y unir en diversas formas con relativa facilidad. Se requieren operaciones mínimas adicionales de acabado superficial, si es que se necesita alguna; esta característica proporciona una ventaja importante sobre los metales. Los plásticos se encuentran disponibles en el mercado como película, lámina, placa, barras y tubos de diversas secciones transversales.

La palabra *polímero* se utilizó por primera vez en 1866. Los primeros polímeros se fabricaron con **materiales orgánicos naturales** a partir de productos animales y vegetales; la *celulosa* es el ejemplo más común: mediante varias reacciones químicas se transforma en *acetato de celulosa*, utilizado para fabricar películas fotográficas (*celuloide*), láminas para empaque (celofán) y fibras textiles; *nitrato de celulosa*, que se usa en plásticos y explosivos; *rayón* (una fibra textil con base de celulosa); y barnices. El primer polímero **sintético** (fabricado por el hombre) fue un fenol formaldehído, un termofijo desarrollado en 1906 llamado *Baquelita* (su nombre comercial, en honor de L. H. Baekeland, 1863-1944).

El desarrollo de la tecnología moderna de los plásticos se inició en la década de 1920, cuando las materias primas necesarias para fabricar polímeros se extrajeron

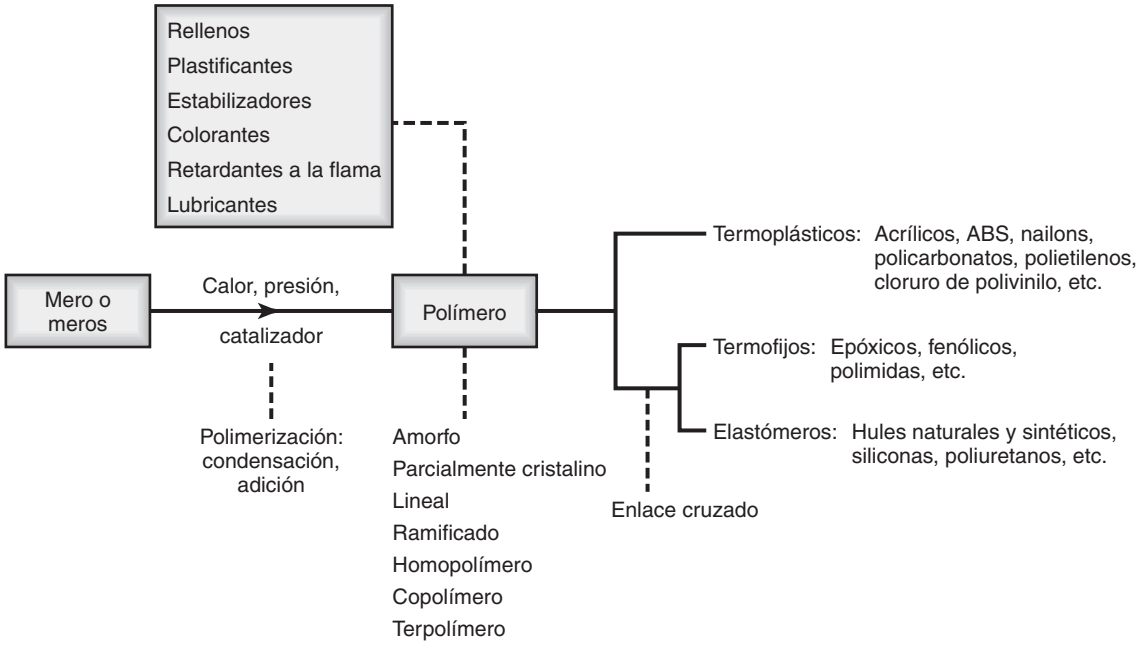


FIGURA 7.1 Descripción de los temas tratados en el capítulo 7.

de productos del carbón y del petróleo. El etileno fue el primer ejemplo de dichas materias primas; se convirtió en el principio básico para el polietileno. El etileno es el producto de la reacción entre el hidrógeno y el acetileno, y éste es el producto de la reacción entre el coque y el metano. Todos los polímeros comerciales, como polipropileno, cloruro de polivinilo, polimetilmetacrilato, policarbonato y otros, se fabrican de manera similar; a estos materiales se les conoce como **polímeros orgánicos sintéticos**.

En la figura 7.1 se describe el proceso básico para fabricar diversos polímeros sintéticos. El polietileno sólo comprende los átomos de carbono y de hidrógeno, pero se pueden obtener otros compuestos poliméricos con cloro, flúor, azufre, silicio, nitrógeno y oxígeno. El resultado ha sido el desarrollo de una gama muy amplia de polímeros, con una diversidad igualmente extensa de propiedades.

En este capítulo se describe la relación de la estructura de un polímero con sus propiedades y comportamiento, tanto en su manufactura como en su vida útil, en diferentes condiciones físicas y ambientales. En la figura 7.1 se describen los temas por presentar. En este capítulo también se definen las propiedades y aplicaciones de ingeniería de los plásticos, hules y elastómeros. En el capítulo 9 se explican los plásticos reforzados y los materiales compósitos, y en el capítulo 19 los métodos de procesamiento de los plásticos y los plásticos reforzados.

7.2 Estructura de los polímeros

Las propiedades de los polímeros dependen en gran medida de las estructuras de sus moléculas individuales, la forma y el tamaño de la molécula, y cómo se arreglan para formar la estructura de un polímero. Las moléculas de los polímeros se caracterizan por su gran tamaño, una característica que las distingue de la mayoría de las composiciones

químicas orgánicas. Los polímeros son **moléculas de cadena larga** que se forman por *polimerización* (esto es, mediante el enlace y el enlace cruzado de diferentes monómeros). Un **monómero** es el elemento básico de un polímero. La palabra **mero** (del griego *meros*, que significa "parte") indica la unidad repetitiva más pequeña; su uso es similar al del concepto *celda unitaria* en las estructuras cristalinas de los metales (sección 1.2).

El término **polímero** significa "muchos meros" (o unidades), por lo general repetidos cientos o miles de veces en una estructura similar a una cadena. La mayoría de los monómeros son *materiales orgánicos* en los que los átomos de carbono se unen mediante enlaces *covalentes* (compartiendo electrones) con otros átomos (como hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, flúor, cloro, silicio y azufre). Una molécula de etileno (fig. 7.2) es un ejemplo de un monómero simple que consta de átomos de carbono e hidrógeno.

7.2.1 Polimerización

Los monómeros se pueden unir como polímeros en unidades repetitivas para producir moléculas más y más largas mediante un proceso químico llamado **reacción de polimerización**. Estos procesos son complejos y aquí sólo los abordaremos brevemente. Aunque existen muchas variantes, son importantes dos procesos de polimerización: por condensación y por adición.

En la **polimerización por condensación** (fig. 7.3), los polímeros se producen por la formación de enlaces entre dos tipos de meros reactivos. Una característica de esta reac-

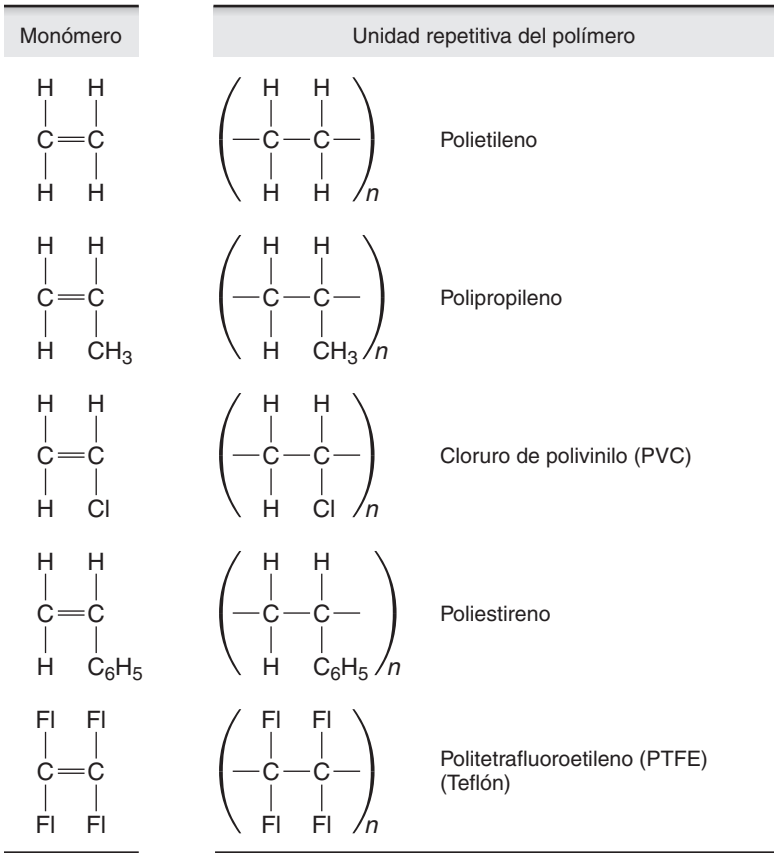


FIGURA 7.2 Estructura molecular de diversos polímeros. Estos son ejemplos de las unidades básicas de los plásticos.

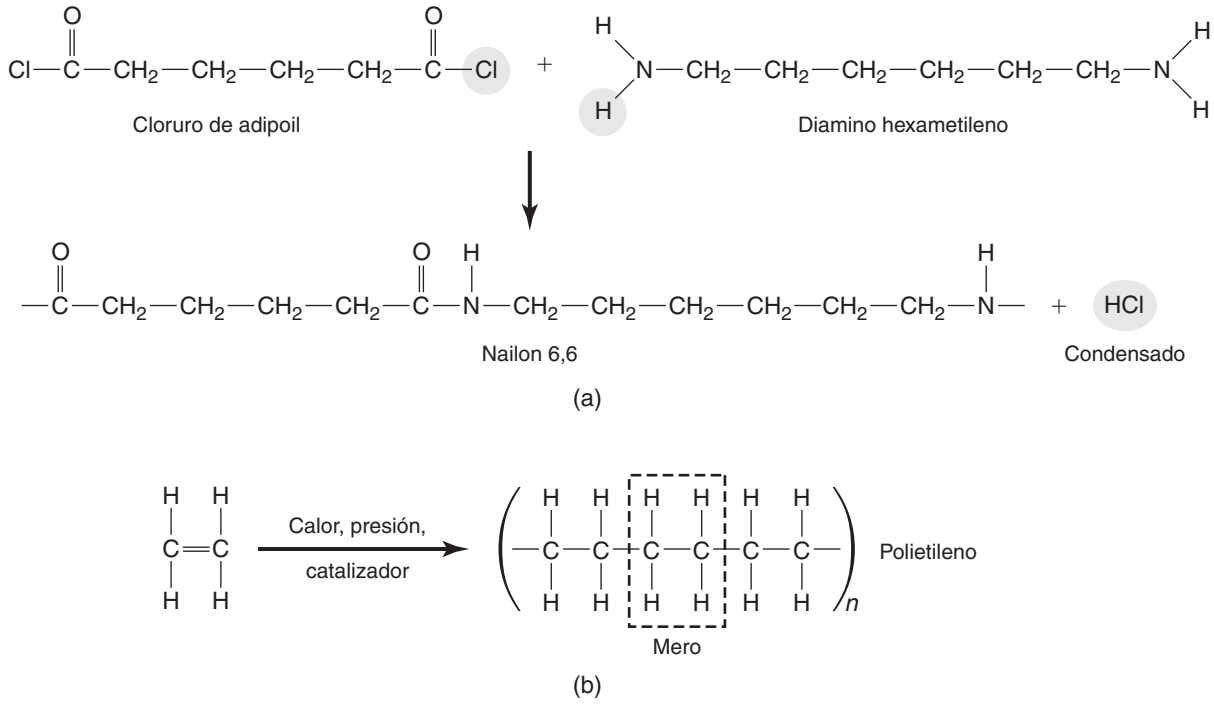


FIGURA 7.3 Ejemplos de polimerización. *(a)* Polimerización por condensación del nailon 6,6, y *(b)* por adición de moléculas de polietileno a partir de meros de etileno.

ción es que se condensan (de ahí el nombre) productos derivados por reacción (como el agua). A este proceso también se le llama **polimerización de crecimiento por etapas** o por **reacción por etapas,** ya que la molécula del polímero crece etapa por etapa hasta que se consume uno de los reactivos.

En la **polimerización por adición** (también llamada **polimerización por crecimiento de cadena** o **por reacción en cadena**), el enlace se realiza sin productos derivados de la reacción, como se muestra en la figura 7.3b. Se le llama "reacción en cadena" debido a la rapidez con que se forman simultáneamente las moléculas largas, por lo general en unos cuantos segundos. Esta velocidad es mucho mayor que la de la polimerización por condensación. En esta reacción se agrega un *iniciador* para abrir el doble enlace entre dos átomos de carbono, que inicia el proceso de unión agregando muchos más monómeros a una cadena creciente. Por ejemplo, los monómeros del etileno (fig. 7.3b) se unen para producir el polímero *polietileno*; en la figura 7.2 se muestran otros ejemplos de polímeros formados por adición.

Peso molecular. A la suma de los pesos moleculares de los meros en una cadena representativa se le llama *peso molecular* del polímero. Cuanto mayor sea dicho peso, mayor será la longitud promedio de la cadena. La mayoría de los polímeros comerciales tienen un peso molecular de entre 10,000 y 10,000,000. Debido a que la polimerización es un evento aleatorio, no todas las cadenas de polímero que se producen son de igual longitud: ésta cae dentro de una curva de distribución tradicional. Mediante el promedio determinamos y expresamos el peso molecular promedio de un polímero en una base estadística. A la distribución de los pesos moleculares en una cadena se le conoce como **distribución del peso molecular** (MWD, por sus siglas en inglés). El peso molecular de un polímero y su MWD tienen una fuerte influencia en sus propiedades. Por ejemplo, la resistencia a la tensión y al impacto, la resistencia al agrietamiento y la viscosidad (en el estado fundido) del polímero aumentan al incrementarse el peso molecular (fig. 7.4).

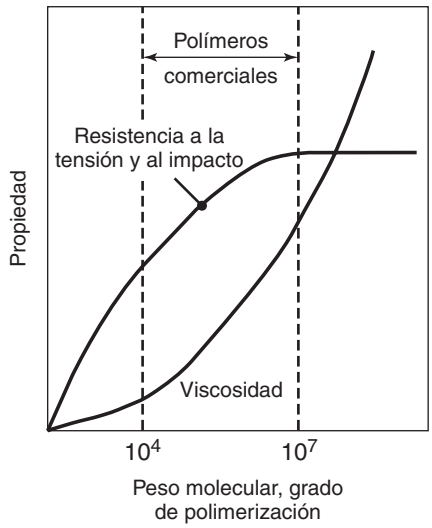


FIGURA 7.4 Efecto del peso molecular y grado de polimerización sobre la resistencia y viscosidad de los polímeros.

Grado de polimerización. Es conveniente expresar el tamaño de la cadena de un polímero en términos del *grado de polimerización* (DP, por sus siglas en inglés), que se define como la relación del peso molecular del polímero al peso molecular de la unidad repetitiva. Por ejemplo, el peso del mero del cloruro de polivinilo (PVC) es de 62.5; entonces, el DP del PVC con un peso molecular de 50,000 es 50,000/62.5 = 800. En términos de procesamiento del polímero (capítulo 19), a mayor DP, mayor viscosidad del polímero o su resistencia al flujo (fig. 7.4). La viscosidad elevada afecta la facilidad de formado y, por ende, eleva el costo global de procesamiento.

Enlace. Durante la polimerización, los monómeros se unen mediante **enlaces covalentes** formando una cadena del polímero. Debido a su resistencia, a los enlaces covalentes también se les llama **enlaces primarios**. A su vez, las cadenas de polímeros se mantienen unidas mediante **enlaces secundarios**, como los enlaces Van der Waals, de hidrógeno e iónicos. Los enlaces secundarios son más débiles que los primarios en uno o dos órdenes de magnitud. En un polímero determinado, el aumento de la resistencia y de la viscosidad con respecto a la del peso molecular se debe (en parte) al hecho de que, cuanto más larga sea la cadena del polímero, mayor será la energía necesaria para vencer la resistencia combinada de los enlaces secundarios. Por ejemplo, los polímeros de etileno que tienen DP de 1, 6, 35, 140 y 1350 a la temperatura ambiente tienen la forma de gas, líquido, grasa, cera y plástico duro, respectivamente.

Polímeros lineales. A los polímeros con forma de cadena mostrados en la figura 7.2 se les llama *polímeros lineales* debido a su estructura secuencial (fig. 7.5a). Sin embargo, una molécula lineal no tiene necesariamente una forma recta. Además de las mostradas en la figura, otros polímeros lineales son las poliamidas (nailon 6,6) y el fluoruro de polivinilo. En general, un polímero consta de más de un tipo de estructura; esto es, un polímero lineal puede contener algunas cadenas ramificadas y unidas de modo transversal. Las propiedades del polímero cambian significativamente a consecuencia de la ramificación y los enlaces cruzados.

Polímeros ramificados. Las propiedades de un polímero dependen no sólo del tipo de monómeros, sino también de su arreglo en la estructura molecular. En los *polímeros ramificados* (fig. 7.5b), las cadenas de ramas laterales se sujetan a la cadena principal du-

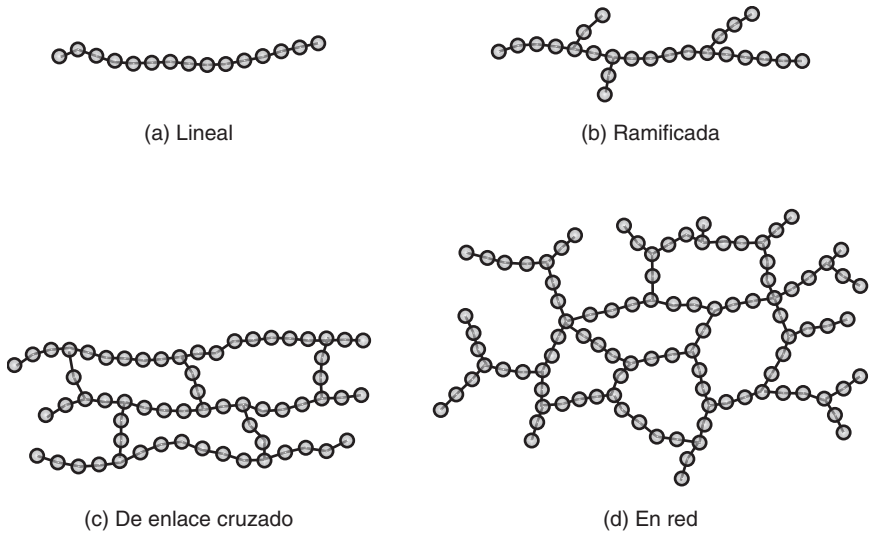


FIGURA 7.5 Esquema de cadenas de polímeros. *(a)* Estructura lineal: los termoplásticos como los acrílicos, nailons, polietileno y cloruro de polivinilo tienen estructuras lineales. *(b)* Estructura ramificada, como en el polietileno. *(c)* Estructura de enlace cruzado: muchos hules o elastómeros tienen esta estructura, y la vulcanización del hule la produce. *(d)* Estructura en red, que es básicamente de altos enlaces cruzados: ejemplos de ésta son los plásticos termofijos, como los epóxicos y los fenólicos.

rante la síntesis del polímero. La ramificación interfiere en el movimiento relativo de las cadenas moleculares. En consecuencia, aumenta su resistencia a la deformación y al agrietamiento por esfuerzo. La densidad de los polímeros ramificados es menor que la de los polímeros de cadenas lineales, porque las ramas interfieren en el empaquetamiento eficiente de las cadenas de los polímeros.

El comportamiento de los polímeros ramificados se puede comparar con el de los polímeros de cadenas lineales haciendo una analogía con una pila de ramas de árbol (polímeros ramificados) y un montón de troncos rectos (polímeros lineales). Obsérvese que es más difícil mover una rama dentro del arreglo de ramas que mover un tronco del montón de los mismos. Los entrelazamientos tridimensionales de las ramas dificultan más el movimiento, un fenómeno relacionado con el aumento de la resistencia.

Polímeros de enlace cruzado o **entrelazados.** Generalmente de estructura tridimensional, los *polímeros de enlace cruzado* o *entrelazados* tienen cadenas adyacentes unidas por los enlaces covalentes (fig. 7.5c). A los polímeros con una estructura de cadena de enlace cruzado se les llama **termofijos** o **plásticos termofijos**; ejemplos de ello son los epóxicos, fenólicos y Siliconas. El enlace cruzado influye de modo importante en las propiedades de los polímeros (por lo común aportando dureza, resistencia, rigidez, fragilidad y mejor estabilidad dimensional; ver fig. 7.6), así como en la **vulcanización** del hule (sección 7.9).

Polímeros en red. Estos polímeros constan de redes espaciales (tridimensionales) de tres o más enlaces covalentes activos (fig. 7.5d). A un polímero con muchos enlaces cruzados también se le considera polímero en red. Los polímeros termoplásticos que ya han sido formados pueden entrelazarse para obtener una resistencia mayor sometiéndolos a una radiación de alta energía, como luz ultravioleta, rayos X o a un haz de electrones. Sin embargo, la radiación excesiva puede degradar el polímero.

Copolímeros y terpolímeros. Si todas las unidades repetitivas de la cadena de un polímero son del mismo tipo, a la molécula se le llama *homopolímero*. Sin embargo, al

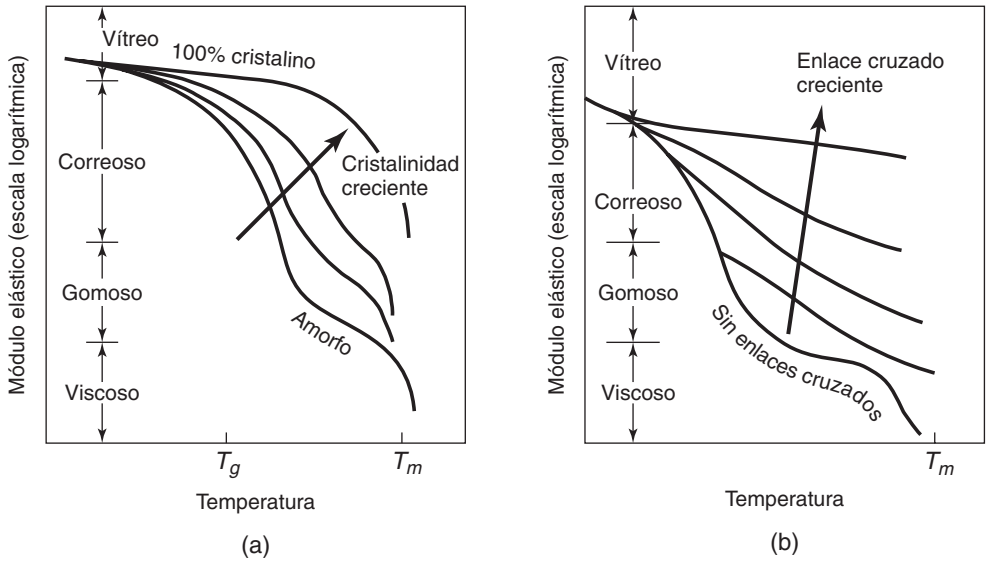


FIGURA 7.6 Comportamiento de los polímeros en función de la temperatura y *(a)* el grado de cristalinidad, y *(b)* enlazamiento cruzado. Al comportamiento combinado elástico y viscoso de los polímeros se le conoce como viscoelasticidad.

igual que las aleaciones metálicas de solución sólida (sección 4.2), pueden combinarse dos o tres tipos de monómeros para desarrollar algunas propiedades y características especiales en el polímero, como resistencia, tenacidad y formabilidad mejoradas. Los *copolímeros* contienen dos tipos de polímeros (por ejemplo, estireno-butadieno, que se utiliza ampliamente en llantas para automóviles). Los *terpolímeros* contienen tres tipos, por ejemplo, ABS (acrilonitrilo-butadieno-estireno), que se utiliza para cascos, teléfonos y recubrimientos de refrigeradores.

EJEMPLO 7.1 Cemento para huesos dental y médico

El polimetilmetacrilato (PMMA) es un polímero acrílico que suele utilizarse como adhesivo en aplicaciones dentales y médicas, por lo que se le conoce como cemento para huesos. Existen numerosas formas de PMMA, pero este ejemplo describe la más común, que comprende una reacción de polimerización por adición. El PMMA se produce en dos partes: polvo y líquido, que se mezclan a mano. El líquido humedece y disuelve parcialmente el polvo, produciendo un líquido viscoso del orden de 0.1 Ns/m^2, similar al del aceite vegetal. La viscosidad aumenta de modo notable hasta que se alcanza un estado de "masa" en un tiempo aproximado de cinco minutos y se endurece totalmente después de cinco minutos más.

El polvo consiste en partículas de poli[(metilmetacrilato)-coestireno] de alto peso molecular, de unos 50 μm de diámetro, que contienen una pequeña fracción volumétrica de peróxido de benzoilo. El líquido consta de un monómero de metilmetacrilato (MMA) con una pequeña cantidad de n,n dimetil-p-toluidina (DMPT) disuelta. Cuando se mezclan el polvo y el líquido, el MMA humedece las partículas (disolviendo una capa superficial de las partículas de PMMA) y la DMPT divide la molécula de peróxido de benzoilo en dos partes para formar un catalizador con un electrón libre (al que algunas veces se llama radical libre). Dicho catalizador provoca un rápido crecimiento del PMMA a partir de los meros de MMA para que el material final sea un compuesto de alto peso molecular, con partículas de PMMA interconectadas por cadenas de PMMA. En la figura 7.7 se muestra el esquema de un cemento para huesos totalmente desarrollado.

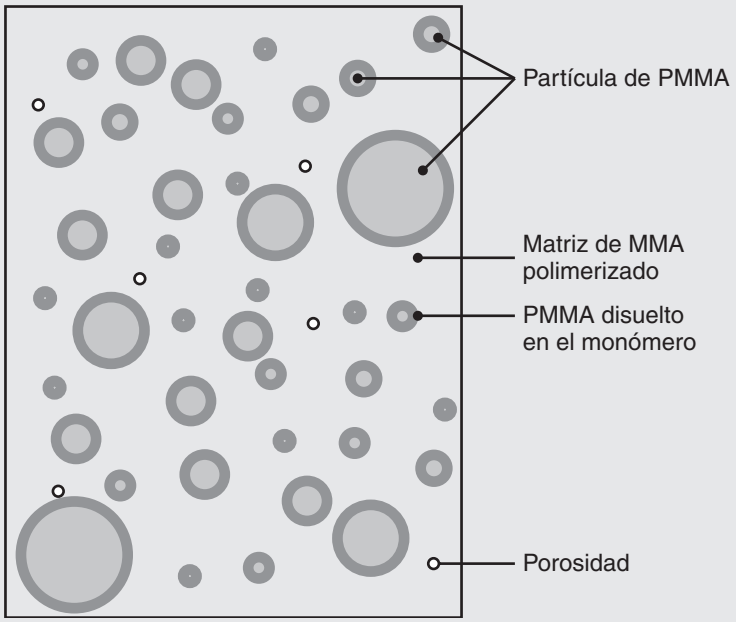


FIGURA 7.7 Esquema de la microestructura del cemento de polimetilmetacrilato utilizado en aplicaciones dentales y médicas.

7.2.2 Cristalinidad

Los polímeros como el polimetilmetacrilato, el policarbonato y el poliestireno suelen ser **amorfos**; esto es, las cadenas de polímeros existen sin un patrón repetitivo de largo alcance (ver también *aleaciones amorfas*, sección 6.14). Se dice con frecuencia que el arreglo amorfo de las cadenas de los polímeros es como un plato de espagueti o como lombrices en una cubeta: todos enlazados unos con otros. Sin embargo, en ciertos polímeros es posible impartir alguna cristalinidad y, de esta manera, modificar sus características. Este arreglo se puede promover durante la síntesis del polímero, o por deformación durante su procesamiento subsecuente.

A las regiones cristalinas en los polímeros se les llama **cristalitas** (fig. 7.8), las cuales se forman cuando las moléculas largas se arreglan de modo ordenado entre ellas, igual que como se dobla una manguera para incendios en su gabinete o los pañuelos desechables en una caja. Se puede considerar un polímero parcialmente cristalino (**semicristalino**) como un material bifásico, con una fase cristalina y otra amorfa.

Mediante el control de la rapidez de solidificación durante el enfriamiento y la estructura de la cadena, es posible aportar diferentes **grados de cristalinidad** a los polímeros, aunque nunca al 100%. La cristalinidad varía desde un cristal casi completo (de casi 95% en volumen en el caso del polietileno) hasta polímeros ligeramente cristalizados (en su mayoría amorfos). El grado de cristalinidad también se ve afectado por la ramificación. Un polímero lineal puede volverse altamente cristalino, pero no un polímero muy ramificado, aunque puede desarrollar un nivel bajo de cristalinidad, nunca alcanzará un alto contenido de cristalitas, debido a que las ramas interfieren en la alineación de las cadenas en un arreglo cristalino regular.

Efectos de la cristalinidad. El grado de cristalinidad afecta en gran medida las propiedades mecánicas y físicas de los polímeros: a medida que la cristalinidad aumenta, los polímeros se vuelven más rígidos, más duros, menos dúctiles, más densos, menos flexi-

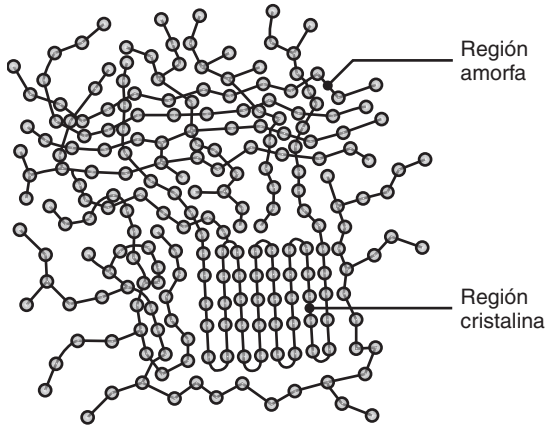


FIGURA 7.8 Regiones amorfa y cristalina en un polímero. La región cristalina (cristalita) tiene un arreglo ordenado de moléculas. Cuanto mayor es la cristalinidad, más duro y rígido y menos dúctil será el polímero.

bles, y más resistentes a los solventes y al calor (fig. 7.6). Al aumento de densidad con una cristalinidad creciente se le llama *contracción por cristalización*, que es provocada por un empaquetamiento más eficiente de las moléculas en la red cristalina. Por ejemplo, a la forma de polietileno altamente cristalina se le conoce como polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés), la cual tiene una gravedad específica dentro de un intervalo de 0.941 a 0.970 (80% a 95% cristalino). Es más resistente, rígido y tenaz y menos dúctil que el polietileno de baja densidad (LDPE, por sus siglas en inglés), el cual es de 60% a 70% cristalino y tiene un peso específico de aproximadamente 0.910 a 0.925.

El grado de cristalinidad también afecta las propiedades ópticas de los polímeros. La reflexión de la luz en los límites entre las regiones cristalina y amorfa del polímero provoca opacidad. Además, debido a que el índice de refracción es proporcional a la densidad, cuanto más grande sea la diferencia de densidad entre las fases amorfa y cristalina, mayor será dicha opacidad. Los polímeros que son totalmente amorfos pueden ser transparentes, como el policarbonato y los acrílicos.

7.2.3 Temperatura de transición vítrea

Aunque los polímeros amorfos no tienen un punto de fusión específico, sufren un cambio claro en su comportamiento mecánico en un intervalo de temperatura muy reducido. A bajas temperaturas son duros, rígidos, frágiles y vítreos; a altas temperaturas son gomosos o correosos. La temperatura a la cual ocurre dicha transición se le llama **temperatura de transición vítrea** (T_g), también llamada *punto vítreo* o *temperatura vítrea*. El término vítreo se utiliza en esta descripción porque los vidrios, que son sólidos amorfos, se comportan de la misma manera (ver *vidrios metálicos*, sección 6.14); una excepción es el policarbonato, que no es rígido ni frágil debajo de esta temperatura de transición vítrea. El policarbonato es tenaz a temperatura ambiente y se usa para fabricar cascos y escudos de seguridad.

Para determinar la T_g se establece el volumen específico del polímero, se grafica contra la temperatura y queda marcado por un cambio abrupto en la pendiente de la curva (fig. 7.9). En el caso de los polímeros fuertemente entrelazados, la pendiente de la curva cambia gradualmente cerca de T_g, de ahí que pueda ser difícil determinar T_g para estos polímeros. La temperatura de transición vítrea varía con diferentes políme-

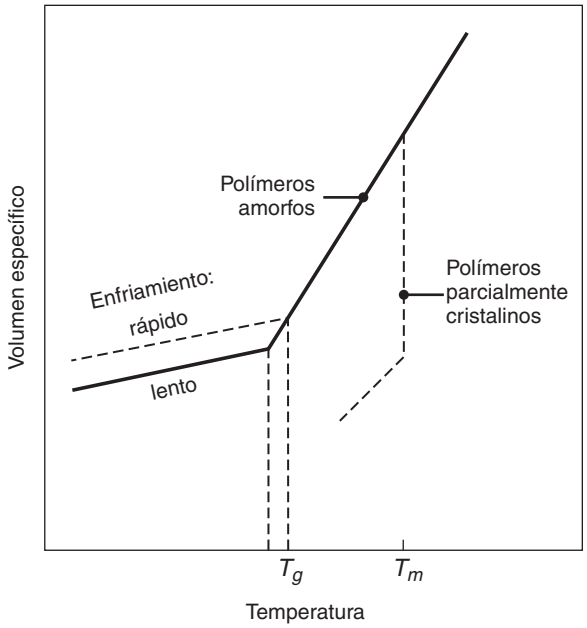


FIGURA 7.9 Volumen específico de polímeros en función de la temperatura. Los polímeros amorfos, como el acrílico y el policarbonato, tienen una temperatura de transición vítrea (T_g) pero no un punto específico de fusión, T_m. Los polímeros parcialmente cristalinos, como el polietileno y los nailons, se contraen abruptamente al pasar por sus temperaturas de fusión durante el enfriamiento.

ros (tabla 7.2). Por ejemplo, en algunos polímeros la temperatura ambiente es superior a T_g, mientras que en otros es menor. A diferencia de los polímeros amorfos, los polímeros parcialmente cristalinos tienen un punto de fusión definido, T_m (fig. 7.9; ver también la tabla 7.2). Debido a los cambios estructurales que se presentan (cambios de primer orden), el volumen específico del polímero cae repentinamente al reducirse su temperatura.

TABLA 7.2

Temperaturas de transición vítrea y de fusión de algunos polímeros

Material	T_g (°C)	T_m (°C)
Nailon 6,6	57	265
Policarbonato	150	265
Poliéster	73	265
Polietileno		
Alta densidad	−90	137
Baja densidad	−110	115
Polimetilmetacrilato	105	—
Polipropileno	−14	176
Poliestireno	100	239
Politetrafluoroetileno	−90	327
Cloruro de polivinilo	87	212
Hule	−73	—

7.2.4 Mezclas de polímeros

El comportamiento frágil de los polímeros amorfos por debajo de su temperatura de transición vítrea se puede reducir *mezclándolos*, por lo general con pequeñas cantidades de un **elastómero** (sección 7.9). Estas diminutas partículas se dispersan a través de todo el polímero amorfo, aumentando su tenacidad y su resistencia al impacto al mejorar su resistencia a la propagación de las grietas. A estas mezclas de polímeros se les conoce como **polímeros modificados con hule**.

Los avances en el mezclado involucran varios componentes, creando polimezclas que utilizan las propiedades favorables de diferentes polímeros. Las **mezclas miscibles** (mezcla sin separación de las dos fases) se crean mediante un proceso similar al de las aleaciones de los metales; esto permite que las mezclas de polímeros se vuelvan más dúctiles. Dichas mezclas constituyen aproximadamente 20% de toda la producción de polímeros.

7.3 Termoplásticos

Se indicó antes que, dentro de cada molécula, los enlaces entre moléculas adyacentes de cadena larga (enlaces secundarios) son mucho más débiles que los enlaces covalentes entre los meros (enlaces primarios). La resistencia de los enlaces secundarios determina la resistencia global del polímero; los polímeros lineales y los ramificados tienen enlaces secundarios débiles.

Conforme se eleva la temperatura por encima de la temperatura de transición vítrea (T_g) o del punto de fusión (T_m), algunos polímeros se vuelven más fáciles de formar o moldear. El incremento de temperatura debilita los enlaces secundarios (mediante vibración térmica de las moléculas largas), y las cadenas adyacentes pueden moverse entonces con más facilidad cuando se someten a fuerzas externas de formado. Cuando el polímero se enfría, regresa a su dureza y resistencia originales; en otras palabras, el proceso es reversible. A los polímeros que muestran este comportamiento se les llama **termoplásticos** (de los cuales son ejemplos comunes los acrílicos, celulósicos, nailons, polietilenos y el cloruro de polivinilo).

El comportamiento de los termoplásticos depende de otras variables, así como de su estructura y composición. Entre las más importantes están la temperatura y la velocidad de deformación. Por debajo de la temperatura de transición vítrea, la mayoría de los polímeros son *vítreos* (frágiles) y se comportan como un sólido elástico; esto es, la relación entre esfuerzo y deformación es lineal (ver fig. 2.2). Por ejemplo, el polimetilmetacrilato (PMMA) es vítreo debajo de su T_g y el policarbonato no lo es. El comportamiento vítreo se puede representar mediante un resorte, cuya rigidez equivale al módulo de elasticidad del polímero.

Cuando se aumenta más el esfuerzo aplicado el polímero finalmente se fractura, igual que le sucede a una pieza de vidrio a temperatura ambiente. Los plásticos experimentan los fenómenos de fatiga y termofluencia, del mismo modo que los metales. En la figura 7.10 se muestran curvas esfuerzo-deformación típicas de algunos termoplásticos y termofijos a la temperatura ambiente. Obsérvese que estos plásticos tienen diversos comportamientos, que se pueden describir como rígido, suave, frágil, flexible, etc. Las propiedades mecánicas de los polímeros listados en la tabla 7.1 indican que los termoplásticos son casi dos órdenes de magnitud menos rígidos que los metales. Su máxima resistencia a la tensión es casi un orden de magnitud menor que la de los metales (ver tabla 2.1).

Efectos de la temperatura. Si se eleva la temperatura de un termoplástico por arriba de su T_g, primero se vuelve *correoso* y después, al aumentar la temperatura, *gomoso o con un comportamiento parecido al hule* (fig. 7.6). Finalmente, a temperaturas más elevadas (por ejemplo, arriba de T_m para los termoplásticos cristalinos), se convierte en un *fluido viscoso*: su viscosidad disminuye al incrementarse la temperatura. A temperaturas aún mayores, la respuesta de un termoplástico puede asemejarse a la del helado.

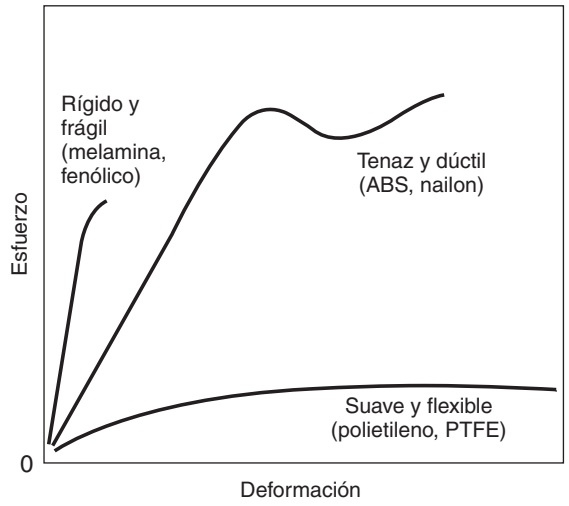


FIGURA 7.10 Terminología general que describe el comportamiento de tres tipos de plásticos. El PTFE (politetrafluoroetileno) tiene el nombre comercial de *Teflón*. *Fuente*: R. L. E. Brown.

Éste puede ser suavizado, moldeado, enfriado nuevamente, suavizado otra vez y moldeado en varias ocasiones. Sin embargo, en la práctica, el calentamiento y enfriamiento repetidos pueden provocar **degradación**, o **envejecimiento térmico**, de los termoplásticos.

El efecto típico de la temperatura sobre la resistencia y el módulo elástico de los termoplásticos es semejante al de los metales; al aumentar la temperatura, disminuyen la resistencia y el módulo de elasticidad y aumenta la tenacidad (fig. 7.11). En la figura 7.12 se muestra el efecto de la temperatura en la resistencia al impacto; obsérvese la gran diferencia en el comportamiento al impacto de diversos polímeros.

Efecto de la velocidad de deformación. El comportamiento de los termoplásticos es similar a la sensibilidad a la velocidad de deformación de los metales, indicada por el exponente m de sensibilidad a la velocidad de deformación de la ecuación 2.9. En gene-

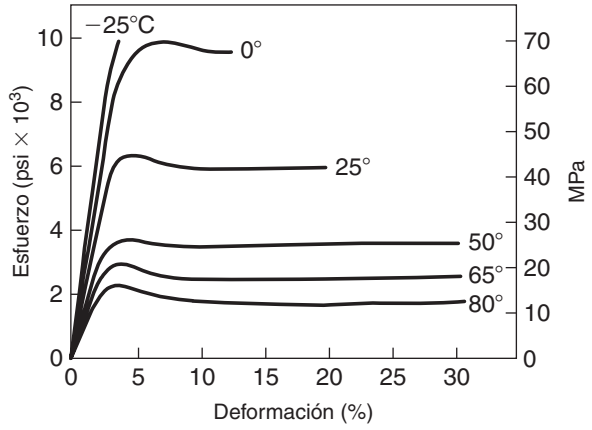


FIGURA 7.11 Efecto de la temperatura sobre la curva esfuerzo-deformación para el acetato de celulosa, un termoplástico. Obsérvese la gran caída de resistencia y el gran aumento de ductilidad con un incremento relativamente pequeño de temperatura. *Fuente*: T. S. Carswell y H. K. Nason.

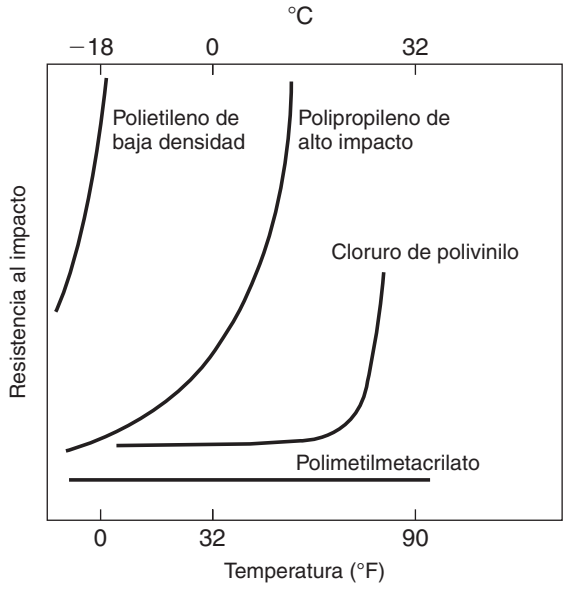


FIGURA 7.12 Efecto de la temperatura en la resistencia al impacto de varios plásticos. Pequeños cambios en la temperatura pueden tener un efecto significativo sobre la resistencia al impacto. *Fuente*: P. C. Powell.

ral, los termoplásticos tienen valores de *m* elevados, lo que indica que pueden sufrir una gran *deformación uniforme* a tensión antes de la fractura (fig. 7.13). Obsérvese cómo (a diferencia de los metales ordinarios) la región de formación de cuello se alarga de modo considerable. Este fenómeno puede demostrarse con facilidad estirando una pieza del sujetador plástico de los paquetes de seis latas de bebidas (6 *packs*). Nótese la secuencia del comportamiento de formación de cuello y de estiramiento mostrada en la figura 7.13a. Esta característica (que es la misma en los metales superplásticos) permite el termoformado de los termoplásticos (sección 19.6) y darles formas tan complejas como charolas para carnes, anuncios luminosos y botellas para bebidas.

Orientación. Cuando los termoplásticos se deforman (digamos, estirándolos), las moléculas de cadena larga tienden a alinearse en la misma dirección del elongación; a este proceso se le llama *orientación*. Al igual que en los metales, el polímero se vuelve anisotrópico (ver también la sección 1.5), por lo que la muestra se vuelve más fuerte y rígida en la dirección estirada (alargada) que en la dirección transversal. El estiramiento es una técnica importante para resaltar la resistencia y tenacidad de los polímeros.

Termofluencia y relajamiento de esfuerzos. Debido a su comportamiento viscoelástico, los termoplásticos son particularmente susceptibles a la termofluencia y a la relajación de esfuerzos en mayor medida que los metales. La extensión de estos fenómenos depende del polímero, el nivel de esfuerzos, la temperatura y el tiempo. Los termoplásticos muestran termofluencia y relajación de esfuerzos a temperatura ambiente; la mayoría de los metales hacen lo mismo a temperaturas elevadas.

Cuarteaduras. Algunos termoplásticos (como el poliestireno y el polimetilmetacrilato), cuando se someten a esfuerzos de tensión o a doblez, desarrollan estrechas regiones localizadas con forma de cuña, de material muy deformado, denominadas *cuarteaduras*. Aunque pueden parecer grietas, las cuarteaduras son material esponjoso que suele contener 50% de huecos. Con una carga de tensión creciente sobre el espécimen, estos huecos coalescen para formar una grieta, que al final puede llevar a la fractura del polímero. Las cuarteaduras se han observado en los polímeros vítreos transparentes y en otros políme-

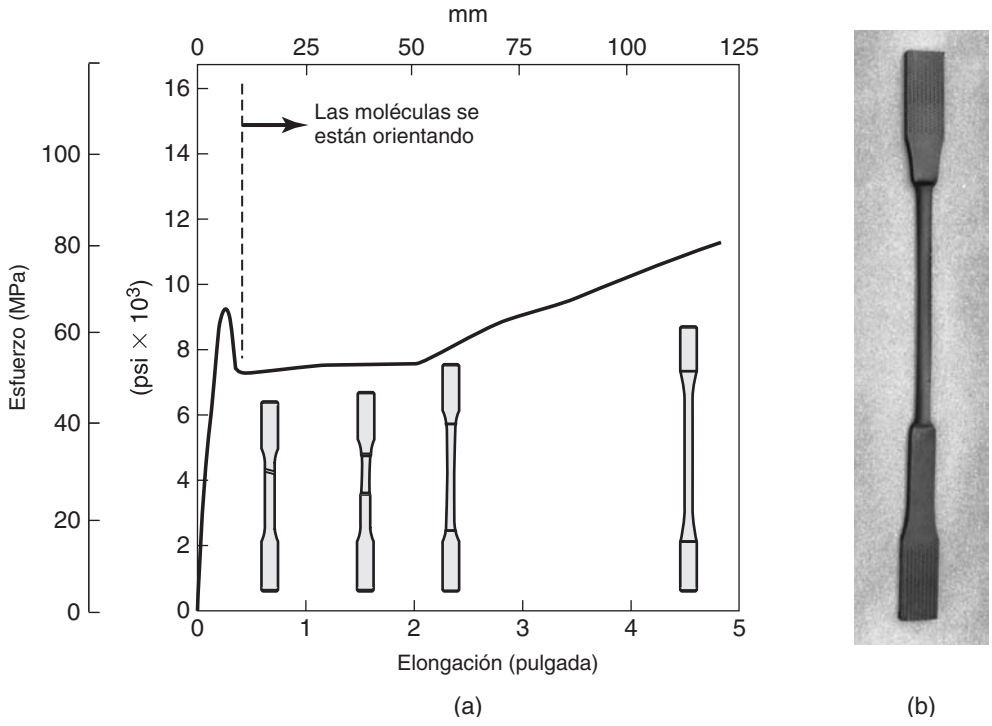


FIGURA 7.13 *(a)* Curva carga-elongación para el policarbonato, un termoplástico. *Fuente*: Cortesía de R. P. Kambour y R. E. Robertson. *(b)* Espécimen de ensayo de tensión del polietileno de alta densidad, que muestra una elongación uniforme (la región larga y estrecha del espécimen).

ros. El medio ambiente (en particular la presencia de solventes, lubricantes o vapor de agua) puede realzar la formación de cuarteaduras (**agrietamiento por esfuerzo del medio ambiente** y **cuarteaduras por solventes**). Los esfuerzos residuales en el material también contribuyen a las cuarteaduras y al agrietamiento del polímero; la radiación (sobre todo la ultravioleta) puede aumentar el cuarteamiento en algunos polímeros.

Un fenómeno relacionado con el cuarteamiento es el **emblanquecimiento por esfuerzo**. Cuando se somete a esfuerzos de tensión (como los causados por el plegamiento o el doblez), el plástico adquiere un color más claro, fenómeno usualmente atribuido a la formación de huecos microscópicos en el material. El resultado es que el material se vuelve menos translúcido (transmite menos luz) o más opaco. Este comportamiento puede demostrarse con facilidad doblando los componentes de plástico que suelen encontrarse en las cintas de color de las carpetas para cubiertas de informes, productos domésticos y juguetes.

Absorción de agua. Una característica importante de algunos polímeros, como los nailons, es su capacidad para absorber agua. Este líquido actúa como un agente plastificante: hace más plástico el polímero (ver sección 7.5). En cierto sentido, lubrica las cadenas en la región amorfa. Con una creciente absorción de humedad, la temperatura de transición vítrea, el esfuerzo de fluencia y el módulo de elasticidad del polímero por lo general se reducen drásticamente. También ocurren cambios dimensionales, sobre todo en un ambiente húmedo.

Propiedades térmicas y eléctricas. En comparación con los metales, los plásticos se caracterizan por una baja conductividad térmica y eléctrica, baja gravedad específica (que va de 0.90 a 2.2) y un alto coeficiente de expansión térmica (aproximadamente un orden de magnitud mayor; ver tablas 3.1 y 3.2). Debido a que la mayoría de los polímeros tienen baja conductividad eléctrica, se pueden utilizar como aislantes y material de empaque para componentes electrónicos.

La conductividad eléctrica de algunos polímeros se puede aumentar **dopándolos** (introduciendo impurezas, como polvos metálicos, sales y yoduros) dentro del polímero. Descubiertos al finalizar la década de 1970, entre los **polímeros eléctricamente conductores** están el óxido de polietileno, el poliacetileno, la polianilina, el polipirrol y el politiofeno. La conductividad eléctrica de los polímeros aumenta con la absorción de humedad; sus propiedades también se pueden cambiar mediante irradiación. Es posible aplicar los polímeros conductores en adhesivos, dispositivos microelectrónicos, baterías recargables, capacitores, catalizadores, celdas de combustible, sensores de nivel de combustible, tableros descongeladores, antenas de radar, recubrimientos antiestáticos y motores de accionamiento térmico (utilizados en aplicaciones de movimiento lineal, antenas motorizadas, quemacocos y ventanas eléctricas).

También se han desarrollado **polímeros térmicamente conductores** para aplicaciones que requieren estabilidad dimensional y transferencia de calor (como sumideros de calor), así como para reducir el tiempo de los ciclos de moldeo y procesamiento de los termoplásticos. Estos polímeros son termoplásticos (como el polipropileno, policarbonato, nailon) y se embeben con partículas conductoras térmicas no metálicas; su conductividad puede ser hasta 100 veces la de los plásticos convencionales.

EJEMPLO 7.2 Uso de polímeros conductores eléctricos en baterías recargables

Una de las primeras aplicaciones de los polímeros conductores se produjo en las baterías recargables. Las baterías modernas utilizan litio o un óxido de litio como cátodo y carburo de litio (Li_yC_6) como ánodo, separados por una capa de polímero conductor. Se utiliza el litio porque es el metal más ligero y tiene un alto potencial electroquímico, por lo que su energía por volumen es la más elevada.

El polímero, usualmente óxido de polietileno (PEO) con una sal de litio disuelta, se coloca entre el cátodo y el ánodo. Durante la descarga, el Li_yC_6 se oxida y descarga electrones libres e iones de litio. Los electrones accionan la electrónica externa y los iones Li^+ se almacenan en el polímero. Cuando se agota el cátodo, la batería debe recargarse para restaurarlo. Durante la carga, el Li^+ se transfiere hacia el cátodo a través de los electrolitos del polímero. Las baterías de iones de litio tienen buena capacidad, pueden generar hasta 4.5 V y colocarse en serie para obtener voltajes mayores. Se están realizando desarrollos para fabricar baterías en las que los dos electrodos estén hechos de polímeros conductores; ya se ha construido una con capacidad de 3.5 V.

7.4 Plásticos termofijos

Cuando las moléculas de cadena larga de un polímero se enlazan transversalmente en un arreglo tridimensional, la estructura se convierte en una *molécula gigante* con enlaces covalentes fuertes. A estos polímeros se les llama **polímeros termofijos** o **termofijos**, ya que (durante la polimerización) la red se completa y la forma de la parte se fija de modo permanente. A diferencia de los termoplásticos, esta reacción de **curado** (**enlace cruzado**) es *irreversible*. La respuesta de un plástico termofijo a una temperatura suficientemente elevada puede asemejarse a lo que sucede en el horneado de un pastel o al hervir un huevo: una vez que se ha cocinado y enfriado el pastel, o se ha hervido y enfriado el huevo, su forma no cambia si se recalienta. Algunos termofijos (como las epóxicas, poliéster y uretano) curan a la temperatura ambiente, ya que el calor producido por la reacción exotérmica es suficiente para curar el plástico.

En general, el proceso de polimerización de los termofijos se efectúa en dos etapas. La primera ocurre en la planta química, donde las moléculas se polimerizan parcialmente en cadenas lineales. La segunda etapa ocurre en la planta productora de partes, donde

se completa el enlace cruzado bajo calor y presión durante el moldeo y formado de la parte (capítulo 19).

Los polímeros termofijos no tienen una temperatura de transición vítrea rigurosamente definida. Debido a la naturaleza de los enlaces, la resistencia y dureza de un termofijo (a diferencia de las de los termoplásticos) no son afectadas por la temperatura o por la velocidad de deformación. Si se aumenta la temperatura lo suficiente, el polímero termofijo comienza a quemarse, degradarse y carbonizarse. En general, los termofijos poseen mejores propiedades mecánicas, térmicas y químicas, resistencia eléctrica y estabilidad dimensional que los termoplásticos. Un termofijo común es el **fenólico**, producto de la reacción entre el fenol y el formaldehído. Los mangos y perillas de los recipientes de cocina y sartenes y de los componentes de interruptores y tomas de energía eléctrica son productos comunes fabricados a partir de este polímero.

7.5 Aditivos en plásticos

Para conseguir ciertas propiedades específicas los polímeros suelen combinarse con *aditivos*. Éstos modifican y mejoran determinadas características del polímero, como rigidez, resistencia, color y resistencia al medio ambiente, flamabilidad, resistencia al arco (para aplicaciones eléctricas) y facilidad para su procesamiento posterior.

- Los **plastificantes** se agregan a los polímeros para aportarles *flexibilidad* y *suavidad*, reduciendo su temperatura de transición vítrea. Los plastificantes son solventes de bajo peso molecular con altos puntos de ebullición (no volátiles); reducen la resistencia de los enlaces secundarios entre las moléculas de cadena larga y, por ende, hacen más flexible y suave al polímero. El uso más común de los plastificantes es en el cloruro de polivinilo (PVC), que se mantiene flexible durante sus múltiples usos; también se aplican en láminas delgadas, películas, tubos, cortinas para regaderas y materiales para vestimentas.
- A la mayoría de los polímeros les afectan la *radiación ultravioleta* (como la de la luz solar) y el *oxígeno*, que debilitan y rompen los enlaces primarios y provocan la *escisión* (separación) de las moléculas de cadena larga; entonces el polímero se degrada y se vuelve rígido y frágil. Pero esta degradación también puede ser benéfica, como en la disposición de los objetos plásticos cuando se someten al ataque ambiental (ver también la sección 7.8). Un ejemplo típico de protección contra la radiación ultravioleta es la composición de algunos plásticos y hule con **negro de humo** (hollín), que absorbe un alto porcentaje de la radiación ultravioleta. La protección contra la degradación provocada por la oxidación, sobre todo a temperaturas elevadas, se logra agregando *antioxidantes* o diversos *recubrimientos* al polímero.
- Los **rellenos** utilizados en los plásticos son por lo general polvo de madera (aserrín fino), harina de sílice (polvo fino de sílice), arcilla, mica en polvo, talco, carbonato de calcio y fibras cortas de celulosa, vidrio o asbesto. Debido a su bajo costo, los rellenos son importantes para reducir el costo global de los polímeros. Dependiendo de su tipo, también pueden mejorar la resistencia, dureza, tenacidad, resistencia a la abrasión, estabilidad dimensional o rigidez de los plásticos. Estas propiedades son mayores con porcentajes específicos de diferentes combinaciones polímero de relleno. Al igual que con los plásticos reforzados (sección 9.2), la efectividad de un relleno depende de la naturaleza del enlace entre el material de relleno y las cadenas del polímero.
- La amplia variedad de colores disponibles en los plásticos se obtiene al agregarles **colorantes**, ya sea orgánicos (*tintas*) o inorgánicos (*pigmentos*). La selección de un colorante depende de la temperatura de servicio y la cantidad esperada de exposición a la luz. Los pigmentos son partículas dispersas; por lo general tienen mayor resistencia que los tintes a la temperatura y la luz.

- Si la temperatura es muy alta, la mayoría de los polímeros se encienden y se queman; en general, el color de la flama es amarilla o azul. La in**flamabilidad** (la capacidad de tolerar la combustión) de los polímeros varía de modo considerable, lo que depende de su composición (en particular de su contenido de cloro y flúor). La inflamabilidad de los polímeros puede reducirse fabricándolos con materias primas menos inflamables o mediante la adición de **retardantes a la flama**, como compuestos de cloro, bromo y fósforo. El enlazamiento cruzado también reduce la inflamabilidad del polímero.

  La siguiente lista enumera varios polímeros comunes con diferentes características de combustión:

  1. Plásticos que no se queman: *fluorocarbonos* (*Teflón*).
  2. Plásticos que sí se queman, pero que son autoextinguibles: *carbonato, nailon, cloruro de vinilo*.
  3. Plásticos que se queman y que no son autoextinguibles: *acetal, acrílico, acrilonitrilo-butadieno-estireno, celulosa, poliéster, propileno, estireno*.

- Se pueden agregar **lubricantes** a los polímeros para reducir la fricción durante su procesamiento posterior en productos útiles y para evitar que las partes se peguen a los moldes. Los lubricantes típicos son aceite de linaza, aceite mineral y ceras (naturales y sintéticas); se utilizan además jabones metálicos, como estearato de calcio y estearato de zinc. La lubricación también es importante para impedir que las películas delgadas de polímeros se peguen entre sí.

7.6 Propiedades generales y aplicaciones de los termoplásticos

En esta sección se describen las características generales y aplicaciones típicas de los principales termoplásticos, particularmente en lo que se relaciona con la manufactura y la vida útil de los productos y componentes plásticos. En la tabla 7.3 se dan recomendaciones generales para diversas aplicaciones de los plásticos y en la tabla 7.4 se listan algunos de los nombres comerciales más comunes de los termoplásticos.

Los **acetales** (de *acético* y *alcohol*) tienen buena resistencia, rigidez y resistencia a la termofluencia, abrasión, humedad, calor y productos químicos. Se aplican por lo común en partes y componentes mecánicos que requieren un elevado desempeño durante un largo periodo (es decir, rodamientos, levas, bujes y rodillos), impulsores, superficies de desgaste, tubos, válvulas, regaderas y carcasas.

Los **acrílicos** (polimetilmetacrilato, PMMA) poseen resistencia moderada, buenas propiedades ópticas y resistencia al medio ambiente. Son transparentes (aunque pueden hacerse opacos), en general son resistentes a los productos químicos y tienen buena resistencia eléctrica. Suelen aplicarse en lentes, anuncios luminosos, pantallas, vidriería para ventanas, domos para tragaluces, cubiertas de burbuja, micas para automóviles, parabrisas, monturas para iluminación y muebles.

El **acrilonitrilo-butadieno-estireno** (ABS) es rígido y dimensionalmente estable. Tiene buena resistencia al impacto, a la abrasión y a los productos químicos; buena resistencia y tenacidad; buenas propiedades a baja temperatura y alta resistencia eléctrica. Se aplican por lo general en tuberías, acoplamientos, artículos de plomería recubiertos con cromo, cascos, mangos para herramientas, componentes automovilísticos, cascos de embarcaciones, teléfonos, equipajes, construcción de viviendas, electrodomésticos, recubrimientos de refrigeradores y páneles decorativos.

Los **celulósicos** tienen una amplia gama de propiedades mecánicas, según su composición. Pueden ser rígidas, fuertes y tenaces; sin embargo, su resistencia al medio ambiente es pobre y los afectan el calor y los productos químicos. Suelen aplicarse en mangos para herramientas, plumas, perillas, armazones para lentes, *goggles* de seguri-

TABLA 7.3

Recomendaciones generales para productos plásticos

Requerimiento de diseño	Aplicaciones típicas	Plásticos
Resistencia mecánica	Engranes, levas, rodillos, válvulas, aspas de ventiladores, impulsores, pistones	Acetales, nailon, fenólicos, policarbonatos, poliésteres, polipropilenos, epóxicos, polimidas
Resistencia al desgaste	Engranes, cintas y recubrimientos de desgaste, rodamientos, bujes, hojas de rodillos	Acetales, nailon, fenólicos, polimidas, poliuretano, polietileno de ultraalto peso molecular
Propiedades de fricción		
Altas	Neumáticos, superficies no deslizantes, zapato deportivo, recubrimientos para pisos	Elastómeros, hules
Bajas	Superficies deslizantes, articulaciones artificiales	Fluorocarbonos, poliésteres, polimidas
Resistencia eléctrica	Todo tipo de componentes y equipo eléctrico, electrodomésticos, monturas eléctricas	Polimetilmetacrilato, ABS, fluorocarbonos, nailon, policarbonato, poliéster, polipropilenos, ureas, fenólicos, siliconas, hules
Resistencia química	Recipientes para productos químicos, equipo de laboratorio, componentes para la industria química, recipientes para alimentos y bebidas	Acetales, ABS, epóxicas, polimetilmetacrilato, fluorocarbonos, nailon, policarbonato, poliéster, polipropileno, ureas, siliconas
Resistencia al calor	Electrodomésticos, componentes eléctricos para cocina	Fluorocarbonos, polimidas, siliconas, acetales, polisulfonas, fenólicos, epóxicos
Funcionales y decorativos	Mangos, perillas, estuches para cámaras y baterías, molduras, accesorios para tubería	ABS, acrílicos, celulósicos, fenólicos, polietilenos, polipropilenos, poliestirenos, cloruro de polivinilo
Funcionales y transparentes	Lentes, *goggles,* vidriería de seguridad, anuncios, equipo de procesamiento de alimentos, equipo para laboratorio	Acrílicos, policarbonatos, poliestirenos, polisulfonas
Carcasas y formas huecas	Herramientas eléctricas, carcasas, cascos deportivos, cajas y cubiertas para teléfonos	ABS, celulósicos, fenólicos, policarbonatos, polietilenos, polipropileno, poliestirenos

TABLA 7.4

Nombres comerciales de polímeros termoplásticos

Nombre comercial	Tipo	Nombre comercial	Tipo
Alathon	Etileno	Noryl	Óxido de polifenileno
Cycolac	Acrilonitrilo-butadieno-estireno	Nailon	Poliamida
Dacrón	Poliéster	Orlón	Acrílico
Delrin	Acetal	Plexiglás	Acrílico
Dylene	Estireno	Royalite	Acrilonitrilo-butadieno-estireno
Envex	Polimida	Sarán	Cloruro de polivinilo
Hyzod	Policarbonato	Sintra	Cloruro de polivinilo
Implex	Acrílico (modificado con hule)	Styrofoam	Poliestireno
Kapton	Polimida	Teflón	Fluorocarbono
Kevlar	Aramida	Torlon	Polimida
Kodel	Poliéster	Tygon	Cloruro de polivinilo
Kydex	Cloruro acrílico-polivinílico	Ultem	Polieterimida
Kynar	Fluoruro de polivinilideno	Vespel	Polimida
Lexan	Policarbonato	Zerlon	Metilmetacrilato de estireno
Lucite	Acrílico	Zytel	Poliamida
Mylar	Poliéster		

dad, guardas para máquinas, cascos, tubos y tubería, soportes para alumbrado, contenedores rígidos, volantes para automóviles, película para empaque, anuncios, bolas de billar, juguetes y piezas decorativas.

Los **fluorocarbonos** poseen buena resistencia a la temperatura elevada (por ejemplo, el punto de fusión del teflón es superior a 327 °C (621 °F), a los productos químicos, al medio ambiente y a la electricidad. También tienen propiedades únicas no adhesivas y baja fricción. Se aplican en recubrimientos para equipo de procesamiento químico, recubrimientos antiadherentes para utensilios de cocina, aislamiento eléctrico para alambres y cables de alta temperatura, juntas, superficies de baja presión, rodamientos y sellos.

Las **poliamidas** (de las palabras *poli*, *amina* y *ácido carboxílico*) están disponibles en dos tipos principales: *nailons* y *aramidas*.

- Los **nailons** (una palabra acuñada) tienen buenas propiedades mecánicas y resistencia a la abrasión. Son autolubricantes y resistentes a la mayoría de los productos químicos. Son *higroscópicos* (absorben agua); la absorción de humedad reduce las propiedades mecánicas deseables y aumenta las dimensiones de las partes. Se aplican en engranes, rodamientos, bujes, rodillos, sujetadores, cierres, partes eléctricas, peines, tubería, superficies resistentes al desgaste, guías y material quirúrgico.
- Las **aramidas** (poliamidas aromáticas) tienen muy alta resistencia a la tensión y rigidez. Suelen aplicarse en fibras para plásticos reforzados, chalecos a prueba de balas, cables y llantas radiales.

Los **policarbonatos** son versátiles. Tienen buenas propiedades mecánicas y eléctricas, alta resistencia al impacto y se pueden hacer resistentes a los productos químicos. Se aplican en cascos de seguridad, lentes, vidriería para ventanas a prueba de balas, anuncios, botellas, equipo de procesamiento de alimentos, parabrisas, componentes eléctricos de soporte de carga, aislantes eléctricos, aparatos médicos, componentes de máquinas para negocios, guardas para maquinaria y partes que requieren estabilidad dimensional.

Los **poliésteres** (poliésteres termoplásticos; ver también la sección 7.7) tienen buenas propiedades mecánicas, eléctricas y químicas; buena resistencia a la abrasión y baja fricción. Suelen aplicarse en engranes, levas, rodillos, miembros de soporte de carga, bombas y componentes electromecánicos.

Los **polietilenos** poseen buenas propiedades eléctricas y químicas; sus propiedades mecánicas dependen de la composición y estructura. Las tres clases importantes de polietilenos son: (1) de *baja densidad* (LDPE, por sus siglas en inglés), (2) de *alta densidad* (HDPE), y (3) *de peso molecular ultraelevado* (UHMWPE). El LDPE y el HDPE se aplican en el hogar, botellas, botes de basura, ductos, defensas para automóviles, equipaje, juguetes, tubos y materiales de empaque. El UHMWPE se utiliza en partes que requieren tenacidad elevada al impacto y resistencia al desgaste abrasivo; por ejemplo, en articulaciones artificiales para rodillas y caderas.

Las **polimidas** tienen la estructura de un termoplástico, pero las características de no fusión de los termofijos (ver también la sección 7.7).

Los **polipropilenos** tienen buenas propiedades mecánicas, eléctricas y químicas, y gran resistencia a las rasgaduras. Se aplican en vestiduras y componentes automovilísticos, aparatos médicos, partes de electrodomésticos, aislamiento de alambres, muebles de televisión, tuberías, accesorios, tazas, recipientes para productos lácteos y jugos, equipaje, cuerdas y cierres herméticos.

Los **poliestirenos** generalmente tienen propiedades promedio y son frágiles pero económicos. Suelen aplicarse en contenedores desechables, empaques, charolas para carnes, galletas y dulces, aislantes para espumas, electrodomésticos, componentes automovilísticos y de radio y televisión, artículos domésticos y partes para juguetes y muebles (como sustituto de madera).

Las **polisulfonas** tienen excelente resistencia al calor, agua y vapor; poseen propiedades dieléctricas que la humedad virtualmente no afecta y son muy resistentes a algunos productos químicos, pero los solventes orgánicos los atacan. Se aplican en planchas de

vapor, cafeteras, contenedores para agua caliente, equipo médico que requiere esterilización, herramientas eléctricas portátiles, electrodomésticos, interiores de cabinas para aviones y aislantes eléctricos.

El **cloruro de polivinilo** (PVC) tiene una amplia variedad de propiedades, es económico y resistente al agua, y se puede hacer rígido o flexible. No es adecuado para aplicaciones que requieren resistencia mecánica y resistencia al calor. El PVC *rígido* es tenaz y duro; se utiliza en anuncios y en la industria de la construcción (por ejemplo, en tubos y *conduits*). El PVC *flexible* se usa en recubrimientos de alambres y cables, tubos y mangueras flexibles de baja presión, zapatos, imitación de piel, tapicería, discos fonográficos, empaques, sellos, molduras automotrices, películas, láminas y recubrimientos.

7.7 Propiedades generales y aplicaciones de los plásticos termofijos

En esta sección se describen las características generales y las aplicaciones típicas de los principales plásticos termofijos.

Los **alquidos** (de *alquil*, que significa "alcohol", y *ácido*) poseen buenas propiedades de aislamiento eléctrico, resistencia al impacto, estabilidad dimensional y tienen una baja absorción de agua. Suelen aplicarse en componentes eléctricos y electrónicos.

Los **aminos** (**urea** y **melamina**) tienen propiedades que dependen de la composición; en general son duros, rígidos y resistentes a la abrasión, a la termofluencia y al arco eléctrico. Se aplican en cajas de electrodomésticos pequeños, contratapas, asientos para sanitarios, manijas y tapas de distribuidores. La **urea** se utiliza típicamente en componentes eléctricos y electrónicos, y la **melamina** en vajillas.

Los **epóxicos** tienen excelentes propiedades mecánicas y eléctricas, buena estabilidad dimensional, fuertes propiedades adhesivas y buena resistencia al calor y a los productos químicos. Suelen aplicarse en componentes eléctricos que requieren resistencia mecánica y aislamiento elevado, herramentales, matrices y adhesivos. Los **epóxicos reforzados con fibras** tienen excelentes propiedades mecánicas y se utilizan en recipientes a presión, carcasas de motores para cohetes, tanques y componentes estructurales similares.

Los **fenoles** son rígidos (aunque frágiles), dimensionalmente estables y tienen alta resistencia al calor, al agua, a la electricidad y a los productos químicos. Se aplican en perillas, manijas, tableros laminados, teléfonos, material aglutinante para unir los granos en las ruedas abrasivas y en componentes eléctricos (como dispositivos de cableado, conectores y aislantes).

Los **poliésteres** (poliésteres termofijos; ver también sección 7.6) tienen buenas propiedades mecánicas, químicas y eléctricas. En general se refuerzan con fibra de vidrio (u otras) y están disponibles además como resinas para fundición. Suelen aplicarse en botes, equipajes, sillas, carrocerías automotrices, piscinas y materiales para impregnar tela y papel.

Las **polimidas** poseen buenas propiedades mecánicas, físicas y eléctricas a temperaturas elevadas; también tienen buena resistencia a la termofluencia y características de baja fricción y bajo desgaste. Cuentan con las características de los termofijos, que no se funden, pero su estructura es como la de un termoplástico. Se aplican en componentes para bombas (cojinetes, sellos, asientos de válvulas, anillos de retén y anillos para pistones), conectores eléctricos para usarse en alta temperatura, partes aeroespaciales, estructuras de alta resistencia al impacto, equipo para deportes y chalecos de seguridad.

Las **siliconas** tienen propiedades que dependen de la composición. Por lo general, resisten bien el medio ambiente, poseen excelentes propiedades eléctricas en una amplia gama de humedad y temperatura y resisten a los productos químicos y al calor (ver también la sección 7.9). Suelen aplicarse en componentes eléctricos que requieren resistencia a temperaturas elevadas, juntas para hornos, sellos para calor y materiales impermeables.

EJEMPLO 7.3 Materiales para recubrimiento de puertas de refrigerador

En la selección de materiales para recubrimiento de puertas de refrigerador (donde se almacenan huevos, mantequilla, aderezos para ensaladas y botellas pequeñas) deben considerarse los siguientes factores:

1. *Requisitos mecánicos*: resistencia, tenacidad (para soportar el impacto, el azote de la puerta, la distorsión), rigidez, resiliencia, resistencia al rayado y al desgaste a temperaturas de operación.
2. *Requisitos físicos*: estabilidad dimensional y aislamiento eléctrico.
3. *Requisitos químicos*: resistencia al manchado, olor, reacciones químicas con alimentos y bebidas, y con líquidos de limpieza.
4. *Apariencia*: color, estabilidad del color, acabado superficial, textura y tacto.
5. *Propiedades de manufactura*: métodos de manufactura y ensamble, efectos del procesamiento en las propiedades materiales y comportamiento por cierto periodo, compatibilidad con otros componentes de la puerta, costo de los materiales y manufactura.

Un extenso estudio consideró todos estos factores e identificó dos materiales candidatos para recubrimientos de puertas: ABS (acrilonitrilo-butadieno-estireno) y HIPS (poliestireno de alto impacto). Un aspecto del estudio comprendió el efecto de los aceites vegetales, como el del aderezo para ensaladas almacenado en los anaqueles de la puerta, sobre la resistencia de estos plásticos. Los experimentos mostraron que los aceites reducían significativamente la capacidad de soporte de carga del HIPS. Se encontró que éste se vuelve frágil en presencia de aceites (agrietamiento por solvente-esfuerzo), mientras que al ABS no le afecta de manera importante.

7.8 Plásticos biodegradables

Los desperdicios plásticos constituyen cerca de 10% del peso de los desperdicios sólidos municipales y, con base en el volumen, contribuyen con entre dos y tres veces su peso. Sólo un tercio de la producción de plástico se dirige a los productos desechables, como botellas, empaques y bolsas para basura. Con el uso creciente de los plásticos y la gran preocupación ambiental respecto de la disposición de dichos productos y la escasez de rellenos sanitarios, se encuentran en proceso esfuerzos importantes para desarrollar plásticos totalmente biodegradables. Los primeros intentos se hicieron en la década de 1980 como una posible solución a la basura de las carreteras.

La mayoría de los productos plásticos se fabrican a partir de polímeros sintéticos que se derivan de recursos naturales no renovables, no son biodegradables y es difícil reciclarlos. La **biodegradabilidad** significa que las especies microbianas en el medio ambiente (por ejemplo, los microorganismos en el suelo y el agua) degradan una porción (o incluso la totalidad) del material polimérico, en las condiciones ambientales apropiadas y sin producir residuos tóxicos. Los productos finales de la degradación de la porción degradable del material son bióxido de carbono y agua. Debido a la variedad de constituyentes de los plásticos biodegradables, éstos pueden considerarse materiales compuestos. En consecuencia, sólo una parte de ellos puede ser realmente biodegradable.

Hasta el momento se han desarrollado tres *plásticos biodegradables*. Tienen diferentes características de degradabilidad y se degradan a lo largo de distintos periodos (desde unos cuantos meses hasta unos cuantos años).

1. El **sistema basado en almidones** es el que ha llegado más lejos en términos de capacidad de producción. El almidón se puede extraer de papas, trigo, arroz y maíz. Los gránulos de almidón se procesan y se convierten en polvo, que después se calienta hasta transformarse en un líquido pegajoso. Cuando se enfría, se le da la for-

ma de gránulos (*pellets* o partículas) y se procesa en equipos convencionales de procesamiento de plásticos. Diversos aditivos y aglutinantes se mezclan con el almidón para proporcionar características especiales a los materiales bioplásticos. Por ejemplo, un compósito de polietileno y almidón se produce comercialmente como bolsas degradables de basura.

2. En el **sistema con base láctea**, se produce ácido láctico mediante la fermentación de materias primas, que después se polimerizan para formar una resina poliéster. Los usos típicos incluyen aplicaciones médicas y farmacéuticas.
3. En la **fermentación de azúcar** (el tercer sistema), se agregan ácidos orgánicos a una alimentación de azúcar. Con el uso de un proceso especialmente desarrollado, la reacción resultante produce un polímero muy cristalino y rígido que (después de procesamiento adicional) se comporta de modo similar a los polímeros desarrollados a partir de petróleo.

Continúan realizándose numerosos intentos para producir plásticos totalmente biodegradables por medio de diversos desperdicios agrícolas (*agrodesperdicios*), carbohidratos de plantas, proteínas de plantas y aceites vegetales. Las aplicaciones típicas incluyen las siguientes:

- Utensilios de mesa desechables fabricados con un sustituto de cereal, como granos de arroz o harina de trigo.
- Plásticos fabricados casi completamente con almidón extraído de papas, trigo, arroz y maíz.
- Artículos de plástico fabricados a partir de granos de café y cáscaras de arroz que se deshidratan y moldean a alta presión y temperatura.
- Polímeros solubles en agua y que se pueden convertir en composta para aplicaciones médicas y quirúrgicas.
- Contenedores para alimentos y bebidas (fabricados con almidón de papa, piedra caliza, celulosa y agua), que se pueden disolver en las coladeras del drenaje y en los océanos sin afectar la vida marina ni la vida silvestre.

Aún no se ha evaluado totalmente el comportamiento de largo alcance de los plásticos biodegradables (tanto en su vida útil como en los tiraderos). También existe la preocupación de que el énfasis en la biodegradabilidad desvíe la atención respecto de la *reciclabilidad* de los plásticos y los esfuerzos para la *conservación* de los materiales y la energía. Hay que tomar en cuenta que el costo de los polímeros biodegradables actuales es sustancialmente más elevado que el de los polímeros sintéticos. En consecuencia, una mezcla de desperdicio agrícola —como cascarilla de maíz, trigo, arroz y soya (como componente principal)— y de polímeros biodegradables (como componente menor) es una opción atractiva.

Reciclado de plásticos. Se continúan haciendo muchos esfuerzos globalmente en la recolección y el reciclado de productos plásticos usados. Los termoplásticos se reciclan refundiéndolos y reformándolos como otros productos, que portan *símbolos de reciclado* en la forma de un triángulo delimitado por tres flechas en el sentido de las manecillas del reloj y con un número en la parte media. Estos números corresponden a los siguientes plásticos:

1—PETE (polietileno)
2—HDPE (polietileno de alta densidad)
3—V (vinil)
4—LDPE (polietileno de baja densidad)
5—PP (polipropileno)
6—PS (poliestireno)
7—Otros

Se están usando de manera creciente plásticos reciclados para varios productos. Por ejemplo, un poliéster reciclado (relleno con fibras de vidrio y minerales) se utiliza para la

cubierta del motor de una camioneta de reparto (*pick up*) Ford de la serie F, ya que tiene la rigidez apropiada, resistencia química y retención de la forma hasta 180 °C (350 °F).

7.9 Elastómeros (hules)

Los elastómeros consisten en una gran familia de polímeros amorfos que tienen una baja temperatura de transición vítrea. Es típica su capacidad para sufrir grandes deformaciones elásticas sin romperse; igualmente, son suaves y tienen módulos elásticos bajos. El término **elastómero** se deriva de las palabras *elástico* y *mero*.

La estructura de los elastómeros es muy rugosa (torcida o rizada apretadamente). Se estiran, pero después regresan a su forma original tras retirar la carga (fig. 7.14). También se pueden enlazar de manera transversal, siendo el mejor ejemplo de ello la **vulcanización** del hule con azufre a temperatura elevada, descubierta por Charles Goodyear en 1839 y llamada así en honor de Vulcano, el dios romano del fuego. Una vez que el elastómero se enlaza transversalmente, ya no se le puede dar otra forma (por ejemplo, un neumático para automóvil, que es una molécula gigante, no se puede reblandecer y darle nueva forma).

Con frecuencia, los términos *elastómero* y *hule* se utilizan de modo indistinto. En general, un **elastómero** es capaz de recuperar sustancialmente su forma y tamaño después de retirar la carga. Un **hule** es capaz de recuperarse con rapidez de grandes deformaciones.

La dureza de los elastómeros, que se mide con un durómetro (sección 2.6), aumenta con el enlace cruzado de las cadenas moleculares. Al igual que con los plásticos, se puede mezclar una variedad de aditivos en los elastómeros para proporcionarles propiedades específicas. Los elastómeros tienen una amplia gama de aplicaciones en superficies con fricción elevada y antideslizantes, protección contra la corrosión y la abrasión, aislamiento eléctrico y contra el impacto y la vibración. Los ejemplos incluyen neumáticos, mangueras, cubiertas contra el medio ambiente, calzado deportivo, recubrimientos, empaquetaduras, sellos, rodillos de impresión y recubrimiento de pisos.

Una propiedad de los elastómeros es su *pérdida de histéresis* en el alargamiento y la compresión (fig. 7.14). El ciclo en el sentido de las manecillas del reloj indica pérdida de energía, en tanto que la energía mecánica se convierte en calor. Esta propiedad es deseable para absorber energía vibratoria (amortiguamiento) y sonido.

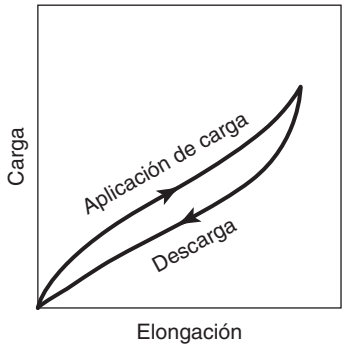


FIGURA 7.14 Curva típica carga-elongación para hules. El ciclo en el sentido de las manecillas del reloj, que indica las trayectorias de aplicación de carga y descarga, muestra la pérdida por histéresis. Ésta da a los hules la capacidad de disipar energía, amortiguar la vibración y absorber cargas de impacto, lo que es necesario en los neumáticos automovilísticos y en los amortiguadores de vibración colocados bajo la maquinaria.

Hule natural. La base del hule natural es el **látex**, una savia parecida a la leche que se obtiene de la corteza interior de un árbol tropical. El hule natural tiene buena resistencia a la abrasión y a la fatiga y altas propiedades de fricción, pero baja resistencia al aceite, al calor, al ozono y a la luz del Sol. Se aplica en neumáticos, sellos, tacones de zapatos, acoplamientos y monturas para motores.

Hules sintéticos. Ejemplos de hules sintéticos son el butilo, el estireno butadieno, el polibutadieno y el etileno propileno. Comparados con el hule natural, tienen mejor resistencia al calor, a la gasolina y a los productos químicos y poseen una gama mayor de temperaturas útiles. Los hules sintéticos resistentes al aceite son el neopreno, nitrilo, uretano y silicón. Suelen aplicarse en los neumáticos, absorbedores de impacto, sellos y bandas.

Siliconas. Las siliconas (ver también la sección 7.7) tienen la variedad más alta de temperaturas útiles de los elastómeros (hasta 315 °C; 600 °F), pero otras propiedades (como la resistencia mecánica y la resistencia al desgaste y a los aceites) generalmente son inferiores a las de los demás elastómeros. Se aplican en sellos, empaques, aislamiento térmico, interruptores eléctricos de alta temperatura y aparatos electrónicos.

Poliuretano. Este elastómero tiene muy buenas propiedades generales de alta resistencia, rigidez, dureza, resistencia excepcional a la abrasión, al corte y al desgarre. Suele aplicarse en sellos, empaques, amortiguamiento, diafragmas para el formado con hule de láminas metálicas (sección 16.8) y partes de carrocerías automotrices.

RESUMEN

- Los polímeros son una clase importante de materiales y poseen una muy amplia variedad de propiedades mecánicas, físicas, químicas y ópticas. Si se comparan con los metales, los polímeros se caracterizan en general por una menor densidad, resistencia, módulo elástico, conductividad térmica y eléctrica y costo, así como por una mayor relación de resistencia a peso, mayor resistencia a la corrosión, mayor expansión térmica, una más amplia opción de colores y transparencias, y una mayor facilidad de manufactura en formas complejas.
- Los plásticos se componen de moléculas de polímeros y diversos aditivos. A la unidad repetitiva más pequeña en una cadena de polímeros se le llama mero. Los monómeros se unen mediante procesos de polimerización (condensación y adición) para formar moléculas más grandes. La temperatura de transición vítrea separa la región de comportamiento frágil en los polímeros de la de comportamiento dúctil.
- Las propiedades de los polímeros dependen del peso molecular, la estructura (lineal, ramificada, de enlace cruzado o de red), los grados de polimerización y cristalinidad y de los aditivos. Éstos tienen funciones como mejorar la resistencia, retardar la flama, lubricar y aportar flexibilidad y color, además de proporcionar estabilidad contra la radiación ultravioleta y el oxígeno. Las estructuras de los polímeros se pueden modificar por varios medios para proporcionar una amplia gama de propiedades deseables a los plásticos.
- Dos clases importantes de polímeros son los termoplásticos y los termofijos. Los termoplásticos se vuelven suaves y es fácil darles forma a temperaturas elevadas; cuando se enfrían, regresan a sus propiedades originales. Su comportamiento mecánico se puede caracterizar mediante diversos modelos de resorte y amortiguador. Su comportamiento incluye fenómenos como la termofluencia y la relajación de esfuerzos, cuarteaduras y absorción de agua. Los termofijos, que se obtienen uniendo transversalmente cadenas de polímeros, no se suavizan de manera significativa al aumentar la temperatura. Son más rígidos y duros que los termoplásticos y ofrecen menos opciones de colores.

- Los elastómeros tienen la capacidad de sufrir grandes deformaciones elásticas y regresar a sus formas originales cuando se retira la carga. En consecuencia, poseen aplicaciones importantes en neumáticos, sellos, calzado deportivo, mangueras, bandas y absorbedores de impacto.
- Entre los factores que deben tomarse en cuenta en los polímeros se encuentran su capacidad para ser reciclados y los plásticos biodegradables, algunas de cuyas formulaciones se están desarrollando continuamente.

TÉRMINOS CLAVE

Aditivos
Biodegradabilidad
Colorantes
Cristalitas
Cuarteaduras
Curado
Degradación
Dopado
Elastómero
Emblanquecimiento por esfuerzo
Enlace
Enlaces primarios
Enlaces secundarios
Envejecimiento térmico
Grado de cristalinidad
Grado de polimerización
Hule
Látex
Lubricantes
Mero
Monómero
Orientación
Peso molecular
Plásticos
Plastificantes
Polimerización
Polímeros
Polímeros de enlace cruzado
Polímeros en red
Polímeros lineales
Polímeros ramificados
Rellenos
Retardantes a la flama
Siliconas
Temperatura de transición vítrea
Termofijos
Termoplásticos
Vulcanización

BIBLIOGRAFÍA

Berins, M. L., *Plastics Engineering Handbook,* 5a. ed., Chapman & Hall, 1995.

Bhowmick, A. K., y Stephens, H. L., *Rubber Products Manufacturing Technology*, Marcel Dekker, 1994.

Buckley, C. P., Bucknall, C. B., y McCrum, N. G., *Principles of Polymer Engineering*, 2a. ed., Oxford University Press, 1997.

Campbell, P., *Plastics Components Design*, Industrial Press, 1996.

Chanda, M. y Roy, S. K., *Plastics Technology Handbook*, 3a. ed., Marcel Dekker, 1998.

Characterization and Failure Analysis of Plastics, ASM International, 2003.

Charrier, J.-M., *Polymeric Materials and Processing: Plastics, Elastomers, and Composites,* Hanser, 1991.

Engineered Materials Handbook, Vol. 2: *Engineering Plastics*, ASM International, 1998.

Engineering Plastics and Composites, 2a. ed., ASM International, 1993.

Fatigue and Tribological Properties of Plastics and Elastomers, William Andrew Inc., 1995.

Feldman, D. y Barbalata A., *Synthetic Polymers: Technology, Properties, Applications*, Chapman & Hall, 1996.

Griskey, R. G., *Polymer Process Engineering*, Chapman & Hall, 1995.

Harper, C., *Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites,* 3a. ed., McGraw-Hill, 1996.

Harper, C. A., *Modern Plastics Handbook*, McGraw-Hill, 2000.

MacDermott, C. P. y Shenoy, A. V., *Selecting Thermoplastics for Engineering Applications*, 2a. ed., Marcel Dekker, 1997.

Modern Plastics Encyclopedia, McGraw-Hill, publicada anualmente.

Mustafa, N., *Plastics Waste Management: Disposal, Recycling, and Reuse,* Marcel Dekker, 1993.

Nielsen, L. E. y Landel, R. F., *Mechanical Properties of Polymers and Composites*, 2a. ed., Marcel Dekker, 1994.

Rudin, A., *Elements of Polymer Science and Engineering*, 2a. ed., Academic Press, 1999.

Salamone, J. C. (ed.), *Concise Polymeric Materials Encyclopedia*, CRC Press, 1999.

Sperling, L. H., *Polymeric Multicomponent Materials: An Introduction, Wiley*, 1997.

Strong, A. B., *Plastics: Materials and Processing*, 2a. ed., Prentice Hall, 1999.

Ulrich, H., *Introduction to Industrial Polymers*, Hanser, 1994.

Young, R. J. y Lovell, P., *Introduction to Polymers*, Chapman & Hall, 1991.

PREGUNTAS DE REPASO

7.1 Resuma las propiedades mecánicas y físicas importantes de los plásticos.

7.2 ¿Cuáles son las principales diferencias entre *(a)* las propiedades mecánicas, y *(b)* las propiedades físicas de los plásticos y de los metales?

7.3 ¿Qué son *(a)* la polimerización y *(b)* el grado de polimerización? ¿A qué propiedades afecta el grado de polimerización?

7.4 ¿Cuál es la diferencia entre polimerización por condensación y polimerización por adición?

7.5 ¿Cuáles son las diferencias entre polímeros lineales, ramificados y de enlace cruzado?

7.6 ¿Por qué querríamos sintetizar un polímero con un alto grado de cristalinidad?

7.7 ¿Qué es la temperatura de transición vítrea?

7.8 ¿Qué aditivos se utilizan en los plásticos? ¿Por qué?

7.9 ¿Qué son las cuarteaduras?

7.10 ¿Qué son las polimezclas?

7.11 ¿Cuáles son las diferencias entre termoplásticos y termofijos?

7.12 ¿Qué es un elastómero?

7.13 ¿Qué es un terpolímero?

7.14 ¿Qué efectos tiene un agente plastificante en un polímero?

7.15 Defina las siguientes siglas en inglés: PMMA, PVC, ABS, HDPE, LDPE.

7.16 Describa cómo funciona una batería recargable de litio.

PROBLEMAS CUALITATIVOS

7.17 Revise diversos componentes plásticos en su automóvil y establezca si están hechos de materiales termoplásticos o de materiales termofijos.

7.18 Dé aplicaciones en las cuales la inflamabilidad de los plásticos sería muy importante.

7.19 ¿Qué características hacen que los polímeros tengan ventajas en aplicaciones como engranes? ¿Qué características son desventajas en tales aplicaciones?

7.20 ¿Qué propiedades tienen los elastómeros que en general no tienen los termoplásticos?

7.21 ¿Piensa que la sustitución de metales por plásticos (en los productos tradicionalmente fabricados con metal) es vista en forma negativa por el gran público? De ser así, ¿por qué?

7.22 Nombre tres plásticos que son adecuados para usarse a temperaturas elevadas.

7.23 ¿Es posible que un material tenga un comportamiento de histéresis opuesto al mostrado en la figura 7.14, de manera que las flechas vayan en sentido contrario al de las manecillas del reloj? Explique su respuesta.

7.24 Observe el comportamiento del espécimen mostrado en la figura 7.13 y establezca si el material tiene un alto o bajo exponente m de sensibilidad a la velocidad de deformación. (Ver sección 2.2.7.) Explique por qué sucede.

7.25 Agregue otras aplicaciones en la columna correspondiente de la tabla 7.3.

7.26 Discuta la importancia de la temperatura de transición vítrea (T_g) en aplicaciones de ingeniería.

7.27 ¿Por qué el enlace cruzado mejora la resistencia de los polímeros?

7.28 Describa los métodos por los que se pueden alterar las propiedades ópticas de los polímeros.

7.29 ¿Se pueden hacer polímeros para conducir electricidad? ¿Cómo?

7.30 Explique las razones por las que se desarrollaron los elastómeros. ¿Existe algún sustituto para ellos?

7.31 Dé varios ejemplos de productos plásticos, o de componentes, en los que deben tomarse en cuenta la termofluencia y la relajación de esfuerzos.

7.32 Describa sus opiniones respecto del reciclado de plásticos contra el desarrollo de plásticos que sean biodegradables.

7.33 Explique cómo haría para determinar la dureza de los plásticos.

7.34 Compare los valores del módulo elástico de la tabla 7.1 con los valores para los metales dados en los capítulos 2, 5 y 6.

7.35 ¿Por qué existe tanta variación en la rigidez de los polímeros?

7.36 Explique por qué es más fácil reciclar los termoplásticos que los termofijos.

7.37 Dé un ejemplo de un proceso en el que sea deseable la cuarteadura.

7.38 Describa cómo funciona la envoltura por contracción.

7.39 Haga una lista y explique algunas ventajas y desventajas ambientales de utilizar bolsas de compras de plástico en lugar de bolsas de papel.

7.40 Haga una lista de las características requeridas en un polímero para: *(a)* un inserto de reemplazo total de cadera, *(b)* una pelota de golf, *(c)* un tablero de automóvil, *(d)* ropa, *(e)* piso laminado y *(f)* redes de pesca.

7.41 ¿Cómo puede distinguir si una parte está fabricada con un termoplástico?

7.42 Como sabe, existen sujetadores (*clips*) de plástico para papel de varios colores. ¿Por qué no existen grapas de plástico?

7.43 Si se incorporan pequeñas cantidades de un agente de soplado, es posible fabricar fibras huecas de polímeros con núcleos de gas. Haga una lista de las aplicaciones para dichas fibras.

7.44 En las operaciones de moldeo por inyección, es una práctica común retirar la parte de canal de alimentación para colocarlo en una trituradora y reciclar las partículas resultantes. Haga una lista de lo que le preocuparía al utilizar dichas partículas recicladas en lugar de las partículas "vírgenes".

7.45 Con base en el tema de este capítulo, describa cómo es similar el ADN humano a un terpolímero.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

7.46 Calcule las áreas bajo la curva esfuerzo-deformación (tenacidad) para los materiales de la figura 7.11, grafíquelas en función de la temperatura y describa sus observaciones.

7.47 Observe en la figura 7.11 que, como se esperaba, el módulo elástico del polímero disminuye al aumentar la temperatura. Utilizando las curvas esfuerzo-deformación de la figura, haga una gráfica del módulo de elasticidad contra la temperatura. Comente la forma de la curva.

7.48 Una viga rectangular en voladizo de 120 mm de alto, 20 mm de ancho y 1.5 m de largo se somete a una carga concentrada de 100 kg en su extremo. De la tabla 7.1, seleccione tres materiales sin refuerzo y tres materiales reforzados y calcule la deflexión máxima de la viga en cada caso. Después seleccione aluminio y acero para las mismas dimensiones de la viga, calcule la deflexión máxima y compare los resultados.

7.49 Determine las dimensiones de una flecha de transmisión de acero tubular para un automóvil típico. Si ahora reemplaza esta flecha con un plástico sin refuerzo, y después con un plástico reforzado, ¿cuáles deberían ser las nuevas dimensiones en cada caso para transmitir el mismo torque? Elija materiales de la tabla 7.1 y suponga una relación de Poisson de 0.4.

7.50 Estime el número de moléculas en una llanta de automóvil. Estime el número de átomos.

7.51 Utilizando datos de resistencia y densidad, determine el peso mínimo de un miembro a tensión de 2 pies de largo que debe soportar una carga de 1000 libras, si se fabrica con *(a)* polietileno de alto peso molecular, *(b)* poliéster, *(c)* cloruro de polivinilo rígido, *(d)* ABS, *(e)* poliestireno, y *(f)* nailon reforzado. En donde sea apropiado, calcule un intervalo de pesos para el mismo polímero.

7.52 Grafique lo siguiente para cualesquiera cinco polímeros descritos en este capítulo: *(a)* UTS contra densidad, y *(b)* módulo elástico contra UTS. En donde sea apropiado, grafique un intervalo de valores.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

7.53 Describa las consideraciones de diseño implícitas en el reemplazo de un contenedor metálico para bebidas por uno fabricado de plástico.

7.54 Suponga que está fabricando un producto en el que todos los engranes son metálicos. Lo visita un vendedor y le pide que considere reemplazar algunos de estos engranes metálicos con otros plásticos. Haga una lista de las preguntas que haría antes de tomar una decisión.

7.55 En las secciones 7.6 y 7.7 se listan varios plásticos y sus aplicaciones. Reacomode esta información haciendo una tabla de productos (engranes, cascos, equipaje, partes eléctricas, etc.) que muestre los tipos de plástico que pueden utilizarse para fabricar estos productos.

7.56 Haga una lista de productos o partes que no estén fabricados con plásticos y ofrezca algunas razones por las que se hicieron así. Dé soporte a sus razones.

7.57 Revise las tres curvas de la figura 7.10 y dé aplicaciones para cada tipo de comportamiento. Explique sus elecciones.

7.58 Repita el problema 7.50 para las curvas de la figura 7.12.

7.59 Con el propósito de utilizar un contenedor de acero o de aluminio para una sustancia ácida, como salsa de tomate, debe colocarse una barrera polimérica entre el contenedor y su contenido. Describa métodos para producir dicha barrera.

7.60 Realice un estudio de los plásticos utilizados en algunos productos. Mida su dureza y rigidez. (Por ejemplo, los juguetes masticables para perros usan plásticos con una gama de propiedades).

7.61 Agregue una columna a la tabla 7.1 que describa la apariencia de estos plásticos; incluya colores disponibles y opacidad.

7.62 Investigue en la bibliografía y describa las propiedades y aplicaciones de la poliariletercetona (PAEK).

7.63 Con la tabla 7.3 como guía, revise varios productos en su cocina y en su automóvil y describa los tipos de plásticos que podría haber usado para fabricar sus componentes individuales.

CAPÍTULO

8

Cerámicos, grafito y diamante: estructura, propiedades generales y aplicaciones



Existen diversas aplicaciones en ingeniería en las que el uso de metales o polímeros no es apropiado; los cerámicos, el diamante y el grafito son algunos de los materiales con propiedades únicas. En este capítulo se describen:

- Cerámicos: su estructura y propiedades.
- Tipos de cerámicos y sus aplicaciones típicas.
- Vidrios: su estructura, propiedades y aplicaciones.
- Diamante: sus propiedades y aplicaciones en maquinado abrasivo y micromaquinado.
- Grafito: sus usos como material para moldes y como fibras en plásticos reforzados.

8.1 Introducción 219
8.2 Estructura de los cerámicos 220
8.3 Propiedades generales y aplicaciones de los cerámicos 224
8.4 Vidrios 229
8.5 Cerámicos vidriados 231
8.6 Grafito 232
8.7 Diamante 233

EJEMPLOS:

8.1 Cuchillos de cerámico 222
8.2 Cañones de cerámico para armas de fuego 228
8.3 Rodamientos de cerámico de bolas y rodillos 228

8.1 Introducción

Los diversos tipos de materiales descritos en los capítulos anteriores no son adecuados para ciertas aplicaciones de ingeniería. Por ejemplo:

a. Un aislante eléctrico que se utilice a altas temperaturas.
b. Una loseta que resista derrames, raspaduras y abrasión.
c. Un recipiente de cocina transparente.
d. Rodamientos pequeños de bolas que sean ligeros, rígidos, duros y que resistan altas temperaturas.
e. El orbitador de un transbordador espacial, hecho de aluminio, cuando la temperatura de su capa exterior alcance 1450 °C (2650 °F) al despegar y entrar nuevamente en la atmósfera.

Con base en estos ejemplos, pareciera que las propiedades requeridas son resistencia a altas temperaturas, dureza, que sean químicamente inertes a sustancias químicas, a alimentos y al medio ambiente; resistencia al desgaste y a la corrosión y baja conductividad térmica y eléctrica.

En este capítulo se describen las características generales y las aplicaciones de los cerámicos, los vidrios y las cerámicas vidriadas que son importantes en las aplicaciones

de ingeniería y en la manufactura. Debido a sus características únicas, en este capítulo se tratan las propiedades y usos de dos formas de carbono, principalmente grafito y diamante. En el capítulo 18 se describe la manufactura de componentes de cerámico y vidrio y diversas operaciones de moldeado y terminado. En el capítulo 9 se describen los compósitos, que son un grupo fundamental de materiales.

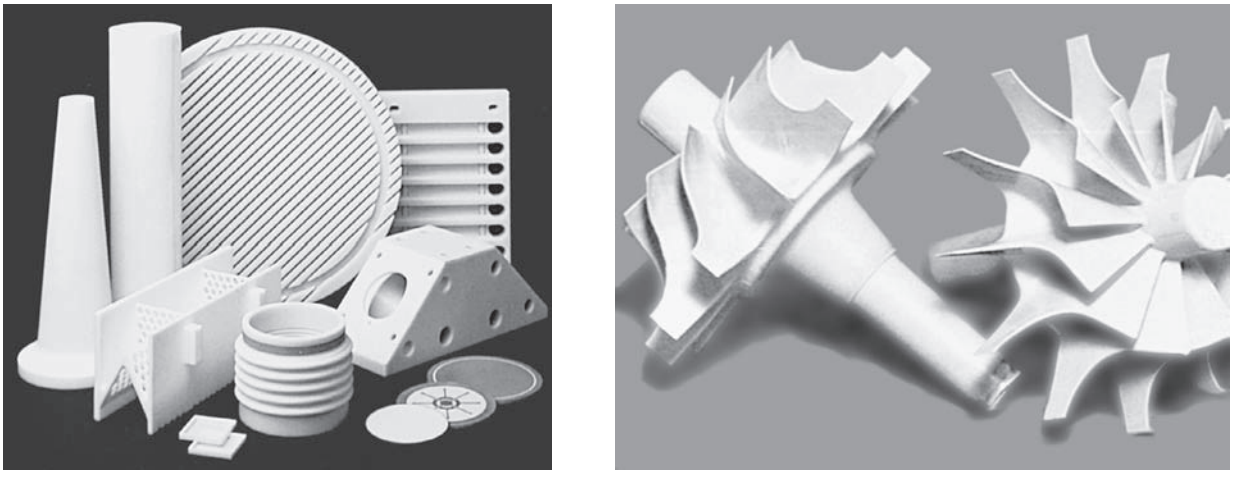
8.2 Estructura de los cerámicos

Los **cerámicos** son compuestos de elementos metálicos y no metálicos. El término *cerámicos* (de los vocablos griegos *keramos*, que significa "arcilla", y *keramikos*, que significa "productos de arcilla") se refiere tanto al material como al producto de cerámico. Debido al extenso número de posibles combinaciones de elementos, existe una gran variedad de cerámicos para una amplia gama de aplicaciones para consumidores e industriales. El uso más antiguo de los cerámicos, en alfarería y ladrillos, ocurrió antes del año 4000 a.C. Durante mucho tiempo se han utilizado cerámicos en bujías para autos, como aislante eléctrico y por su resistencia a altas temperaturas. Cada vez son más importantes en materiales de herramentales y matrices, motores térmicos y componentes automotores (como revestimientos de escapes, pistones revestidos y revestimientos de cilindros).

Los cerámicos se pueden dividir en dos categorías generales:

1. **Cerámicos tradicionales:** objetos de cerámica blanca, losetas, ladrillos, tubos de drenaje, utensilios de cocina y discos abrasivos.
2. **Cerámicos industriales** (también conocidos como **cerámicos de ingeniería, alta tecnología** o **finos**): componentes de turbinas, automotores y aeroespaciales (fig. 8.1); intercambiadores de calor, semiconductores, sellos, prótesis y herramientas de corte.

La estructura de los cristales de cerámico (que contienen varios átomos de diferentes dimensiones) es una de las más complejas de todas las estructuras de materiales. Por lo general, el enlace entre estos átomos es **covalente** (al compartir electrones, los enlaces son fuertes) o **iónico** (enlace primario entre iones cargados en forma opuesta, por lo que los enlaces son fuertes). Estos enlaces son mucho más fuertes que los metálicos. Por consiguiente, propiedades como la dureza y la resistencia térmica y eléctrica son sustancialmente más altas en los cerámicos que en los metales (tablas 3.1 y 3.2). Los cerámicos están disponibles en forma *monocristalina* o *policristalina*. El tamaño de grano tiene una influencia principal



(a) (b)

FIGURA 8.1 Variedad de componentes de cerámico. *(a)* Alúmina de alta resistencia para aplicaciones a altas temperaturas. *(b)* Rotores de turbinas de gas fabricados de nitruro de silicio. *Fuente:* Cortesía de Wesgo Div., GTE.

en la resistencia y las propiedades de los cerámicos; cuanto más fino sea el tamaño del grano (de ahí el término **cerámicos finos**), más altas serán la resistencia y la tenacidad.

8.2.1 Materias primas

Entre las materias primas más antiguas utilizadas para hacer cerámicos está la **arcilla**, que tiene una estructura similar a una hoja de grano fino. El ejemplo más común es la *caolinita* (de Kaoling, una montaña en China). Es una arcilla blanca que está constituida por silicato de aluminio, con capas alternas enlazadas débilmente por iones de silicio y aluminio. Cuando se agrega agua a la caolinita, el líquido se adhiere a las capas (*adsorción*), lo que ocasiona que éstas sean resbalosas y da a la arcilla húmeda sus reconocidas propiedades de suavidad y plasticidad (*hidroplasticidad*) que la hacen moldeable.

Otras materias primas de cerámicos que se encuentran en la naturaleza son el *pedernal* (roca compuesta por sílice de grano muy fino, SiO_2) y el *feldespato* (un grupo de minerales cristalinos que constan de silicatos de aluminio más potasio, calcio o sodio). La **porcelana** es un cerámico blanco compuesto por caolín, cuarzo y feldespato; se usa en aparatos eléctricos y utensilios para baño. En su estado natural, estas materias primas por lo general contienen impurezas de varios tipos, que deben eliminarse antes de procesar los materiales en productos útiles con rendimiento confiable.

8.2.2 Cerámicos a base de óxido

Existen dos tipos principales de cerámicos a base de óxido: alúmina y zirconia (tabla 8.1).

Alúmina. También conocida como **corindón** o **esmeril**, la *alúmina* (óxido de aluminio, Al_2O_3) es el *cerámico a base de óxido* más utilizado, ya sea en su forma pura o como materia prima que se mezcla con otros óxidos. Tiene una alta dureza y resistencia moderada. Aunque la alúmina existe en estado natural, posee cantidades desconocidas de impurezas y propiedades no uniformes; por lo tanto, su comportamiento es poco confiable. En la actualidad, el óxido de aluminio, el carburo de silicio y muchos otros cerámicos se manufacturan de manera casi sintética, así que su calidad puede controlarse. Producido por primera vez en 1893, el óxido de aluminio sintético se obtiene mediante la fusión de la bauxita (un mineral de óxido de aluminio, que es la fuente principal del aluminio), limaduras de hierro y coque en hornos eléctricos. El producto enfriado se tritura y clasifica por tamaño, pasando las partículas a través de tamices estándares. Las piezas hechas de óxido de aluminio se comprimen en frío y se sinterizan (*cerámicas blancas*). Sus propiedades mejoran mediante adiciones menores de otros cerámicos, como el óxido de titanio y el carburo de titanio.

A las estructuras con alúmina y otros óxidos se les llama *mullita* y *espinela*; se utilizan como materiales refractarios en aplicaciones a altas temperaturas. Las propiedades mecánicas y físicas de la alúmina son apropiadas, sobre todo en aislamientos eléctrico y térmico y en herramientas de corte y abrasivos.

Zirconia. La *zirconia* (óxido de zirconio, ZrO_2, de color blanco) presenta buena tenacidad, buena resistencia al impacto térmico, al desgaste y a la corrosión; baja conductividad térmica y un coeficiente de fricción bajo. La **zirconia parcialmente estabilizada** (PSZ, por sus siglas en inglés) ofrece alta resistencia y tenacidad y mejor confiabilidad en su rendimiento que la zirconia. Se obtiene dopando zirconia con óxidos de calcio, itrio o magnesio. Este proceso forma un material con partículas finas de zirconia tetragonal en una red cúbica. Se aplica por lo común en matrices para la extrusión en caliente de metales y en perlas de zirconia utilizadas como medios de rectificado y dispersión para revestimientos aeroespaciales, pinturas base o "primers" y películas superficiales en automóviles, y para impresiones satinadas en los empaques flexibles de alimentos.

Dos características importantes de la PSZ son su coeficiente de dilatación térmica (que es sólo 20% inferior al del hierro fundido) y su conductividad térmica (que es un

TABLA 8.1

Tipos y características generales de los cerámicos

Tipo	Características generales
Cerámicos a base de óxido	
Alúmina	Alta dureza y resistencia moderada; el cerámico más utilizado; herramientas de corte; abrasivos; aislamiento eléctrico y térmico.
Zirconia	Alta resistencia y tenacidad; dilatación térmica aproximada a la del hierro fundido; apropiada para aplicaciones de alta temperatura.
Carburos	
Carburo de tungsteno	La dureza, resistencia y resistencia al desgaste dependen del contenido del aglutinante de cobalto; utilizado comúnmente para matrices y herramientas de corte.
Carburo de titanio	No tan tenaz como el carburo de tungsteno; tiene níquel y molibdeno como aglutinante; utilizado como herramienta de corte.
Carburo de silicio	Resistencia a altas temperaturas y resistencia al desgaste; utilizado para motores térmicos y como abrasivo.
Nitruros	
Nitruro de boro cúbico	Segunda sustancia más dura conocida, después del diamante; utilizada como abrasivo y herramienta de corte.
Nitruro de titanio	De color dorado; utilizado como recubrimiento debido a sus características de baja fricción.
Nitruro de silicio	Alta resistencia a la termofluencia e impacto térmico; utilizado en aplicaciones de alta temperatura.
Sialón	Consiste en nitruros de silicio y otros óxidos y carburos; utilizado como herramienta de corte.
Cermets	Constan de óxidos, carburos y nitruros; utilizado en aplicaciones de alta temperatura.
Sílice	Resistencia a altas temperaturas; el cuarzo presenta efecto piezoeléctrico; los silicatos que contienen varios óxidos se utilizan en aplicaciones no estructurales de alta temperatura.
Vidrios	Contienen por lo menos 50% de sílice; estructuras amorfas; varios tipos disponibles con una amplia gama de propiedades mecánicas y físicas.
Cerámicos vidriados	Tienen un alto componente cristalino en su estructura; buena resistencia al choque térmico y resistentes.
Grafito	Forma cristalina de carbono; alta conductividad eléctrica y térmica; buena resistencia al choque térmico.
Diamante	La sustancia más dura conocida; disponible en forma monocristalina o policristalina; utilizado como herramienta de corte y abrasivo y en matrices para estirado de alambre fino.

tercio de los demás cerámicos). Por consiguiente, la PSZ es muy apropiada para componentes de motores térmicos, como revestimiento de cilindros y bujías de válvulas, a fin de ayudar a mantener intacto el ensamblaje del motor de hierro fundido. La **zirconia de tenacidad por transformación** (TTZ, por sus siglas en inglés) presenta una mayor tenacidad debido a las fases tenaces dispersas en la matriz de cerámica.

EJEMPLO 8.1 Cuchillos de cerámico

En la actualidad se está ampliando el uso de los cuchillos de cerámico, en general fabricados con óxido de zirconia. Estos cuchillos se producen mediante un proceso (descrito en la sección 18.2) que empieza al mezclar polvo de cerámico con varios aglutinantes, para luego compactarlos (moldearlos) como piezas brutas a alta presión. Después se someten a calor (se sinterizan) a temperaturas por arriba de 1000 °C (1830 °F) durante varios días. Posteriormente las piezas brutas se rectifican y esmerilan en una rueda de diamante, para formar un borde filoso, y se sujetan al mango. La dureza Mohs (sección 2.6) del cerámico de óxido de zirconia es de 8.2, en comparación con el acero duro, que es de 6, y un máximo de 10 para el diamante.

Los cuchillos de cerámico tienen las siguientes ventajas sobre los de acero: *(a)* debido a su alta dureza y resistencia al desgaste, los cuchillos de cerámico pueden durar

meses e incluso años antes de tener que afilarse. *(b)* Son químicamente inertes; por consiguiente, no manchan, los alimentos no se les adhieren (por eso son fáciles de limpiar) y tampoco dejan sabor ni olor a metal. *(c)* Debido a su ligereza, son fáciles de utilizar.

Los cuchillos deben almacenarse en bloques de madera y manejarse con cuidado. Hay que evitar el impacto del filo contra otros objetos (como platos) o dejarlos caer sobre una superficie dura, ya que puede astillarse su borde filoso. Además, sólo deben utilizarse para cortar (no para apalancar) y, al cortar la carne, no es recomendable el contacto con los huesos. Es necesario afilarlos en fábrica para precisar la forma del borde, utilizando ruedas de esmerilado de diamante. Los cuchillos de cerámico son más costosos que los de acero: su precio va desde $60 por un cuchillo para pelar de 3 pulgadas hasta $250 por un cuchillo serrado de 6 pulgadas. *Fuente*: Cortesía de Kyocera Corporation.

8.2.3 Otros cerámicos

Los principales cerámicos de otros tipos se pueden clasificar de la siguiente manera:

Carburos. Los *carburos* típicos están hechos de tungsteno y titanio (utilizados como herramientas de corte y materiales para matrices) y de silicio (usados como abrasivos, especialmente en piedras de esmerilado). Algunos ejemplos de carburos son:

- El **carburo de tungsteno** (WC) consiste en partículas de carburo de tungsteno, con cobalto como aglutinante. La cantidad de aglutinante tiene gran influencia en las propiedades del material; la tenacidad aumenta con el cobalto, pero disminuyen la dureza, resistencia y resistencia al desgaste.
- El **carburo de titanio** (TiC) tiene níquel y molibdeno como aglutinantes y no presenta tanta tenacidad como el carburo de tungsteno.
- El **carburo de silicio** (SiC) presenta una buena resistencia al desgaste, al impacto térmico y a la corrosión. Tiene un bajo coeficiente de fricción y es resistente a temperaturas elevadas. Por lo tanto, es apropiado para componentes de alta temperatura en motores térmicos y como abrasivo. El silicio sintético se produjo por primera vez en 1891 y está hecho de arena de sílice, coque y pequeñas cantidades de cloruro de sodio y aserrín. El proceso es similar al seguido para elaborar óxido de aluminio sintético (sección 8.2).

Nitruros. Otra clase de cerámicos son los nitruros, entre los que se encuentran los siguientes ejemplos:

- El **nitruro de boro cúbico** (cBN) es la segunda sustancia más dura conocida (después del diamante) y se aplica en herramientas de corte y como abrasivo en discos de esmerilado. No existe en estado natural y se produjo sintéticamente por primera vez en la década de 1970, mediante técnicas similares a las empleadas en la producción de diamante sintético (ver la sección 8.7).
- El **nitruro de titanio** (TiN) se utiliza ampliamente como recubrimiento en herramientas de corte; mejora la vida de la herramienta debido a sus características de baja fricción.
- El **nitruro de silicio** (Si_3N_4) presenta alta resistencia a la termofluencia a temperaturas elevadas, baja dilatación térmica y alta conductividad térmica. Por consiguiente, resiste el impacto térmico. Es apropiado para aplicaciones estructurales de alta temperatura, como los componentes de motores automovilísticos y turbinas de gas, rodillos seguidores de levas, rodamientos, boquillas de chorro de arena y componentes para la industria del papel.

Sialón. El sialón consiste en nitruro de silicio con varias adiciones de óxido de aluminio, óxido de itrio y carburo de titanio. Tiene mayor resistencia y resistencia al impacto térmico que el nitruro de silicio. Se utiliza principalmente como material de herramientas de corte. La palabra *sialón* se deriva de *si*licio, *al*uminio, *o*xígeno y *n*itrógeno.

Cermets. Los *cermets* son combinaciones de una fase de *cer*ámico unida a una fase *me*tálica. Se introdujeron en la década de 1960 y también se conocen como **cerámicos negros** o **cerámicos prensados en caliente**; combinan la resistencia a la oxidación a alta temperatura de los cerámicos con la tenacidad, resistencia al choque térmico y ductilidad de los metales. Suelen aplicarse en las herramientas de corte, con una composición típica de 70% de Al_2O_3 y 30% de TiC. Otros cermets contienen varios óxidos, carburos y nitruros. Se han desarrollado para aplicaciones de alta temperatura, como boquillas para motores de reacción y frenos de aeronaves. Los cermets pueden considerarse materiales compósitos y utilizarse en combinaciones de cerámicos y metales aglutinados mediante técnicas de metalurgia de polvos (capítulo 17).

8.2.4 Sílice

Abundante en la naturaleza, el **sílice** es un material polimórfico, es decir, que puede tener diferentes estructuras de cristales (por ejemplo, la estructura cúbica se encuentra en ladrillos refractarios utilizados en hornos de alta temperatura). La mayoría de los vidrios contienen más de 50% de sílice. La forma más común del sílice es el **cuarzo,** un cristal hexagonal duro y abrasivo, muy usado en aplicaciones de comunicaciones como un cristal oscilante de frecuencia fija, ya que presenta el efecto piezoeléctrico (sección 3.7).

Los **silicatos** son producto de la reacción del sílice con óxidos de aluminio, magnesio, calcio, potasio, sodio y hierro; ejemplos de éstos son la arcilla, el asbesto, la mica y los vidrios de silicato. El **silicato de litio y aluminio** tiene una dilatación y conductividad térmicas muy bajas y buena resistencia al choque térmico. Sin embargo, su resistencia y su vida de fatiga también son muy bajas, por lo que es apropiado sólo para aplicaciones no estructurales (como convertidores catalíticos, regeneradores y componentes de intercambiadores de calor).

8.2.5 Nanocerámicos y compósitos

Para mejorar la ductilidad y las propiedades de manufactura de los cerámicos, el tamaño de las partículas se ha reducido utilizando varias técnicas, como la condensación de gases. A estos materiales se les conoce como *nanocerámicos* o **cerámicos de nanofase** y consisten en grupos atómicos que contienen algunos miles de átomos. En estos cerámicos es importante controlar el tamaño de las partículas, la distribución y la contaminación. Los nanocerámicos son dúctiles a temperaturas significativamente inferiores a las de los cerámicos convencionales y son más fuertes y fáciles de fabricar y maquinar, con menos defectos. Se aplican en la industria automotriz (como válvulas, balancines, rotores de turbocargadores y revestimientos de cilindros) y en componentes de motores de reacción.

También se utilizan *partículas nanocristalinas* de *segunda fase* (del orden de 100 nm o menos) y fibras como refuerzo en compósitos. Estos últimos han mejorado propiedades, como la resistencia a la tensión y a la termofluencia. (Ver también *nanomateriales* en la sección 6.16).

8.3 Propiedades generales y aplicaciones de los cerámicos

En comparación con los metales, los cerámicos tienen las siguientes características: fragilidad; alta resistencia y dureza a temperaturas elevadas; alto módulo elástico; baja tenacidad, densidad, dilatación térmica, y baja conductividad térmica y eléctrica. Sin embargo, debido a la amplia variedad de composiciones de materiales y tamaños de grano, las propiedades mecánicas y físicas de los cerámicos varían de manera significativa.

Por ejemplo, su conductividad eléctrica puede modificarse de pobre a buena; este cambio es el principio detrás de los semiconductores.

Debido a su sensibilidad a imperfecciones, defectos y grietas superficiales o internas; la presencia de diferentes tipos y niveles de impurezas; y los distintos métodos de manufactura, los cerámicos pueden tener una amplia gama de propiedades. A pesar de que sus características individuales se abordaron en la sección 8.2, a continuación se describen sus propiedades mecánicas y físicas generales.

8.3.1 Propiedades mecánicas

En la tabla 8.2 se muestran las propiedades mecánicas de diversos cerámicos de ingeniería. Obsérvese que su resistencia a la tensión (resistencia a ruptura transversal, sección 2.5) es inferior a su resistencia a la compresión. La causa es su sensibilidad a grietas, impurezas y porosidad. Dichos defectos conducen al inicio y la propagación de grietas bajo esfuerzo de tensión y reducen severamente la resistencia a la tensión. Por lo tanto, la capacidad de reproducción y la confiabilidad (rendimiento aceptable durante un periodo especificado) son aspectos importantes en la vida útil de los componentes de cerámicos.

La resistencia a la tensión de un cerámico policristalino aumenta con la reducción del tamaño del grano y la porosidad. Esta relación se representa aproximadamente mediante la expresión

$$\text{UTS} = \text{UTS}_o e^{-nP} \tag{8.1}$$

en la que P es la fracción de volumen de los poros en el sólido (por lo que si la porosidad es 15%, entonces $P = 0.15$), UTS_o es la resistencia a la tensión a porosidad cero y el exponente n tiene valores entre 4 y 7. El módulo de elasticidad de los cerámicos se relaciona con su porosidad mediante la expresión

$$E = E_o(1 - 1.9P + 0.9P^2) \tag{8.2}$$

en la que E_o es el módulo a porosidad cero.

A diferencia de la mayoría de los metales y termoplásticos, por lo general los cerámicos carecen de tenacidad al impacto y resistencia al choque térmico debido a su carencia inherente de ductilidad; una vez iniciada, una grieta se propaga con rapidez. Además

TABLA 8.2

Propiedades de diversos cerámicos a temperatura ambiente

Material	Símbolo	Resistencia a la ruptura transversal (MPa)	Resistencia a la compresión (MPa)	Módulo elástico (GPa)	Dureza (HK)	Relación de Poisson (ν)	Densidad (kg/m^3)
Óxido de aluminio	Al_2O_3	140–240	1000–2900	310–410	2000–3000	0.26	4000–4500
Nitruro de boro cúbico	CBN	725	7000	850	4000–5000	—	3480
Diamante	—	1400	7000	830–1000	7000–8000	—	3500
Sílice fundida	SiO_2	—	1300	70	550	0.25	—
Carburo de silicio	SiC	100–750	700–3500	240–480	2100–3000	0.14	3100
Nitruro de silicio	Si_3N_4	480–600	—	300–310	2000–2500	0.24	3300
Carburo de titanio	TiC	1400–1900	3100–3850	310–410	1800–3200	—	5500–5800
Carburo de tungsteno	WC	1030–2600	4100–5900	520–700	1800–2400	—	10,000–15,000
Zirconia estabilizada parcialmente	PSZ	620	—	200	1100	0.30	5800

Nota: Estas propiedades varían en gran medida dependiendo de las condiciones del material.

de padecer la falla de fatiga bajo cargas cíclicas, los cerámicos (en particular los vidrios) experimentan un fenómeno conocido como **fatiga estática**. Cuando se someten a una carga de tensión durante cierto periodo, estos materiales pueden fallar repentinamente. Este fenómeno ocurre en ambientes donde hay vapor de agua. La fatiga estática, que no ocurre en el vacío o en aire seco, se ha atribuido a un mecanismo similar al agrietamiento por esfuerzo-corrosión de los metales.

Los componentes de cerámico sometidos a esfuerzos de tensión pueden *pretensarse* de manera muy similar al concreto. Al pretensar los componentes formados de cerámico, se someten a esfuerzos compresivos. Los métodos utilizados incluyen:

- Tratamiento térmico y templado químico.
- Tratamiento con láser para superficies.
- Recubrimiento con cerámicos que tienen diferentes coeficientes de dilatación térmica.
- Operaciones de acabado superficial (como rectificado) en las que se inducen esfuerzos residuales de compresión en las superficies.

Se han realizado importantes avances para mejorar la tenacidad y otras propiedades de los cerámicos, incluyendo el desarrollo de **cerámicos maquinables** y **rectificables**. Entre estos avances están la selección adecuada y el procesamiento de materia prima, el control de pureza y estructura y el uso de refuerzos, con especial énfasis en los métodos avanzados de análisis de esfuerzos durante el diseño de los componentes de cerámica.

8.3.2 Propiedades físicas

La mayoría de los cerámicos tienen una gravedad específica relativamente baja, que va de entre 3 y 5.8 para los cerámicos a base de óxido en comparación con 7.86 para el hierro (tabla 3.1). Poseen temperaturas muy elevadas de fusión o descomposición.

La conductividad térmica de los cerámicos varía hasta en tres órdenes de magnitud (lo que depende de su composición), en tanto que en los metales varía sólo en un orden de magnitud. Al igual que la de otros materiales, la conductividad térmica de los cerámicos disminuye con el aumento de temperatura y la porosidad, debido a que el aire es un conductor térmico pobre. La conductividad térmica k se relaciona con la porosidad mediante

$$k = k_o(1 - P) \tag{8.3}$$

en la que k_o es la conductividad térmica a porosidad cero y P es la porosidad como fracción del volumen total.

La dilatación y la conductividad térmicas inducen esfuerzos internos que pueden producir un choque térmico o fatiga térmica en los cerámicos. La tendencia a la **desintegración térmica** (conocida como **astillado** cuando se rompe una pequeña pieza o capa de la superficie) es inferior con la combinación de baja dilatación y alta conductividad térmicas. Por ejemplo, la sílice fundida tiene alta resistencia al choque térmico debido a su dilatación térmica, que en realidad es de cero.

Un ejemplo común que ilustra la importancia de la baja dilatación térmica es el de los cerámicos resistentes al calor, que se usan en utensilios de cocina y en las cubiertas superiores de las estufas eléctricas. (Ver también *cerámicos vidriados*, sección 8.5). Pueden soportar gradientes térmicos elevados, de calor a frío y viceversa. Además, la dilatación térmica similar de cerámicos y metales es una razón importante para usar componentes de cerámico en los motores térmicos. El hecho de que la conductividad térmica de los componentes de zirconia parcialmente estabilizada se aproxime a la del hierro fundido en los monobloques de los motores representa una ventaja adicional para el uso de PSZ en los motores térmicos.

Otra característica es la **anisotropía de la dilatación térmica** de los cerámicos a base de óxido (como la que presentan los metales de empaque hexagonal), cuando la dilatación térmica varía al diferir la dirección a través del cerámico (hasta en 50% para el

cuarzo). Este comportamiento provoca esfuerzos térmicos que pueden desintegrar el componente de cerámico.

Las propiedades *ópticas* de los cerámicos se pueden controlar mediante varias formulaciones y controlando la estructura. Estos métodos hacen posible impartirles diferentes grados de transparencia y translucidez y distintos colores (por ejemplo, el zafiro monocristalino es totalmente transparente; la zirconia es blanca y el óxido de aluminio policristalino de grano fino es gris translúcido). La porosidad influye mucho en las propiedades ópticas de los cerámicos, de la misma manera que el aire atrapado en los cubos de hielo: hace que el material sea menos transparente y le proporciona una apariencia blanca. A pesar de que los cerámicos son básicamente aislantes, se pueden volver *eléctricamente conductores* si se alean con ciertos elementos para actuar como un semiconductor, o incluso como un superconductor.

8.3.3 Aplicaciones

Los cerámicos tienen diversas aplicaciones de consumo e industriales. Se utilizan varios tipos en las industrias eléctrica y electrónica porque poseen alta resistividad eléctrica, alta resistencia dieléctrica (voltaje requerido para ruptura por unidad de espesor) y propiedades magnéticas apropiadas para aplicaciones como imanes para altavoces.

La capacidad de los cerámicos para mantener su resistencia y rigidez a temperaturas elevadas hace que sean muy atractivos en aplicaciones de alta temperatura. Las temperaturas operativas superiores, posibles gracias al uso de componentes de cerámico, representan una combustión más eficiente del combustible y la reducción de emisiones en los automóviles. En la actualidad, la eficacia de los motores de combustión interna es de sólo 30%, pero con el uso de componentes de cerámico su desempeño operativo puede mejorar por lo menos 30%.

Se han realizado muchas investigaciones en materiales y técnicas para desarrollar un motor térmico hecho totalmente de cerámico, capaz de operar a temperaturas de hasta 1000 °C (1830 °F). Sin embargo, el avance ha sido lento debido a problemas como la poca confiabilidad, la falta de suficiente tenacidad, dificultades para lubricar rodamientos y componentes calientes, carencia de técnicas de evaluación no destructivas confiables e incapacidad de producir cerámicos estructurales (como el nitruro de silicio y el carburo de silicio) más económicos en forma casi neta, en contraste con la necesidad de procesos de maquinado y terminado para la precisión dimensional del motor. Los cerámicos que se utilizan con éxito, en especial en componentes de motores para turbinas de gas automotrices (como los rotores), son el nitruro de silicio, el carburo de silicio y la zirconia parcialmente estabilizada.

Los cerámicos también se aplican en el recubrimiento de metales para reducir el desgaste, evitar la corrosión o proporcionar una barrera térmica. Por ejemplo, las losetas en los *transbordadores espaciales* están hechas de fibras de sílice, las cuales presentan una estructura celular que consta de 5% de sílice; el resto de la estructura es aire, de manera que no sólo es muy ligera, sino que también es una excelente barrera térmica. Las losetas (34,000 en cada transbordador) se adhieren a la capa exterior de aluminio de la nave espacial con varias capas de adhesivos de silicio. La temperatura de la capa exterior alcanza 1400 °C (2550 °F) debido al calor de la fricción producida por el contacto con la atmósfera.

Otras propiedades atractivas de los cerámicos son su baja densidad y alto módulo elástico, las cuales permiten que el peso del motor disminuya y, en otras aplicaciones, que se reduzcan las fuerzas de inercia generadas al mover piezas. Por ejemplo, los turbocargadores de cerámicos son casi 40% más ligeros que los convencionales. Los componentes de alta velocidad de las máquinas herramienta también podrían fabricarse con cerámicos (sección 25.3). Además, su alto módulo elástico hace que sean atractivas para mejorar la rigidez de las máquinas y reducir su peso. Su alta resistencia al desgaste las hace apropiadas para aplicaciones como revestimientos de cilindros, bujías, sellos, rodamientos y revestimientos de cañones para armas de fuego.

EJEMPLO 8.2 Cañones de cerámico para armas de fuego

La resistencia al desgaste y la baja densidad de los cerámicos ha llevado a investigar su uso como revestimientos de cañones para armas. Su limitado éxito ha conducido a desarrollos más recientes al hacer cañones de cerámico compósito para armas de fuego, que han mejorado el desempeño de los cañones de acero tradicionales. El cañón de cerámico de zirconia de calibre 50 se elaboró con varios segmentos por separado, cada uno de 150 mm a 200 mm (de 6 a 8 pulgadas) de longitud y con un espesor de pared de 3.75 mm (0.150 pulgadas), mediante los procesos de moldeado y sinterizado descritos en la sección 17.9.

Posteriormente se maquinan los segmentos a las dimensiones y el acabado superficial requeridos. Se eligió la zirconia por su alta tenacidad, resistencia a la flexión, calor específico, temperatura de operación y conductividad térmica muy baja. Las propiedades térmicas son importantes para el desempeño del cañón y la bala.

Los segmentos de cerámico separados se unen y el cañón se envuelve con un compósito de fibra de carbono y matriz polimérica que lo sujeta a un esfuerzo de compresión de 100,000 psi, por lo que mejora en gran medida su capacidad para soportar los esfuerzos de tensión desarrollados durante el disparo. Después, el interior del cañón se estría (corte de ranuras internas en espiral para dar rotación a la bala al momento de la salida y proporcionarle estabilidad giroscópica) y se fija a la recámara.

Fuente: Cortesía de K. H. Kohnken, Surface Conversion Technologies, Inc., Cumming, Georgia.

EJEMPLO 8.3 Rodamientos de cerámico de bolas y de rodillos

Los rodamientos de bolas y de rodillos fabricados con cerámico de nitruro de silicio se utilizan en condiciones de alta temperatura, alta velocidad y lubricación marginal. Se pueden hacer totalmente de cerámico, pero si sólo las bolas o rodillos son de cerámico y las pistas son metálicas, entonces se les conoce como rodamientos híbridos (fig. 8.2). Algunos ejemplos de máquinas que utilizan rodamientos de cerámico e híbridos incluyen husillos de alto rendimiento para máquinas herramienta, cabezales de



(a)

FIGURA 8.2 Selección de rodamientos de cerámico y pistas. *Fuente:* Cortesía de The Timken Company.



(b)

FIGURA 8.2

costura de latas metálicas, medidores de flujo de alta velocidad y las bombas de oxígeno e hidrógeno líquido del cohete principal del transbordador espacial.

Las esferas de cerámico tienen una tolerancia de diámetro de 0.13 μm (5 micropulgadas) y una rugosidad superficial de 0.02 μm (0.8 micropulgadas). Poseen gran resistencia al desgaste, alta tenacidad a la fractura, se desempeñan bien con poca lubricación o sin ella y su densidad es baja. Las bolas tienen la cuarta parte del coeficiente de dilatación térmica del acero y pueden soportar temperaturas hasta de 1400 °C (2550 °F). El material grado rodamiento de alta densidad de carbonitruro de titanio (TiCN) o nitruro de silicio (Si_3N_4) se obtiene a partir de titanio y nitruro de carbono mediante técnicas de metalurgia de polvos y puede ser dos veces más duro y 40% más ligero que el acero al cromo. Pueden producirse componentes hasta de 300 mm (12 pulgadas) de diámetro.

Biocerámicos. Debido a su resistencia y a que son inertes, los cerámicos se utilizan como biomateriales (*biocerámicos*) para reemplazar articulaciones en el cuerpo humano, como dispositivos protésicos y en trabajos dentales. Los biocerámicos de uso común son el óxido de aluminio, hidroxiapatita, fosfato tricálcico, nitruro de silicio y varios compuestos de sílice. Los implantes de cerámico pueden hacerse porosos, por lo que el hueso puede crecer dentro de la estructura porosa (al igual que en los implantes de titanio poroso) y desarrollar una fuerte unión con integridad estructural.

8.4 Vidrios

El **vidrio** es un sólido amorfo con la estructura de un líquido. Se ha *superenfriado* (enfriado a una velocidad demasiado alta para permitir la formación de cristales). Técnicamente, se define como un producto inorgánico de fusión que se ha enfriado hasta adquirir una condición rígida sin cristalizarse. El vidrio no tiene un punto distintivo de fusión o solidificación, por lo que su comportamiento es similar al de las aleaciones amorfas (ver *vidrios metálicos*, sección 6.14) y polímeros amorfos (sección 7.2).

Las cuentas de vidrio se produjeron por primera vez hacia el año 2000 a.C. y el arte de soplar vidrio después del año 200 a.C. Hasta finales del siglo XVII, la sílice se utilizaba para todos los productos de vidrio. Los rápidos desarrollos en vidrios se iniciaron a principios del siglo XX. En la actualidad existen unos 750 tipos de vidrios disponibles comercialmente, con aplicaciones que van desde vidrios para ventanas hasta vidrio para contenedores, utensilios de cocina, iluminación, tubos de TV y CRT, e incluso vidrios con características especiales mecánicas, eléctricas, de alta temperatura, contra ataques químicos, de corrosión y ópticas. Se utilizan vidrios especiales en las fibras ópticas (para comunicación mediante la luz con una pérdida pequeña de potencia en las señales) y en las fibras de vidrio con resistencia muy alta (para usarse en plásticos reforzados).

Todos los vidrios tienen por lo menos 50% de sílice, que se conoce como **formador de vidrio**. La composición y las propiedades de los vidrios pueden modificarse en gran medida mediante la adición de óxidos de aluminio, sodio, calcio, bario, boro, magnesio, titanio, litio, plomo y potasio. Según su función, estos óxidos se conocen como **intermedios** (o **modificadores**).

8.4.1 Tipos de vidrios

Casi todos los *vidrios comerciales* se clasifican por tipo (tabla 8.3).

- **Vidrio de sosa y cal** (el tipo más común)
- **Vidrio de plomo alcalino**
- **Vidrio de borosilicato**
- **Vidrio de aluminosilicato**
- **Vidrio con 96% de sílice**
- **Vidrio de sílice fundida**

Los vidrios también se clasifican como coloreados, opacos (blancos o translúcidos), de formas múltiples (variedad de formas), de características ópticas, fotocromáticos (se oscurecen cuando se exponen a la luz, como en el caso de los anteojos para el sol), fotosensibles (cambian de claros a opacos), fibrosos (estirados como fibras largas, como en la fibra óptica) y espumoso o celular (que contiene burbujas, por lo que es un buen aislante térmico). Los vidrios se conocen además como **duros** o **blandos**, en el sentido de propiedad térmica más que mecánica (ver también dureza de los vidrios, sección 8.4.2). Por lo tanto, un vidrio suave se ablanda a una temperatura inferior a la de un vidrio duro. Los vidrios de sosa y cal, y los de plomo alcalino, se consideran blandos, el resto son duros.

TABLA 8.3

Propiedades de diferentes vidrios

	Vidrio de sosa y cal	Vidrio de plomo	Vidrio de borosilicato	96% de sílice	Sílice fundida
Densidad	Alta	La más alta	Media	Baja	La más baja
Resistencia	Baja	Baja	Moderada	Alta	La más alta
Resistencia al choque térmico	Baja	Baja	Buena	Mejor	La Mejor
Resistividad eléctrica	Moderada	La Mejor	Buena	Buena	Buena
Capacidad de trabajo en caliente	Buena	La Mejor	Regular	Pobre	La peor
Posibilidad de tratamiento térmico	Buena	Buena	Pobre	Ninguna	Ninguna
Resistencia química	Pobre	Regular	Buena	Mejor	La Mejor
Resistencia al choque-abrasión	Regular	Pobre	Buena	Buena	La Mejor
Transmisión de luz ultravioleta	Pobre	Pobre	Regular	Buena	Buena
Costo relativo	El más bajo	Bajo	Medio	Alto	El más elevado

8.4.2 Propiedades mecánicas

Por lo general, el comportamiento del vidrio, como el de la mayoría de los cerámicos, se considera perfectamente elástico y frágil. El módulo de elasticidad de los vidrios comerciales varía de 55 a 90 GPa (8 a 13 millones de psi) y sus relaciones de Poisson de 0.16 a 0.28. La dureza de los vidrios, como medida de resistencia a raspaduras, se clasifica de 5 a 7 en la escala de Mohs, que es equivalente a un rango aproximado de 350 a 500 HK. (Ver fig. 2.16).

Por lo general, el vidrio en forma *de masa* tiene una resistencia de menos de 140 MPa (20 ksi). La resistencia relativamente baja de este vidrio se atribuye a la presencia de pequeñas imperfecciones y microgrietas en su superficie, algunas de las cuales, o todas, pueden introducirse durante el manejo normal del vidrio por abrasión inadvertida. Estos defectos reducen su resistencia entre dos y tres órdenes de magnitud, en comparación con su resistencia ideal (libre de defectos). Los vidrios pueden reforzarse mediante tratamientos térmicos o químicos para obtener alta resistencia y tenacidad (sección 18.4). En teoría, esta resistencia puede alcanzar 35 GPa (5 millones de psi). Cuando el vidrio fundido acaba de estirarse como fibra (**fibra de vidrio**), su resistencia de tracción va de 0.2 a 7 GPa (30 a 1000 ksi), con un valor promedio de alrededor de 2 GPa (300 ksi). Estas fibras de vidrio son más resistentes que el acero; se utilizan para reforzar plásticos en embarcaciones, carrocerías de automóviles, muebles y equipo deportivo (tablas 2.1 y 9.1).

Es común usar el ensayo de flexión en el vidrio para medir su resistencia. Su superficie se desgasta totalmente (se hace rugosa) a fin de asegurar que la prueba proporciona un nivel de resistencia confiable para el servicio real en condiciones adversas. El fenómeno de **fatiga estática,** que se observa en los cerámicos, también ocurre en los vidrios. Como guía, si un componente de vidrio debe soportar una carga durante 1000 horas o más, el esfuerzo máximo que se le puede aplicar es de un tercio del esfuerzo máximo que el mismo componente puede soportar durante el primer segundo de aplicación de la carga.

8.4.3 Propiedades físicas

Los vidrios tienen baja conductividad térmica, alta resistividad eléctrica y resistencia dieléctrica. Sus coeficientes de dilatación térmica son inferiores a los de los metales y los plásticos e incluso pueden aproximarse a cero. Por ejemplo, el vidrio de sílice de titanio (un vidrio claro, sintético, con alto contenido de sílice) posee un coeficiente de dilatación térmica casi igual a cero. La sílice fundida (un dióxido de silicio claro, amorfo, sintético, de pureza muy alta) también tiene un coeficiente de dilatación de casi cero. Las propiedades ópticas de los vidrios (como la reflexión, absorción, transmisión y refracción) se pueden modificar variando su composición y tratamiento. En general, los vidrios son resistentes a ataques químicos y por su resistencia a la corrosión se clasifican como ácidos, álcalis o agua.

8.5 Cerámicos vidriados

A pesar de que los vidrios son amorfos, los **cerámicos vidriados** (como el *Pyroceram*, su nombre comercial) tienen un alto componente cristalino en su microestructura. Estos cerámicos contienen grandes proporciones de diversos óxidos y, por lo tanto, sus propiedades son una combinación de las del vidrio y las de los cerámicos; la mayoría son más resistentes que el vidrio. A estos productos primero se les da forma y después se les trata con calor, con lo que se presenta la **desvitrificación** (recristalización) del vidrio. A diferencia de la mayoría de los vidrios, que son claros, los cerámicos vidriados generalmente son blancos o grises.

La dureza de los cerámicos vidriados va de 520 a 650 HK. Tienen un coeficiente de dilatación térmica casi igual a cero, por lo que presentan una alta resistencia al choque

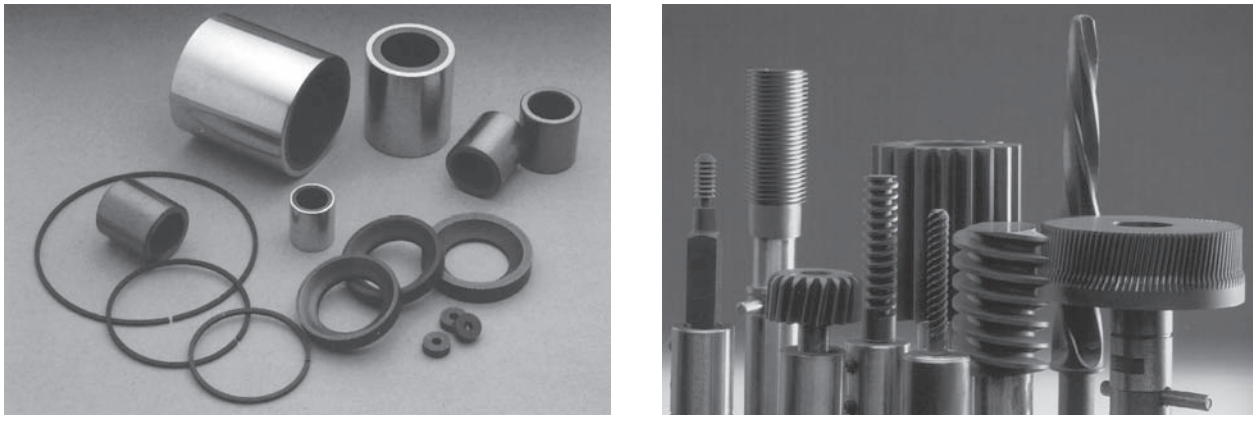
térmico. Son fuertes debido a la ausencia de la porosidad que suele encontrarse en los cerámicos convencionales. Sus propiedades pueden mejorarse si se modifica su composición y mediante técnicas de tratamiento térmico. Los cerámicos vidriados se desarrollaron por primera vez en 1957 y son apropiados para utensilios de cocina, intercambiadores de calor en motores de turbinas de gas, radomos (cubierta protectora para antenas de radar) y aplicaciones eléctricas y electrónicas.

8.6 Grafito

El *grafito* es una forma cristalina de carbono que tiene una *estructura en capas* de planos basales u hojas de átomos de carbono de empaquetamiento compacto (ver la fig. 1.4). Por lo tanto, el grafito es débil cuando se somete a esfuerzo cortante a lo largo de las capas. Esta característica le da sus propiedades de baja fricción como lubricante sólido. Sin embargo, la fricción es baja sólo en un ambiente de aire o humedad; en el vacío, el grafito es abrasivo y un lubricante pobre. A diferencia de otros materiales, su resistencia y rigidez aumentan con la temperatura. Al grafito amorfo se le llama **negro de humo** (hollín negro) y se utiliza como pigmento.

A pesar de su fragilidad, el grafito tiene una alta conductividad eléctrica y térmica y buena resistencia al impacto eléctrico y a la temperatura elevada (a pesar de que empieza a oxidarse a 500 °C, 930 °F). Por lo tanto, es un material importante en aplicaciones como electrodos, elementos térmicos, escobillas para motores, accesorios de alta temperatura y partes de hornos, materiales para moldeo (como crisoles para fundir metales) y sellos (fig. 8.3). Una característica del grafito es su resistencia a los productos químicos, por lo que se utiliza en filtros para fluidos corrosivos, por ejemplo. Además, su baja absorción por sección transversal y su alta dispersión por sección transversal de los neutrones térmicos hacen que sea adecuado para aplicaciones nucleares. La punta de un lápiz es una mezcla de grafito y arcilla.

El grafito se encuentra disponible comercialmente en formas cuadradas, rectangulares y redondas de varios tamaños, y por lo general se clasifica en orden decreciente por tamaño de grano: *grano industrial, grano fino* y *micrograno*. Como en los cerámicos, las propiedades mecánicas del grafito mejoran al disminuir el tamaño del grano. El grafito de micrograno puede impregnarse con cobre. De esta manera, se utiliza para electrodos



(a) (b)

FIGURA 8.3 *(a)* Diversos componentes de ingeniería hechos de grafito. *Fuente:* Cortesía de Poco Graphite, Inc., una compañía Unocal. *(b)* Ejemplos de electrodos de grafito para maquinado por descarga eléctrica. *Fuente:* Cortesía de Unicor, Inc.

en maquinado por descarga eléctrica (sección 27.5) y en accesorios de hornos. Por lo general, el grafito se procesa primero moldeándolo o dándole forma, después se hornea y, por último, se maquina hasta darle la forma final.

Fibras de grafito. Un importante uso del grafito es como fibras en plásticos reforzados y materiales compósitos, como se describe en la sección 9.2.

Espumas de carbono y grafito. Estas espumas tienen importantes propiedades de altas temperaturas de servicio, son químicamente inertes, poseen baja dilatación térmica y propiedades térmicas y eléctricas que se pueden adaptar para aplicaciones específicas. Existen espumas de carbono con estructuras de grafito y sin él. Las espumas grafíticas (por lo general obtenidas del petróleo, alquitrán y resinas sintéticas) tienen baja densidad, alta conductividad térmica y eléctrica (pero resistencia mecánica inferior) y son mucho más costosas que las espumas sin grafito (producidas a partir de carbón o resinas orgánicas), las cuales son altamente amorfas.

Estas espumas tienen una microestructura celular con poros interconectados, por lo que sus propiedades mecánicas dependen de la densidad (ver también la sección 8.3). Se pueden maquinar con facilidad en varias formas complejas con los herramentales adecuados. Las espumas de carbono pueden usarse como materiales para núcleos de tableros interiores de aeronaves y barcos, aislamiento estructural, paneles de absorción de sonido, sustratos para espejos espaciales, baterías de iones de litio y protección térmica y contra incendios.

Bolas de Bucky. Un desarrollo más reciente es la producción de moléculas de carbono (por lo general, C60) en la forma de balón de futbol, conocidas como **bolas de Bucky**, en honor de Buckminster Fuller (1895-1983), inventor del domo geodésico. También conocidas como **fulerenos**, estas moléculas esféricas químicamente inertes se obtienen del hollín y actúan de manera muy similar a las partículas sólidas lubricantes. Los fulerenos pueden convertirse en superconductores de baja temperatura cuando se mezclan con metales. A pesar de ser prometedoras y una significativa inversión en investigación, en la actualidad no existen aplicaciones comerciales de las bolas de Bucky.

Nanotubos. Los nanotubos de carbono tienen una estructura geométrica similar a la de las hojas de grafito; de hecho, se les puede representar como hojas enrolladas de grafito. Tienen algunos nanómetros de diámetro y por lo general algunas micras de longitud. Aun cuando se les ha sugerido para diversas aplicaciones, a la fecha ninguna ha tenido éxito en términos comerciales. Con más frecuencia los nanotubos se citan como material natural de construcción para nuevos sistemas microelectromecánicos o MEMS (ver el capítulo 29).

8.7 Diamante

El **diamante** es una forma principal del carbono con una estructura aglutinada en términos covalentes. Es la sustancia más dura conocida (7000 a 8000 HK). Sin embargo, es frágil y empieza a descomponerse en el aire a 700 °C (1300 °F), aunque resiste temperaturas superiores en ambientes no oxidantes.

El **diamante sintético** (también conocido como **industrial**) se fabricó por primera vez en 1955. Un método común para elaborarlo consiste en someter el grafito a una presión hidrostática de 14 GPa (2 millones psi) y a una temperatura de 3000 °C (5400 °F). El diamante sintético es idéntico al natural. Tiene propiedades superiores por la carencia de impurezas y se utiliza ampliamente en aplicaciones industriales. Se encuentra disponible en varios tamaños y formas; para maquinado abrasivo, el tamaño más común de los gra-

nos es de 0.01 mm (0.004 pulgadas) de diámetro. El **carbono similar al diamante** (DLC) también se ha desarrollado y utilizado como recubrimiento de película de diamante, como se describe en la sección 34.13. Las partículas de diamante también pueden *recubrirse* con níquel, cobre o titanio para mejorar su desempeño en operaciones de rectificado.

Además de su uso en joyería, el diamante sintético con calidad de gema puede aplicarse como sumidero de calor en computadoras, en las industrias de telecomunicaciones y de circuitos integrados y como ventana para láseres de alta potencia. Su conductividad eléctrica es 50 veces superior a la del diamante natural y 10 veces más resistente a daños por láser.

Debido a sus características favorables, los diamantes tienen muchas aplicaciones importantes como:

- Materiales para herramientas de corte, en forma monocristalina o policristalina.
- Abrasivos en discos de rectificado, para rectificado de materiales duros.
- Afilado de piedras abrasivas (es decir, afilado de los granos abrasivos).
- Matrices para estirado de cables de diámetro menor a 0.06 mm (0.0025 pulgadas).
- Recubrimientos para herramientas de corte y matrices.

RESUMEN

- Diversos materiales no metálicos son de gran importancia en aplicaciones de ingeniería y en procesos de manufactura. Los cerámicos, que son compuestos de elementos metálicos y no metálicos, se caracterizan por su alta dureza, alta resistencia a la compresión, alto módulo elástico, baja dilatación térmica, resistencia a temperatura elevada, baja densidad y baja conductividad térmica y eléctrica, además de que son químicamente inertes. En cambio, son frágiles y tienen baja tenacidad. Los cerámicos nanofase tienen mejores propiedades que los cerámicos comunes. La porosidad en los cerámicos tiene efectos importantes en sus propiedades.
- Por lo general, los cerámicos se clasifican en cerámicos tradicionales o industriales (o de alta tecnología); estos últimos son particularmente atractivos en aplicaciones como componentes de motores térmicos, herramientas de corte y componentes que requieren resistencia contra el desgaste o la corrosión. Los cerámicos útiles en el diseño y la manufactura son los cerámicos a base de óxido (alúmina y zirconia), carburos de tungsteno y silicio, nitruros y cermets.
- Los vidrios son líquidos superenfriados y están disponibles en una amplia variedad de composiciones y propiedades mecánicas, físicas y ópticas. Los cerámicos vidriados tienen una estructura predominantemente cristalina y sus propiedades son más deseables que las de los vidrios.
- El vidrio en masa tiene una resistencia relativamente baja, pero puede reforzarse mediante tratamientos térmicos y químicos para obtener alta resistencia y tenacidad. Las fibras de vidrio se utilizan en gran medida como material de refuerzo en materiales compósitos, como los plásticos reforzados con fibras.
- El grafito, los fulerenos y el diamante son formas de carbono que presentan combinaciones poco comunes de propiedades. Poseen diversas aplicaciones únicas y emergentes en ingeniería y manufactura. El grafito se usa en procesos de alta temperatura y eléctricos; las fibras de grafito se utilizan para reforzar plásticos y otros materiales compósitos. Los diamantes (natural y sintético) se utilizan como herramientas de corte en operaciones finas de maquinado, como matrices para estirado de cables delgados y como abrasivos para discos de rectificado. El carbono similar al diamante se aplica como material de recubrimiento que mejora la resistencia contra el desgaste.

TÉRMINOS CLAVE

Alúmina
Arcilla
Biocerámicos
Bolas de Bucky
Carbono
Carbono similar al diamante
Carburos
Cerámicos
Cerámicos a base de óxido
Cerámicos blancos
Cerámicos industriales
Cerámicos nanofase
Cerámicos vidriados
Cermets
Desvitrificación
Diamante
Diamante industrial
Espuma de carbono
Fatiga estática
Feldespato
Fibras de vidrio
Formador de vidrio
Fulerenos
Grafito
Nitruros
Pedernal
Porcelana
Porosidad
Sialón
Sílice
Vidrio
Zirconia
Zirconia de tenacidad por transformación
Zirconia parcialmente estabilizada

BIBLIOGRAFÍA

Barsoum, M. W., *Fundamentals of Ceramics*, Iop Institute of Physics, 2003.

Bioceramics: *Materials and Applications*, American Ceramic Society, Vol. I, 1995; Vol. II, 1996, Vol. III, 1999.

Brook, R. J. (ed.), *Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials*, Pergamon, 1991.

Cheremisinoff, N. P., *Handbook of Ceramics and Composites*, 3 vols., Marcel Dekker, 1991.

Chiang, Y.-M., *Physical Ceramics: Principles for Ceramics Science and Engineering*, Wiley, 1995.

Doresmus, R. H., *Glass Science*, 2a. ed., Wiley, 1994.

Ellis, W. S., *Glass*, Avon Books, 1998.

Edinsinghe, M. J., *An Introduction to Structural Engineering Ceramics*, Ashgate Pub. Co., 1997.

Engineered Materials Handbook, Vol. 4: *Ceramics and Glasses*, ASM International, 1991.

Green, D. J., *An Introduction to the Mechanical Properties of Ceramics*, Cambridge Univ. Press, 1998.

Harper, C. A. (ed.), *Handbook of Ceramics, Glasses, and Diamonds*, McGraw-Hill, 2001.

Hench, L. L., y Wilson, J. (eds.), *An Introduction to Bioceramics*, World Scientific Pub., 1993.

Holand, W. y Beall, G. H., *Design and Properties of Glass Ceramics*, American Chemical Society, 2001.

Lu, H. Y., *Introduction to Ceramic Science*, Marcel Dekker, 1996.

Musikant, S., *What Every Engineer Should Know About Ceramics*, Marcel Dekker, 1991.

Nanoceramics, Institute of Materials, 1993.

Pfaender, H. G. (ed.), *Schott Guide to Glass*, Chapman & Hall, 1996.

Phillips, G. C., *A Concise Introduction to Ceramics*, Van Nostrand Rheinhold, 1991.

Pierson, H. O., *Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes: Properties, Processing and Applications*, Noyes Pub., 1993.

Prelas, M. A., Popovichi, G. y Bigelow, L. K. (eds.), *Handbook of Industrial Diamonds and Diamond Films*, Marcel Dekker, 1998.

Richerson, D. W., *Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and Use in Design*, 2a. ed., Marcel Dekker, 1992.

Schwartz, M. M. (ed.), *Handbook of Structural Ceramics*, McGraw-Hill, 1992.

Vincenzini, P., *Fundamentals of Ceramic Engineering*, Elsevier, 1991.

Wilks, J. y Wilks, E., *Properties and Applications of Diamond*, Butterworth-Heinemann, 1991.

PREGUNTAS DE REPASO

8.1 Compare las diferencias principales entre las propiedades de los cerámicos y las de los metales y plásticos.

8.2 Liste los tipos principales de cerámicos que son útiles en las aplicaciones de ingeniería.

8.3 ¿De qué están constituidos los siguientes materiales? *(a)* carburos, *(b)* cermets y *(c)* sialón.

8.4 Describa las principales limitaciones de los cerámicos.

8.5 ¿Qué es la porcelana?
8.6 ¿Qué es el vidrio? ¿Por qué se dice que es un material superenfriado?
8.7 ¿Qué es la desvitrificación?
8.8 Liste los principales tipos de vidrio y sus aplicaciones.
8.9 ¿Qué es la fatiga estática?
8.10 Describa los principales usos del grafito.
8.11 ¿Cuál es la importancia de la Al_2O_3 en este capítulo?
8.12 ¿Cómo se producen los cerámicos de alúmina?
8.13 ¿Cuál es la diferencia entre un carburo y un nitruro?
8.14 ¿Qué características de la zirconia parcialmente estabilizada la diferencian de los demás cerámicos?
8.15 ¿El diamante es un cerámico? ¿Por qué sí o por qué no?
8.16 ¿Qué es una bola de Bucky?
8.17 ¿Cuáles son los principales usos del diamante?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

8.18 Explique por qué los cerámicos son más débiles a tensión que a compresión.
8.19 ¿Cuáles son las ventajas de los cermets? Sugiera aplicaciones distintas de las proporcionadas en el texto.
8.20 Explique por qué la conductividad eléctrica y térmica de los cerámicos disminuye con el aumento de porosidad.
8.21 Explique por qué los datos de las propiedades mecánicas en la tabla 8.2 tienen una gama tan amplia. ¿Qué significa en la práctica de la ingeniería?
8.22 ¿Qué razones puede imaginar que promuevan el desarrollo del diamante sintético?
8.23 Explique por qué las propiedades mecánicas de los cerámicos son generalmente mejores que las de los metales.
8.24 ¿Cómo se puede aumentar la tenacidad de los cerámicos?
8.25 Mencione y describa aplicaciones en las que la fatiga estática puede ser importante.
8.26 ¿Cómo afecta la porosidad a las propiedades mecánicas de los cerámicos para su uso en cubiertas superiores de estufas? ¿Por qué?
8.27 ¿Qué propiedades son importantes al hacer cerámicos resistentes al calor para su uso en las cubiertas superiores de las estufas? ¿Por qué?
8.28 Describa las diferencias entre las propiedades de los vidrios y las de los cerámicos.
8.29 En la actualidad existe una gran variedad de vidrios. ¿A qué se debe?
8.30 ¿Cuál es la diferencia entre la estructura del grafito y la del diamante? ¿Es importante? Explique su respuesta.
8.31 ¿Qué materiales son adecuados para su uso como tazas de café? Explique su respuesta.
8.32 Se dice que el óxido de aluminio y la zirconia parcialmente estabilizada tienen una apariencia blanca. ¿Se pueden colorear? Si es así, ¿cómo lo haría?
8.33 Se sabe que los cerámicos y las fundiciones metálicas (parte II) son más resistentes a compresión que a tensión. ¿Qué razones hay para estos comportamientos?
8.34 ¿Por qué la resistencia de una pieza de cerámico depende de su tamaño?
8.35 En viejos castillos e iglesias en Europa, las ventanas de vidrio muestran ondas pronunciadas y son más gruesas en la parte inferior que en la parte superior. Explique por qué ocurrió.
8.36 Los cerámicos son duros y resistentes a compresión y al corte. ¿Entonces por qué no se utilizan como clavos u otros sujetadores?
8.37 En el texto se indicó que los cerámicos tienen una gama más amplia de resistencias a la tensión que los metales. Liste las razones por las que es así, con respecto tanto a las propiedades del cerámico que provocan las variaciones como a las dificultades para obtener resultados repetibles.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

8.38 Si un cerámico totalmente denso tiene las propiedades de UTS_o = 180 MPa y E_o = 300 GPa, ¿cuáles son estas propiedades a 20% de porosidad para valores de n = 4, 5, 6 y 7, respectivamente?
8.39 Grafique los valores de UTS, E y k para cerámicos en función de la porosidad P; describa y explique las tendencias que observa en su comportamiento.

8.40 ¿Cuál sería el esfuerzo a la tensión y el módulo de elasticidad del cerámico en el problema 8.38 para porosidades de 10% y 30% para los cuatro valores proporcionados de n?

8.41 Calcule las conductividades térmicas de cerámicos con porosidades de 10%, 20% y 30% para $k_o = 0.7$ W/m • K.

8.42 Un cerámico tiene $k_o = 0.65$ W/m • K. Si se moldea en un cilindro con una distribución de porosidad dada por $P = 0.1(x/L)(1 - x/L)$, en la que x es la distancia de un extremo del cilindro y L es la longitud total del cilindro, trace la porosidad en función de distancia, evalúe la porosidad promedio y calcule la conductividad térmica promedio.

8.43 Se puede demostrar que el peso mínimo de una columna que soporta una determinada carga depende de la proporción de la rigidez del material con la raíz cuadrada de su densidad. Grafique esta propiedad para un cerámico en función de la porosidad.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

8.44 Liste las piezas de cerámico que puede encontrar en su casa y en su auto. Explique por qué están hechas de cerámico.

8.45 Suponga que trabaja en ventas de artículos técnicos y está totalmente familiarizado con todas las ventajas y limitaciones de los cerámicos. ¿En cuál de los mercados que utilizan materiales no cerámicos cree que se pueda introducir el cerámico? ¿Qué diría a sus clientes potenciales durante sus visitas de ventas? ¿Qué tipo de preguntas cree que harían?

8.46 Describa las aplicaciones en las que sería deseable el material de cerámico con un coeficiente de dilatación térmica casi igual a cero.

8.47 El módulo de elasticidad de los cerámicos se mantiene en gran parte a temperaturas elevadas. ¿Qué aplicaciones de ingeniería podrían beneficiarse de esta característica?

8.48 Describa y trate los factores que se considerarían al reemplazar un componente metálico por uno de cerámico.

8.49 Consiga algunos datos de la bibliografía disponible y demuestre cuantitativamente el efecto de la temperatura en la resistencia y el módulo de elasticidad de varios cerámicos. Comente en qué se diferencia la forma de estas curvas de la de los metales.

8.50 Supóngase que la viga en voladizo del problema cuantitativo 3.16 en el capítulo 3 es de cerámico. ¿Cuán diferente sería su respuesta al compararla con la de una viga hecha de metal? Explíquelo con claridad dando varios ejemplos.

8.51 En la sección 8.4.1 se hizo notar que existen varios tipos básicos de vidrios disponibles. Realice un estudio con base en la bibliografía y prepare una tabla de estos vidrios indicando varias propiedades mecánicas, físicas y ópticas.

8.52 Se están considerando los pistones de cerámico para motores de combustión de alta velocidad. Liste las ventajas y desventajas que tendrían respecto de esta aplicación.

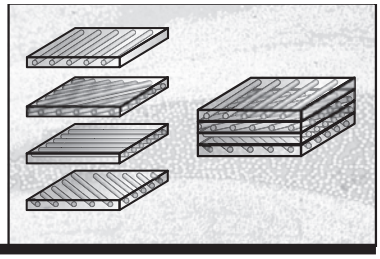
8.53 Los utensilios de cocina Pyrex presentan un fenómeno único: funcionan bien durante una gran cantidad de ciclos y después se desintegran en muchos pedazos. Investigue este fenómeno, liste las causas probables y hable sobre los factores de manufactura que pueden resolver o contribuir a dichas imperfecciones.

8.54 Se ha observado que la resistencia de los materiales frágiles (como el cerámico y los vidrios) es muy sensible a los defectos superficiales como las raspaduras (sensibilidad a muescas). Consiga algunas piezas de estos materiales, ráspelas, pruébelas sujetándolas cuidadosamente en una prensa de banco y dóblelas. Comente sus observaciones.

CAPÍTULO

9

Materiales compósitos: estructura, propiedades generales y aplicaciones



9.1 Introducción 238
9.2 Estructura de los plásticos reforzados 239
9.3 Propiedades de los plásticos reforzados 244
9.4 Aplicaciones de los plásticos reforzados 248
9.5 Compósitos de matriz metálica 251
9.6 Compósitos de matriz cerámica 253
9.7 Otros compósitos 254

EJEMPLOS:

9.1 Escaleras de fibra de vidrio 249
9.2 Cascos militares y blindaje corporal de compósitos 250
9.3 *Calipers* de frenos de compósitos de matriz de aluminio 252

Con propiedades tan atractivas como en particular la relación de resistencia a peso y la de rigidez a peso, los plásticos reforzados y los compósitos se encuentran entre los materiales desarrollados más importantes. En este capítulo se describen:

- Estructura de los plásticos reforzados.
- Tipos de fibras reforzadas y materiales de la matriz y su función en las propiedades en general.
- Estructura y propiedades de los compósitos de matriz metálica y de matriz cerámica.
- Selección y aplicaciones de los plásticos reforzados y los compósitos.

9.1 Introducción

Un **material compósito** es una combinación de dos o más fases químicamente distintas e insolubles con una interfaz reconocible, de manera que sus propiedades y su desempeño estructural son superiores a las de sus componentes cuando actúan de modo independiente. A estas combinaciones se les llama **compósitos de matriz metálica** y **de matriz cerámica**. Como se muestra en la tabla 7.1, los refuerzos de fibra mejoran en gran medida la resistencia, rigidez y resistencia a la termofluencia de los plásticos, en especial sus relaciones de resistencia a peso y rigidez a peso. Se han descubierto cada vez más aplicaciones de los materiales compósitos en aeronaves (fig. 9.1), vehículos espaciales, estructuras submarinas, tubería, electrónica, automóviles, embarcaciones y productos deportivos.

El ejemplo más antiguo de compósitos, que se remonta al año 4000 a.C., es la adición de paja a la arcilla para construir chozas de adobe y ladrillos de uso estructural. En esta combinación, la paja es la fibra de refuerzo y la arcilla es la matriz. Otro ejemplo de material compósito es el concreto reforzado, que se desarrolló en el siglo XIX. De hecho, el concreto es un material compósito, que consta de cemento, arena y grava; sin embargo, por sí mismo es frágil y tiene poca o ninguna resistencia a la tensión; las varillas de acero aportan al compósito la resistencia necesaria.

En los términos más generales, los materiales compósitos pueden ser considerados como los que poseen una amplia variedad de materiales, como los cermets (sección 8.2), las aleaciones de dos fases (sección 4.2), los materiales naturales como la madera y los huesos, y los materiales reforzados y combinados, como las llantas de automóviles reforzadas con alambre de acero. Estos materiales también deben reconocerse como compósitos, incluso si en este capítulo no se hace énfasis en ellos.

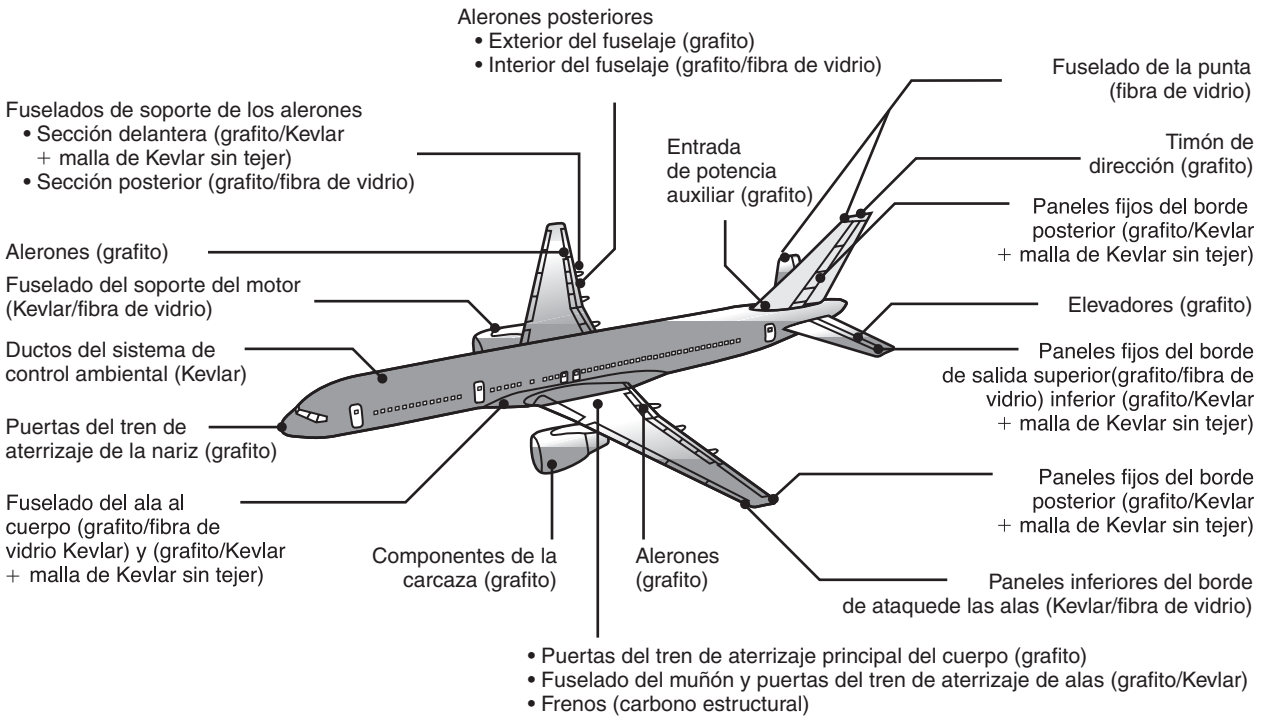


FIGURA 9.1 Aplicación de materiales compósitos avanzados en la aeronave comercial Boeing 757-200. *Fuente:* Cortesía de Boeing Commercial Airplane Company.

En este capítulo se describen la estructura de los materiales compósitos, los tipos y las características de las fibras de reforzadas utilizadas y sus principales aplicaciones. En el capítulo 19 se abordan el procesamiento y la forma de los materiales compósitos.

9.2 Estructura de los plásticos reforzados

Los **plásticos reforzados**, también conocidos como **compósitos de matriz polimérica** (PMC, por sus siglas en inglés) y **plásticos reforzados con fibra** (FRP), están constituidos por **fibras** (fase discontinua o dispersa) en una **matriz** polimérica (fase continua), como se muestra en la figura 9.2. Estas fibras son resistentes y rígidas (tabla 9.1) y presentan alta resistencia específica (relación de resistencia a peso) y rigidez específica (relación de rigidez a peso), como se observa en la figura 9.3. Además de la alta resistencia y rigidez específicas, las estructuras de plástico reforzado han mejorado la resistencia a la fatiga y tienen mayor tenacidad y resistencia a la termofluencia que las hechas de plásticos no reforzados. Dichas estructuras son relativamente fáciles de diseñar, fabricar y reparar.

Las fibras en los plásticos reforzados por sí mismas tienen poco valor estructural; presentan rigidez en su dirección longitudinal pero no ofrecen rigidez ni resistencia transversal. La matriz plástica es menos fuerte y menos rígida que la fibra, pero es más tenaz y con frecuencia más inerte químicamente. Los plásticos reforzados poseen las ventajas de los dos componentes. Por lo general, el porcentaje de fibras (por volumen) en los plásticos reforzados varía entre 10% y 60%. De hecho, el porcentaje de fibra en una matriz se limita por la distancia promedio que hay entre las fibras o partículas adyacentes. El

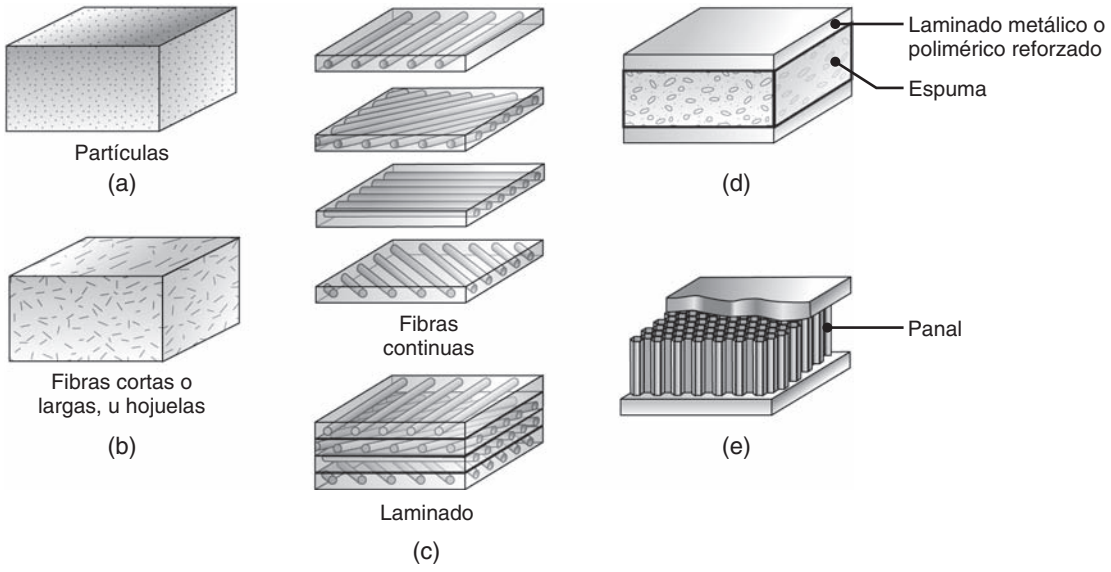


FIGURA 9.2 Esquema de los métodos para reforzamiento de plásticos (la matriz) con *(a)* partículas, *(b)* fibras cortas o largas, u hojuelas y *(c)* a todo lo largo *(e)* de fibras continuas. Las estructuras laminadas mostradas en *(d)* se pueden obtener mediante capas de fibras continuas o estructuras tipo sándwich utilizando un núcleo de espuma o tipo panal (ver también la fig. 16.50).

TABLA 9.1

Tipos y características generales de los materiales compósitos

Material	Características
Fibras	
Vidrio	Alta resistencia, baja rigidez, alta densidad; costo más bajo; tipos comúnmente utilizados: E (aluminoborosilicato de calcio) y S (magnesia-aluminosilicato).
Grafito	Disponible como alto módulo o alta resistencia; costo bajo; menos denso que el vidrio.
Boro	Alta resistencia y rigidez; la densidad más alta; el costo más alto; tiene filamento de tungsteno en el centro.
Aramidas (Kevlar)	La relación de resistencia a peso más alta de todas las fibras; alto costo.
Otras fibras	Nailon, carburo de silicio, nitruro de silicio, óxido de aluminio, carburo de boro, nitruro de boro, carburo de tantalio, acero, tungsteno, molibdeno.
Materiales para matrices	
Termofijos	Epóxico y poliéster, con el formador más utilizado; otros son los fenólicos, fluorocarbonos, polietersulfona, silicio y polímidas.
Termoplásticos	Polieteretercetona, más tenaz que los termofijos pero de menor resistencia a la temperatura.
Metales	Aluminio, aluminio y litio, magnesio y titanio; las fibras son grafito, óxido de aluminio, carburo de silicio y boro.
Cerámicas	Carburo de silicio, nitruro de silicio, óxido de aluminio y mulita; las fibras son varios cerámicos.

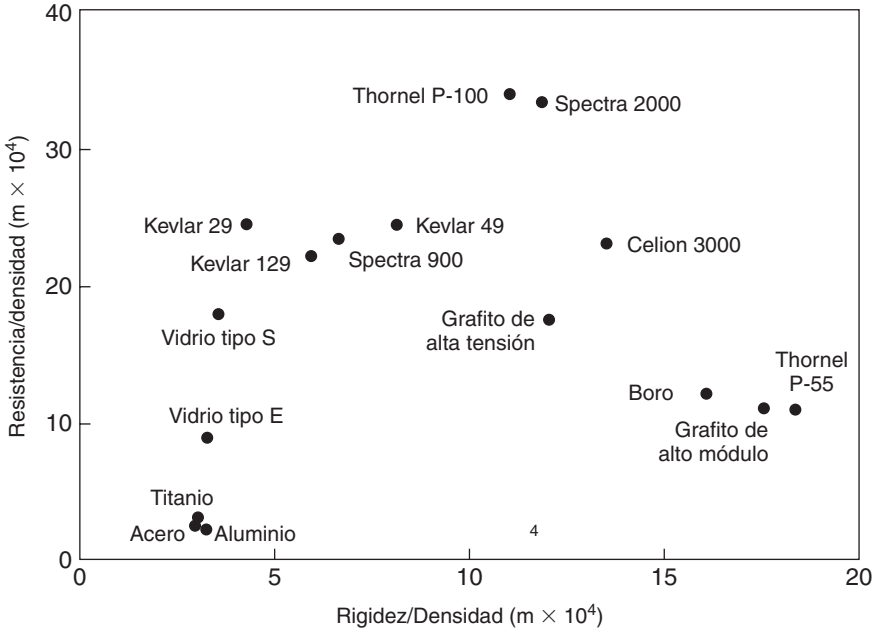


FIGURA 9.3 Resistencia a la tensión específica (relación resistencia a la tensión a densidad) y módulo de tensión específico (relación módulo de elasticidad a densidad) para varias fibras utilizadas en plásticos reforzados. Obsérvese la amplia gama de resistencias y rigideces específicas disponibles.

contenido práctico más alto de fibra es de 65%, pues, por lo general, porcentajes superiores dan como resultado propiedades estructurales inferiores.

Cuando se utiliza más de un tipo de fibra en un plástico reforzado, al compósito se le conoce como **híbrido**. Los híbridos tienen mejores propiedades, pero son más costosos; en la actualidad se desarrollan con refuerzo de fibra de vidrio o de carbono para su uso continuo en temperaturas de hasta 300 °C (550 °F). Sin embargo, es común que estas fibras sean frágiles, abrasivas y carentes de tenacidad, además de que pueden degradarse químicamente al exponerse al ambiente. Por otra parte, como se observa en la parte inferior de la tabla 9.2, las propiedades de las fibras pueden variar de modo significativo, según la calidad del material y el método de procesamiento.

9.2.1 Fibras reforzadas

Las fibras reforzadas para compósitos de matriz polimérica son el vidrio, grafito, aramidas y boro (tabla 9.2). A continuación se describen sus propiedades.

Fibras de vidrio. Son las que más se utilizan y las menos costosas. Al material compósito se le conoce como **plástico reforzado con fibra de vidrio** (GFRP, por sus siglas en inglés) y puede contener entre 30% y 60% de fibras de vidrio en volumen. Las fibras se producen estirando vidrio fundido a través de pequeñas aberturas en una matriz o dado de platino (ver la sección 17.10.3). Después el vidrio fundido se alarga mecánicamente, se enfría y se enreda en una bobina. Puede aplicarse un recubrimiento o barniz de protección para facilitar su paso a través de la maquinaria. Las fibras de vidrio se tratan con **silano** (un hidruro de silicio) para mejorar la humectación y unión entre la fibra y la matriz.

Los tipos principales de fibras de vidrio son:

- **Tipo E:** vidrio de aluminoborosilicato de calcio, el tipo más comúnmente utilizado.
- **Tipo S:** vidrio de magnesia y aluminosilicato, que ofrece mayor resistencia y rigidez, aunque a mayor costo.
- **Tipo E-CR:** fibra de vidrio de alto rendimiento, que ofrece mayor resistencia a temperaturas elevadas y corrosión ácida que el vidrio tipo E.

TABLA 9.2

Propiedades características de las fibras de refuerzo

Tipo	Esfuerzo de tracción (MPa)	Módulo elástico (GPa)	Densidad (kg/m^3)	Costo relativo
Boro	3500	380	2600	El más alto
Carbono				
Alta resistencia	3000	275	1900	Bajo
Alto módulo	2000	415	1900	Bajo
Vidrio				
Tipo E	3500	73	2480	El más bajo
Tipo S	4600	85	2540	El más bajo
Kevlar				
29	2800	62	1440	Alto
49	2800	117	1440	Alto
129	3200	85	1440	Alto
Nextel				
312	1630	135	2700	Alto
610	2770	328	3960	Alto
Spectra				
900	2270	64	970	Alto
1000	2670	90	970	Alto
2000	3240	115	970	Alto
Alúmina (Al_2O_3)	1900	380	3900	Alto
Carburo de silicio	3500	400	3200	Alto

Nota: Estas propiedades varían significativamente según el material y el método de elaboración.

Fibras de grafito. Las fibras de grafito (fig. 9.4a), aunque son más costosas que las de vidrio, ofrecen una combinación de baja densidad, alta resistencia y alta rigidez; el producto se conoce como **plástico reforzado con fibra de carbono** (CFRP, por sus siglas en inglés). Todas las fibras de grafito se producen mediante la **pirólisis** de **precursores** orgánicos, comúnmente el *poliacrilonitrilo* (PAN), debido a su bajo costo, aunque también pueden utilizarse el *rayón* y la *brea* (residuo de los alambiques desintegradores en la refinación de petróleo). La pirólisis es el proceso de inducir cambios químicos mediante calor; por ejemplo, al quemar un tramo de hilo y hacer que el material se carbonice y cambie su color a negro. Con el PAN, las fibras se entrecruzan parcialmente a una temperatura moderada (para evitar su fusión en pasos posteriores del procesamiento) y se

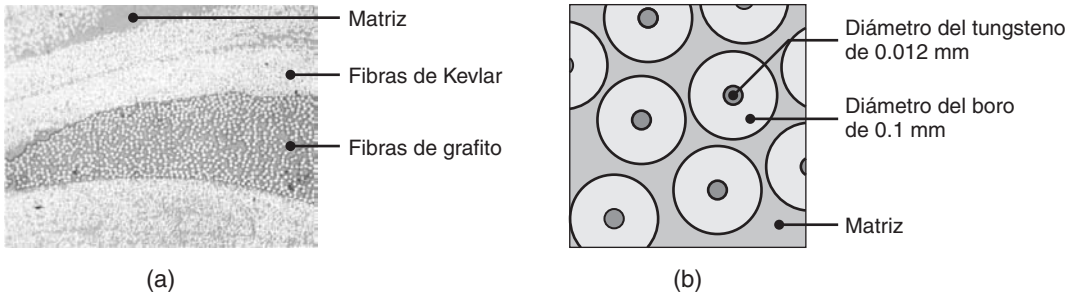


FIGURA 9.4 *(a)* Corte transversal de una raqueta de tenis que muestra fibras de refuerzo de grafito y aramida (Kevlar). *Fuente:* Cortesía de J. Dvorak, Mercury Marine Corporation y F. Garrett, Wilson Sporting Goods Co. *(b)* Corte transversal de material compósito reforzado con fibras de boro.

estiran al mismo tiempo. En este punto, las fibras son *carburizadas*; éstas se exponen a temperatura elevada para que expelan el hidrógeno (deshidrogenación) y el nitrógeno (desnitrogenación) del PAN. Las temperaturas para carburar van hasta 1500 °C (2730 °F), aproximadamente, y para grafitizar hasta 3000 °C (5400 °F).

Aunque es frecuente utilizar ambos conceptos de manera indistinta, la diferencia entre *carbono* y *grafito* depende de la temperatura de la pirólisis y la pureza del material. En general, las fibras de carbono tienen de 80% a 95% de carbono, en tanto que las fibras de grafito tienen por lo común más de 99% de carbono. Una fibra de carbono típica contiene carbono amorfo (no cristalino) y grafito (carbono cristalino). Estas fibras se clasifican por su módulo elástico, que va de 35 hasta 800 GPa: *módulo bajo, intermedio, alto* y *muy alto*. Las resistencias a la tensión van de 250 a 2600 MPa (tabla 9.2).

Fibras conductivas de grafito. Estas fibras se producen para hacer posible que los componentes de los plásticos reforzados mejoren la conductividad eléctrica y térmica. Estas fibras se recubren con un metal (por lo común, níquel) mediante un proceso continuo de electrodeposición; en general, el recubrimiento es de 0.5 μm de espesor en un núcleo de fibra de grafito con diámetro de 7 μm. Las fibras conductivas están disponibles en segmentos o en formas continuas y se incorporan directamente en las piezas de plástico moldeadas por inyección. Las aplicaciones incluyen blindaje electromagnético y de radiofrecuencia y protección contra descargas eléctricas.

Fibras poliméricas. Las fibras poliméricas se pueden fabricar de nailon, rayón, acrílicos y aramidas; las más comunes son las **fibras aramídicas**. Las aramidas (sección 7.6) se encuentran entre las fibras más tenaces (**Kevlar**) y presentan resistencias específicas muy altas (fig. 9.3); pueden someterse a cierta deformación plástica antes de fracturarse y, por ello, tienen una tenacidad más alta que las fibras frágiles. Sin embargo, las aramidas absorben humedad (son higroscópicas), lo que degrada sus propiedades y complica su aplicación.

Otra fibra de polietileno de alto rendimiento es *Spectra* (marca comercial), que tiene un peso molecular ultra elevado y una fuerte orientación molecular en cadena. Posee mejor resistencia a la abrasión y a la fatiga por flexión que las fibras aramídicas, a un costo similar; además, debido a su densidad inferior (970 kg/m^3), su resistencia y su rigidez específicas son más altas. Sin embargo, en comparación con otros polímeros, padece un punto de fusión bajo y características de adhesión pobres. Entre las fibras más recientes está *Nextel* (marca comercial).

Las fibras poliméricas se producen mediante dos procesos: torcido fundido y torcido en seco. El **torcido fundido** involucra la extrusión de un polímero líquido a través de pequeños orificios en una matriz (*torcedores*). Las fibras se enfrían antes de reunirlas y enrollarlas en bobinas. Estas fibras pueden estirarse para orientar y reforzar aún más el polímero en las fibras. En el **torcido en seco**, el polímero se disuelve en una solución líquida para formar un cristal líquido parcialmente orientado. Conforme el polímero pasa a través del torcedor, se orienta más y, en este punto, las fibras se lavan, se secan y se bobinan. Las aramidas se orientan en solución y se orientan totalmente cuando pasan a través del torcedor y, por lo tanto, ya no requieren estirado posterior.

Fibras de boro. Consisten en el depósito de boro (mediante técnicas de deposición química de vapor) sobre fibras de tungsteno (fig. 9.4b) o de carbono. Las fibras de boro tienen propiedades deseables, como alta resistencia y rigidez, tanto a la tensión como a la compresión, y resistencia a altas temperaturas. Sin embargo, debido a la alta densidad del tungsteno, son pesadas y costosas.

Otras fibras. Otras fibras utilizadas en compósitos son carburo de silicio, nitruro de silicio, óxido de aluminio, zafiro, acero, tungsteno, molibdeno, carburo de boro, nitruro de boro y carburo de tantalio. Las **triquitas** (***whiskers***) también se utilizan como fibras de refuerzo (ver la sección 22.10); son pequeños cristales en forma de aguja que crecen

de 1 a 10 μm (40 a 400 μpulgadas) de diámetro con altas relaciones de aspecto (la relación de longitud de la fibra a su diámetro), que va de 100 a 15,000. Debido a su pequeño tamaño, las triquitas no tienen imperfecciones o las que contienen no afectan significativamente su resistencia, que se aproxima a la resistencia teórica del material (efecto de tamaño). Los módulos elásticos de las triquitas varían entre 400 y 700 GPa y su resistencia a la tensión es de 15 a 20 GPa.

9.2.2 Tamaño y longitud de la fibra

Las fibras son muy fuertes y rígidas bajo tensión. La razón es que sus moléculas se orientan en dirección longitudinal y sus secciones transversales son tan pequeñas (generalmente menos de 0.01 mm [0.0004 pulgadas] de diámetro) que la probabilidad de que existan defectos en las fibras es baja. Por ejemplo, las fibras de vidrio pueden tener resistencias a la tensión tan elevadas como 4600 MPa (650 ksi), por lo que la resistencia del vidrio en forma volumétrica (sección 8.4) es mucho menor.

Por lo general, las fibras se clasifican en **cortas** (**discontinuas**) o **largas** (**continuas**), de acuerdo con la siguiente distinción: en cierto tipo de fibra, si las propiedades mecánicas mejoran por el aumento de la longitud promedio, entonces se le conoce como *fibra corta*; si no ocurre dicha mejora, se le llama *fibra larga*. Es común que las fibras cortas tengan relaciones de aspecto entre 20 y 60, en tanto que las fibras largas poseen entre 200 y 500.

Los elementos de refuerzo también pueden tener forma de *segmentos de fibra, partículas* u *hojuelas*, o forma de *fibra* continua (hebra de fibras ligeramente torcida), *tela tejida* (similar a la de la ropa), *hilo* (hebra torcida) y *mallas* de varias combinaciones. También se encuentran disponibles varios hilos híbridos.

9.2.3 Materiales para las matrices

En los plásticos reforzados, la matriz tiene tres funciones principales:

1. Mantener las fibras en su lugar y transferir los esfuerzos a las mismas mientras soportan la mayor parte de la carga.
2. Proteger las fibras contra daños físicos y del ambiente.
3. Reducir la propagación de grietas en el compósito por medio de mayor ductilidad y rigidez de la matriz plástica.

Por lo general, los materiales de las matrices son *termoplásticos* o *termofijos* y es común que consistan en epóxicos, poliésteres, fenólicos, fluorocarbonos, polietersulfonas o silicio. Los más utilizados son los epóxicos (80% de todos los plásticos reforzados) y los poliésteres (menos costosos que los epóxicos). Las poliimidas, que resisten la exposición a temperaturas que exceden 300 °C (575 °F), se siguen desarrollando para usarse como matrices de fibras de grafito. Algunos termoplásticos, como la polieteretercetona (PEEK, por sus siglas en inglés), también se utilizan como materiales para matrices; por lo general, tienen mayor tenacidad que los termofijos, pero su resistencia a la temperatura es inferior, limitándose a entre 100 °C y 200 °C (de 200 °F a 400 °F).

9.3 Propiedades de los plásticos reforzados

Las propiedades mecánicas y físicas de los plásticos reforzados dependen del tipo, la forma y la orientación del material de refuerzo, la longitud de las fibras y la fracción (porcentaje) del volumen del material de refuerzo. Las fibras cortas son menos efectivas que las largas (fig. 9.5) y sus propiedades son fuertemente afectadas por la temperatura

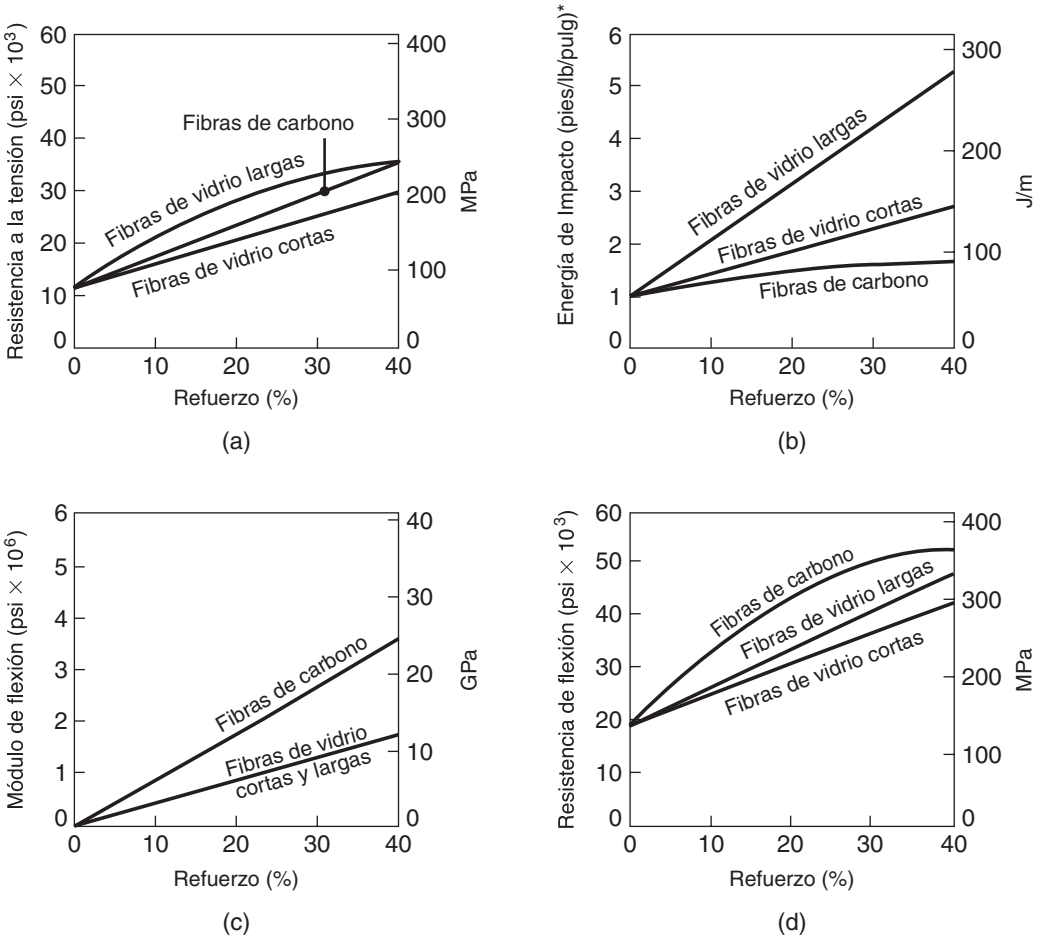
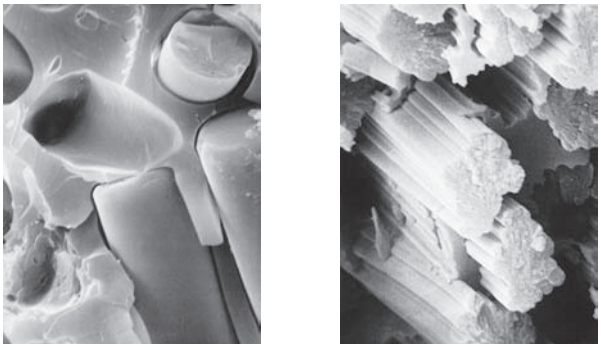


FIGURA 9.5 Efecto del tipo de fibra sobre diferentes propiedades del nailon reforzado con fibras (6,6). *Fuente:* Cortesía de la NASA.
* En todas las gráficas en la ordenada derecha no son señaladas las unidades: MPa, J/m, GPa y Mpa respectivamente.

y el tiempo bajo carga. Las fibras largas transmiten mejor la carga a través de la matriz, por lo que suelen usarse en aplicaciones críticas, en especial a temperaturas elevadas. Las propiedades físicas de los plásticos reforzados y su resistencia a la fatiga, termofluencia y desgaste dependen en gran medida del tipo y la cantidad de refuerzo. Los compósitos pueden diseñarse a la medida para aportar propiedades específicas (como permeabilidad y estabilidad dimensional), facilitar el procesamiento y reducir los costos de producción.

Un factor crítico en los plásticos reforzados es la resistencia de la unión entre la fibra y la matriz polimérica, porque la carga se transmite a través de la interfaz. Una unión de interfaz débil hace que se **extraiga la fibra** y que se **deslamine** la estructura, en especial en condiciones ambientales adversas. Se puede mejorar la adhesión a la interfaz mediante tratamientos especiales a la superficie, como recubrimientos y agentes de acoplamiento. Por ejemplo, las fibras de vidrio se tratan con **silano** (un hidruro de silicio) que mejora la humectación y unión entre la fibra y la matriz. Se puede apreciar la importancia de una unión apropiada al revisar las superficies de fractura de los plásticos reforzados, como se muestra en las figuras 9.6a y b. Por ejemplo, obsérvese la separación entre las fibras y la matriz; es obvio que una mejor adhesión entre ellas mejora la resistencia total del compósito.



(a) (b)

FIGURA 9.6 *(a)* Superficie de fractura de un compósito epóxico reforzado con fibras de vidrio. Las fibras son de 10 μm (400 micropulgadas) de diámetro y tienen orientación aleatoria. *(b)* Superficie fracturada de un compuesto epóxico reforzado con fibras de grafito. Las fibras, de 9 μm a 11 μm de diámetro, están en grupos, todas alineadas en la misma dirección. *Fuente:* Cortesía de L. J. Broutman.

Por lo general, se obtienen más altas rigidez y resistencia de los plásticos reforzados cuando las fibras se alinean en la dirección de la fuerza de tensión. Entonces, el compósito es altamente anisotrópico (fig. 9.7). Por consiguiente, otras propiedades como la rigidez, la resistencia a la termofluencia, las conductividades térmica y eléctrica y la dilatación térmica también son anisotrópicas. Las propiedades transversales de tal estructura reforzada unidireccionalmente, son mucho más bajas que las propiedades longitudinales. Por ejemplo, obsérvese qué fuerte es la cinta para empaque reforzada con fibras cuando se somete a tensión, y sin embargo qué fácil es romperla cuando se jala a lo ancho.

Debido a que se trata de un material ingenieril, a una pieza de plástico reforzado se le puede proporcionar una configuración óptima para un servicio específico. Por ejemplo, si la pieza se va a someter a fuerzas en diferentes direcciones (como en recipientes

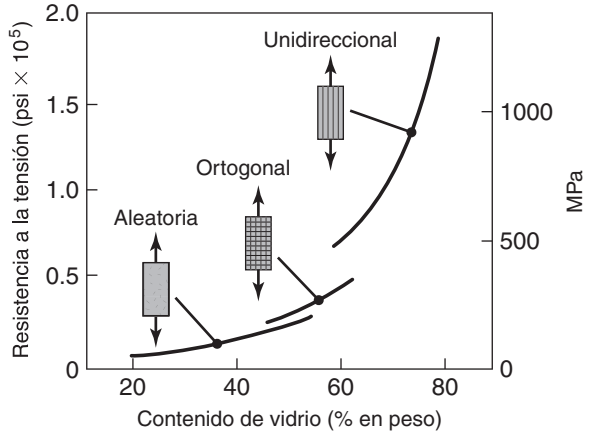


FIGURA 9.7 Resistencia a la tensión del poliéster reforzado con vidrio en función del contenido de fibras y dirección de las fibras en la matriz.

presurizados de pared delgada), *(a)* las fibras pueden entrecruzarse en la matriz, o *(b)* las capas de fibras orientadas en diferentes direcciones pueden integrarse como una lámina que tenga propiedades mejoradas en más de una dirección. (Ver el *devanado de filamentos*, sección 18.12.2.) Igualmente, se ha producido un volante de rotor de compósito mediante una técnica de tejido especial en la que las fibras de refuerzo (vidrio tipo E) se alinean en la dirección tanto radial como tangencial. Diseñado para sistemas de almacenamiento de energía mecánica en vehículos eléctricos e híbridos de bajas emisiones, el volante puede operar a velocidades de hasta 50,000 rpm.

9.3.1 Resistencia y módulo elástico de los plásticos reforzados

La resistencia y el módulo elástico de un plástico reforzado con fibras unidireccionales pueden determinarse con base en la resistencia y los módulos, tanto de las fibras como de la matriz, y en la fracción de volumen de las fibras dentro del compósito. En las siguientes ecuaciones, *c* se refiere al compósito, *f* a la fibra y *m* a la matriz. La fibra (P_f) y la matriz (P_m) comparten la carga total (P_c) en el compósito. Por lo que,

$$P_c = P_f + P_m \tag{9.1}$$

que puede escribirse como

$$\sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \tag{9.2}$$

en la que A_c, A_f y A_m son las áreas transversales del compósito, la fibra y la matriz, respectivamente; por lo que $A_c = A_f + A_m$. Ahora denotemos x como la fracción de área de las fibras en el compósito. (Obsérvese que x también representa la fracción de volumen, debido a que las fibras son uniformemente longitudinales en la matriz.) La ecuación 9.2 puede escribirse de la siguiente manera:

$$\sigma_c = x\sigma_f + (1 - x)\sigma_m \tag{9.3}$$

Ahora ya se puede calcular la fracción de la carga total que soportan las fibras. Primero, obsérvese que en el compósito bajo cierta carga de tensión, las deformaciones que las fibras y la matriz sostienen son las mismas (es decir, $e_c = e_f = e_m$). De acuerdo con la sección 2.2, a continuación recuérdese que

$$e = \frac{\sigma}{E} = \frac{P}{AE}$$

En consecuencia,

$$\frac{P_f}{P_m} = \frac{A_f E_f}{A_m E_m} \tag{9.4}$$

Puesto que se conocen las cantidades correspondientes para una situación específica, al utilizar la ecuación 9.1 se puede encontrar la fracción P_f/P_c. Después, mediante las relaciones anteriores, el módulo elástico (E_c) del compósito puede calcularse reemplazando σ en la ecuación 9.3 por E. Por lo que,

$$E_c = xE_f + (1 - x)E_m \tag{9.5}$$

Como ejemplo, supóngase que un plástico reforzado grafito-epóxico con fibras longitudinales contiene 20% de fibras de grafito. El módulo elástico de la fibra es 300 GPa, y el de la matriz epóxica es 100 GPa. Calcúlense el módulo elástico del compósito y la fracción de la carga soportada por las fibras. Los datos proporcionados son $x = 0.2$, $E_f = 300$ GPa y $E_m = 100$ GPa. Utilizando la ecuación 9.5,

$$E_c = 0.2(300) + (1 - 0.2)100 = 60 + 80 = 140 \text{ GPa}.$$

La fracción de carga P_f/P_m se puede obtener a partir de la ecuación 9.4 como:

$$\frac{P_f}{P_m} = 0.2\frac{(300)}{0.8(100)} = 0.75$$

Debido a que

$$P_c = P_f + P_m \quad \text{y} \quad P_m = \frac{P_f}{0.75}$$

Por lo tanto,

$$P_c = P_f + \frac{P_f}{0.75} = 2.33P_f, \quad \text{o} \quad P_f = 0.43P_c$$

Por lo tanto, las fibras soportan 43% de la carga, aun cuando ocupan sólo 20% del área transversal (es decir, volumen) del compósito.

9.4 Aplicaciones de los plásticos reforzados

La primera aplicación en ingeniería de los plásticos reforzados ocurrió en 1907, en un tanque resistente a ácidos hecho de una resina fenólica con fibras de asbesto. En la década de 1920 se desarrolló la *fórmica* (marca comercial), que se utilizaba comúnmente para cubiertas de mostradores. Los epóxicos se utilizaron por primera vez como material para matrices en la década de 1930. A principios de la década de 1940, se hacían embarcaciones con fibra de vidrio y se utilizaban plásticos reforzados para aeronaves, equipo eléctrico y productos deportivos. En la década de 1970 se iniciaron desarrollos importantes en compósitos, lo que dio como resultado materiales hoy conocidos como **compósitos avanzados**. Existen plásticos híbridos reforzados con fibras de vidrio o de carbono para aplicaciones en temperatura elevada, con un uso continuo hasta de 300 °C (550 °F), aproximadamente.

Es común utilizar plásticos reforzados en aeronaves comerciales y militares, componentes para cohetes, aspas de helicópteros, carrocerías de automóviles, ballestas, flechas impulsoras, tubos, escaleras, recipientes de presión, artículos deportivos, cascos de botes y muchas otras estructuras y componentes. Las aplicaciones incluyen componentes en las aeronaves comerciales DC-10, L-1011 y el Boeing 727, 757, 767 y 777; este último tiene compósitos en 9% de su peso total, el triple que en aviones anteriores de Boeing. Las vigas de piso, los tableros y la mayor parte de la cola vertical y horizontal están hechos de materiales compósitos.

Como resultado de los ahorros en peso, los plásticos reforzados han reducido 2% el consumo de combustible. El avión de reacción A380 jumbo de Airbus recién diseñado, con una capacidad de 550 a 700 pasajeros y que entraría en servicio en 2006, tiene estabilizadores horizontales, alerones, cajas de alas y bordes de ataque, las ménsulas secundarias de montaje del fuselaje y la estructura de la cubierta hechos de compósitos con fibras de carbono, resinas termofijas y termoplásticos. El fuselaje superior está fabricado con capas alternas de aluminio y preimpregnados (*prepregs*) epóxicos reforzados con fibra de vidrio.

La estructura del avión de pasajeros Lear Fan 2100 está hecha casi totalmente de plástico reforzado con grafito y epóxico. Alrededor de 90% de la estructura de la aeronave *Voyager* de peso ligero, que dio vueltas a la Tierra sin cargar combustible, se hizo de plástico reforzado con carbono. La estructura contorneada del bombardero Stealth se fabricó con una serie de compósitos constituidos por carbono y fibras de vidrio, matrices de epóxico y resina, poliimidas de alta temperatura y otros materiales avanzados. Los compósitos de boro reforzados con fibra se utilizan en aeronaves militares, palos de golf, raquetas de tenis, cañas de pescar y tablas de *windsurf* (fig. 9.8). Un ejemplo más recien-

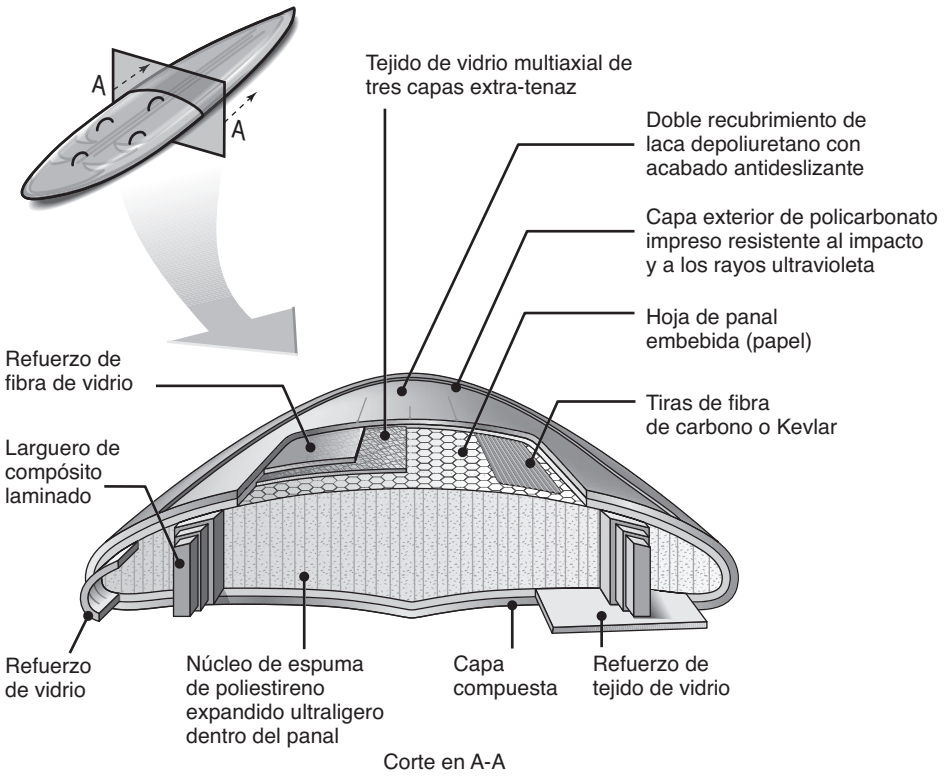


FIGURA 9.8 Corte transversal de una tabla de *windsurf* de compósito, ejemplo de construcción de materiales avanzados. *Fuente:* K. Easterling, *Tomorrow's Materials* (2ª. ed.), p. 133. Institute of Metals, 1990.

te es el desarrollo de un pequeño bote totalmente hecho de compósitos (diseño de catamarán de doble casco) para la Fuerza Naval de Estados Unidos, con capacidad de velocidades de 50 nudos (58 mph).

El procesamiento de los plásticos reforzados puede presentar desafíos significativos. Por consiguiente, se han desarrollado técnicas innovadoras para manufacturar piezas grandes y pequeñas, en particular por moldeo, formado, corte y ensamble. La inspección y las pruebas cuidadosas de plásticos reforzados son esenciales en aplicaciones críticas, para garantizar una buena unión entre la fibra de refuerzo y la matriz a través de toda la estructura. Sin embargo, en algunos casos el costo de inspección puede llegar a ser la cuarta parte del costo del producto compósito.

EJEMPLO 9.1 Escaleras de fibra de vidrio

El material tradicional para escaleras ha sido la madera o el aluminio. En parte debido a su peso, la escalera de madera proporciona al usuario una sensación de seguridad; no obstante, puede tener defectos internos y externos que, si no se detectan, podrían reducir significativamente su resistencia y, por lo tanto, comprometer la seguridad. Cuando la madera está seca, no conduce electricidad; sin embargo, cuando está húmeda sí lo hace. En consecuencia, una escalera de madera húmeda no debe entrar en contacto con el cableado eléctrico. Las escaleras de aluminio son ligeras y pueden diseñarse para ofrecer alta resistencia y rigidez (a pesar del módulo elástico relativamente bajo). Aunque conducen electricidad, duran más que las escaleras de madera y requieren menos mantenimiento.

Los materiales compósitos se utilizan ampliamente en la elaboración de escaleras con varios usos. La fibra de vidrio es la fibra de refuerzo más común, con epóxicos y poliésteres como materiales para la matriz. Estas escaleras tienen ventajas similares a las del aluminio y los electricistas las prefieren porque no conducen electricidad. Las escaleras reforzadas con fibra de vidrio tienen una sensación áspera, proporcionan al usuario una sensación de seguridad y pueden hacerse de varios colores.

Las escaleras de fibra de vidrio pueden absorber humedad y sufrir daños en la superficie cuando se exponen a la intemperie, en particular en climas cálidos y húmedos y con luz solar (sección 7.3). En consecuencia, sufren una pérdida de color y brillo y la superficie se torna más áspera, debido a la prominencia de la fibra por la erosión del material de la matriz y el *afloramiento* de fibras (exposición de la fibra). Estas escaleras pueden recubrirse con poliuretano para proteger la superficie. Es importante dar mantenimiento apropiado y revisar periódicamente las escaleras de fibra de vidrio.

EJEMPLO 9.2 Cascos militares y blindaje corporal de compósitos

El equipo de protección personal en la forma de blindaje corporal (chalecos antibalas) y cascos compósitos se ha difundido ampliamente en aplicaciones militares y policiacas. El blindaje corporal depende de las fibras tejidas de alta resistencia, que evitan la penetración de los proyectiles. Para detener una bala, un material compósito primero debe deformarla o achatarla; este proceso ocurre cuando la punta de la bala entra en contacto con la mayor cantidad posible de fibras individuales del compósito sin que éstas se separen. Por supuesto, el usuario del blindaje siente el impulso asociado con los proyectiles, pero un diseño satisfactorio retiene las balas y las esquirlas y evita heridas graves o mortales.

Existen dos tipos principales de blindajes corporales: el *blindaje blando*, que se basa en varias capas de fibras de alta resistencia tejidas y está diseñado principalmente para protección contra pistolas, y el *blindaje rígido*, que utiliza una placa metálica, cerámica o polimérica además de las fibras tejidas y cuyo propósito es proteger contra múltiples disparos de rifles y esquirlas. En la figura 9.9 se muestra el esquema de un blindaje corporal.

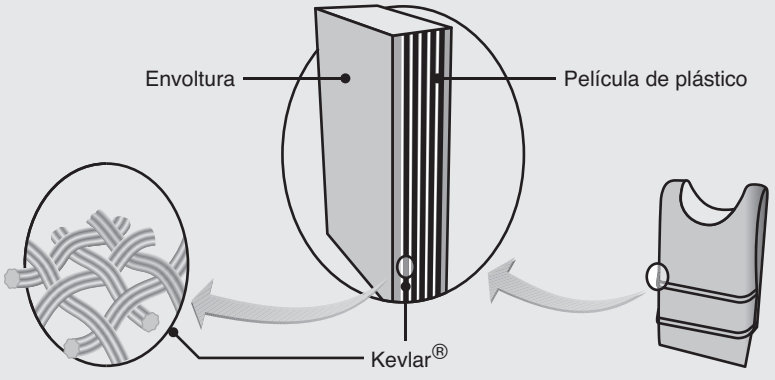


FIGURA 9.9 *(a)* Esquema de blindaje corporal que muestra las capas de fibras tejidas; *(b)* aplanado y contención de la bala de una pistola con blindaje corporal (chaleco anti-balas).

Se han utilizado varias mallas de fibra en blindajes corporales. Diversos proveedores emplean diferentes combinaciones de estas mallas y pueden incluir capas adicionales para proporcionar protección contra traumas contundentes. La primera fibra utilizada para blindajes corporales fue Kevlar 29 (una aramida), que se ha ido mejorando a lo largo de varias versiones. Otras formas incluyen Kevlar 49, Kevlar 129 y Kevlar Protera, cuyas resistencia a la tensión y capacidades de absorción de energía han mejorado con el desarrollo de procesos avanzados de torcido para producir las fibras. Las fibras aramídicas se utilizan comúnmente en blindajes corporales. La empresa Honeywell también produce un blindaje corporal con estas fibras, pero otros diseños, como la fibra aramida llamada TWARON de Akzo Noble, utilizan alrededor de mil filamentos finamente hilados que interactúan de manera recíproca para disipar la energía del impacto.

La fibra Spectra se utiliza en el compósito Spectra Shield para su uso en blindajes corporales. Una capa de Spectra Shield está constituida por dos capas unidireccionales de Spectra, arregladas para cruzarse entre sí a ángulos de 0 y 90 grados y mantenerse en su lugar por medio de una resina flexible. Las capas de fibra y resina se sellan entre dos hojas delgadas de película de polietileno, que es similar en apariencia a la envoltura de plástico para alimentos.

Los blindajes duros utilizan varios diseños, pero en general constan de placas de acero, cerámica (comúnmente óxido de aluminio y sílice) o polietileno, localizadas de modo estratégico para evitar la penetración de partículas de balas en áreas críticas. Los diseños que se evalúan en la actualidad utilizan fluidos con nanopartículas de sílice suspendidas. A bajas velocidades de deformación, estos fluidos no son viscosos y fluyen con facilidad; a altas velocidades de deformación, características de las partículas de balas, los fluidos son muy resistentes y pueden proporcionar protección adicional. La malla de fibra tejida contiene el fluido (actúa como una esponja que mantiene el fluido en su lugar) y a su vez es contenida por la tela exterior.

Además, ya se ha desarrollado un casco militar de compósitos que, a pesar de que pesa lo mismo que un casco convencional de manganeso y acero, cubre una parte mayor de la cabeza y ofrece el doble de protección balística y contra fragmentos. Un casco de compósito está construido con fibra no tejida hecha de fibras Spectra en una matriz polimérica termofija, lo que detiene de manera eficaz la bala, aplastándola cuando golpea la primera capa de material.

Fuente: Cortesía de Pinnacle Armor, AlliedSignal Corp. y CGS Gallet SA.

9.5 Compósitos de matriz metálica

Las ventajas de una *matriz metálica* sobre una *matriz polimérica* son mayor módulo elástico, tenacidad, ductilidad y mayor resistencia a temperaturas elevadas. Sus limitaciones consisten en una mayor densidad y una mayor dificultad para procesar las piezas. Por lo general, los materiales empleados para matrices en *compósitos de matriz metálica* (MMC, por sus siglas en inglés) son aluminio, aleación de aluminio y litio (más ligero que el aluminio), magnesio, cobre, titanio y superaleaciones (fig. 9.10). Los materiales de las fibras son grafito, óxido de aluminio, carburo de silicio, boro, molibdeno y tungsteno. El módulo elástico de las fibras no metálicas varía entre 200 y 400 GPa, con esfuerzos de tensión que van de 2000 hasta 3000 MPa.

En la tabla 9.3 se muestran las composiciones y aplicaciones típicas de los compósitos de matriz metálica. Debido a su alta rigidez específica, peso ligero y alta conductividad térmica, se han utilizado fibras de boro en una matriz de aluminio para soportes tubulares estructurales del transbordador espacial orbital. También se aplican en marcos de bicicletas y artículos deportivos.

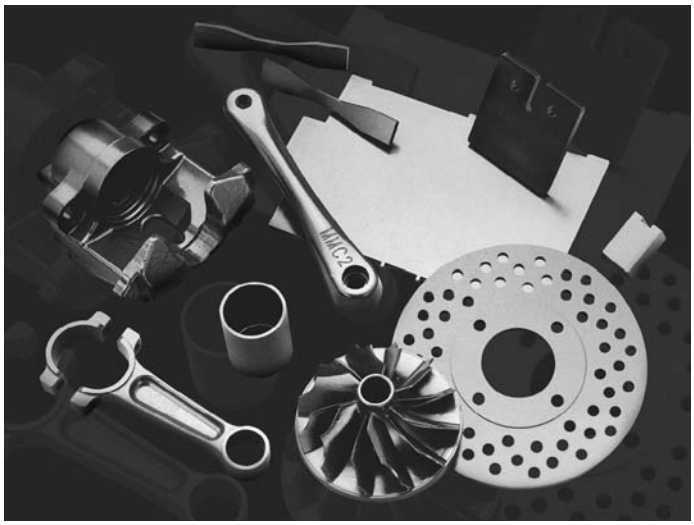


FIGURA 9.10 Ejemplos de piezas de compósitos de matriz metálica. *Fuente:* Cortesía de Metal Matrix Cast Composites, LLC.

TABLA 9.3

Materiales y aplicaciones de compósitos de matriz metálica

Fibra	Matriz	Aplicaciones
Grafito	Aluminio	Estructuras de satélites, misiles y helicópteros.
	Magnesio	Estructuras espaciales y satelitales.
	Plomo	Placas de almacenaje de baterías.
	Cobre	Contactos eléctricos y rodamientos.
Boro	Aluminio	Álabes de compresores y soportes estructurales.
	Magnesio	Estructuras de antenas.
	Titanio	Aspas de ventiladores para motores de reacción.
Alúmina	Aluminio	Restricciones de superconductor en reactores de potencia de fisión.
	Plomo	Placas de almacenaje de baterías.
	Magnesio	Estructuras de transmisión para helicópteros.
Carburo de silicio	Aluminio, titanio	Estructuras de alta temperatura.
	Superaleación (base cobalto)	Componentes para motores a alta temperatura.
Molibdeno, tungsteno	Superaleación	Componentes para motores a alta temperatura.

EJEMPLO 9.3 ***Calipers*** **de frenos de compósitos de matriz de aluminio**

Una de las tendencias en el diseño y la manufactura automotriz es el empuje creciente hacia el diseño de vehículos más ligeros, para obtener un mejor rendimiento y economía de combustible. Esto se puede observar en el desarrollo de *calipers* [N. del RT.] de frenos de un compósito de matriz metálica. Los *calipers* de frenos tradicionales están hechos de hierro fundido y pueden pesar hasta 3 kg (6.6 libras) en un auto pequeño, y más de 14 kg (30 libras) en un camión. El *caliper* de hierro fundido puede rediseñarse en su totalidad utilizando aluminio para obtener ahorro en el peso, pero esto requeriría un mayor volumen y el espacio disponible entre la rueda y el rotor está muy restringido.

N. del RT. El "caliper" en un vehículo es la "prensa" de los frenos de balata.

Se diseñó un nuevo *caliper* de frenos mediante una aleación de aluminio reforzado localmente con insertos de compósito prefundido, utilizando fibras cerámicas continuas. Ésta es una fibra de alúmina nanocristalina, con un diámetro de 10 a 12 μm y una fracción de volumen de fibra de 65%. En la tabla 9.4 se resumen las propiedades de las fibras y los materiales. Un análisis de elementos finitos confirmó la ubicación y cantidad de refuerzo, dando origen a un diseño que excedía los requisitos mínimos de diseño y que se equiparaba con las deflexiones de los *calipers* de hierro fundido en un ambiente de empaque restringido. En la figura 9.11 se muestra el nuevo *caliper*. Éste produce un ahorro de 50% en peso y proporciona ventajas adicionales de fácil reciclaje y resistencia a la corrosión.

TABLA 9.4

Resumen de propiedades de fibras y materiales para un caliper automotor de frenos

Propiedad	Fibra de Alúmina	Material compósito de aluminio reforzado
Resistencia a la tensión	3100 MPa (450 ksi)	1.5 GPa (220 ksi)
Módulo elástico	380 GPa (55 Mpsi)	270 GPa (39 Mpsi)
Densidad	3.9 g/cm^3	3.48 g/cm^3



FIGURA 9.11 *Caliper* de frenos de un compósito de matriz de aluminio que utiliza refuerzo nanocristalino de fibras de alúmina. *Fuente:* Cortesía de 3M Speciality Materials Division.

9.6 Compósitos de matriz cerámica

Los *compósitos de matriz cerámica* (CMC) son importantes debido a su resistencia a altas temperaturas y a los ambientes corrosivos. Como se describe en la sección 8.3, las cerámicas son fuertes y rígidas y resisten altas temperaturas, pero por lo general carecen de tenacidad.

Los materiales para matrices que mantienen su resistencia hasta 1700 °C (3000 °F) son el carburo de silicio, el nitruro de silicio, el óxido de aluminio y la mulita (compuesto de aluminio, silicio y oxígeno). Los compósitos de matriz de carbono/carbono conservan gran parte de su resistencia (hasta 2500 °C; 4500 °F), pero carecen de resistencia a la oxidación a temperaturas elevadas. En general, los materiales de las fibras son el carbono y óxido de aluminio. Los CMC se aplican en componentes para motores a reacción y automotores, equipo de minería en alta mar, recipientes de presión, componentes estructurales, herramientas de corte y matrices para la extrusión y el estirado de metales.

9.7 Otros compósitos

Los compósitos también pueden consistir en *recubrimientos* de diferentes tipos sobre metales base o subestratos (capítulo 34). Algunos ejemplos son:

- Chapeado de aluminio u otros metales sobre plásticos, generalmente para efectos decorativos.
- Esmaltes.
- Recubrimientos vítreos (similares al vidrio) sobre superficies metálicas con propósitos funcionales u ornamentales.

De los compósitos también se hacen herramientas de corte y matrices, como carburos cementados y cermets. Otros compósitos son los discos de esmeril hechas de óxido co, unidas con varios aglutinantes orgánicos, inorgánicos o metálicos (capítulo 26). Un compósito de partículas de granito en una matriz epóxica ofrece alta resistencia, una buena capacidad de amortiguamiento a las vibraciones (mejor que la del hierro fundido gris) y buenas características de fricción. Se utiliza en bancadas de máquinas herramienta para algunas rectificadoras de precisión.

RESUMEN

- Los compósitos son una clase importante de materiales de ingeniería con propiedades interesantes. Poseen tres categorías principales: los plásticos reforzados con fibra, los compósitos de matriz metálica y los compósitos de matriz cerámica. Ofrecen una amplia gama de aplicaciones en aviones, naves espaciales e industrias del transporte, así como en artículos deportivos y componentes estructurales.
- En los plásticos reforzados con fibras, éstas por lo general son vidrio, grafito, aramidas o boro. Comúnmente se utilizan el poliéster y los epóxicos como materiales para matrices. En particular, estos compósitos tienen alta tenacidad y elevadas relaciones de resistencia a peso y rigidez a peso.
- En los compósitos de matriz metálica, las fibras son comúnmente grafito, carbono, boro, óxido de aluminio, carburo de silicio, molibdeno o tungsteno. En general, los materiales para matriz consisten en aluminio, aleación de aluminio y litio, magnesio, cobre, titanio y superaleaciones.
- Para compósitos de matriz cerámica, es común que las fibras sean carbono y óxido de aluminio y que los materiales de la matriz sean carburo de silicio, nitruro de silicio, óxido de aluminio, carbono o mulita (compuesto de aluminio, silicio y oxígeno).
- Además del tipo y la calidad de los materiales utilizados, algunos factores importantes en la estructura de los materiales compósitos son el tamaño y la longitud de las fibras, su porcentaje de volumen en comparación con el de la matriz, la resistencia de la unión en la interfaz fibras-matriz y la orientación de las fibras en la matriz.

TÉRMINOS CLAVE

Compósitos avanzados
Extracción de fibras
Fibras
Híbrido
Materiales compósitos
Materiales de ingeniería
Matriz
Matriz cerámica
Matriz metálica
Pirólisis
Plásticos reforzados
Precursor
Silano
Triquitas

BIBLIOGRAFÍA

Agarwal, B. D. y Broutman, L. J., *Analysis and Performance of Fiber Composites*, 2a. ed., Wiley, 1990.

ASM Handbook, Vol. 21: Composites, ASM International, 2001.

Belitskus, D. L., *Fiber and Whisker Reinforced Ceramics for Structural Applications*, Marcel Dekker, 1993.

Bertholet, J. M., *Composite Materials: Mechanical Behavior and Structural Analysis*, Springer, 1999.

Bittence, J. C. (ed.), *Engineering Plastics and Composites*, ASM International, 1990.

Chawla, K. K., *Composite Materials: Science and Engineering*, 2a. ed., Springer, 1998.

Cheremisinoff, N. P. y Cheremisinoff, P. N., *Fiberglass Reinforced Plastics*, Noyes Publications, 1995.

Daniel, I. M. e Ishai, O., *Engineering Mechanics of Composite Materials*, Oxford, 1994.

Delmonte, J., *Metal-Polymer Composites*, Van Nostrand Reinhold, 1990.

Engineered Materials Handbook, Vol. 1: *Composites*, ASM International, 1987.

Engineering Plastics and Composites, 2a. ed., ASM International, 1993.

Fitzer, E. y Manocha, L. M., *Carbon Reinforcements and Carbon/Carbon Composites*, Springer, 1998.

Gay, D., Hoa, S. V. y Tsai, S. W., *Composite Materials*: *Design and Applications*, CRC Press, 2002.

Gutowski, T. C., *Advanced Composites Manufacturing*, Wiley, 1997.

Handbook of Ceramics and Composites, 3 vols., Marcel Dekker, 1991.

Harper, C. A., *Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites*, 3a. ed., McGraw-Hill, 1996.

Hull, D. y Clyne, T. W., *An Introduction to Composite Materials*, Cambridge University Press, 1996.

Jang, B. Z., *Advanced Polymer Composites: Principles and Applications*, ASM International, 1994.

Kelley, A., Cahn, R. W. y Bever, M. B. (eds.), *Concise Encyclopedia of Composite Materials*, ed. rev., Pergamon, 1994.

Mallick, P. K., *Composites Engineering Handbook*, Marcel Dekker, 1997.

Mileiko, S. T., *Metal and Ceramic Based Composites*, Elsevier, 1997.

Miller, E., *Introduction to Plastics and Composites: Mechanical Properties and Engineering Applications*, Marcel Dekker, 1995.

Nielsen, L. E. y Landel, R. F., *Mechanical Properties of Polymers and Composites*, Marcel Dekker, 1994.

Peters, S. (ed.), *Handbook of Composites*, Chapman & Hall, 1997.

Pilato, L. A. y Michno, M. J., *Advanced Composite Materials*, Springer, 1994.

Potter, K., *Introduction to Composite Products: Design, Development and Manufacture*, Kluwer, 1997.

Rosato, D. V., DiMattia, D. P. y Rosato, D. V., *Designing with Plastics and Composites: A Handbook*, Van Nostrand Reinhold, 1991.

Schwartz, M., *Composite Materials*, Vol. 1: *Properties, Nondestructive Testing, and Repair*; Vol. 2: *Processing, Fabrication, and Applications*, Prentice Hall, 1997.

PREGUNTAS DE REPASO

9.1 Haga distinciones entre los compósitos y las aleaciones metálicas.

9.2 Describa las funciones de la matriz y de las fibras de refuerzo. ¿Qué diferencias fundamentales existen en las características de los dos materiales?

9.3 ¿Qué fibras de refuerzo se utilizan generalmente para hacer compósitos? ¿Qué tipo de fibra es la más resistente? ¿Qué tipo es el más débil?

9.4 ¿Cuál es la gama en cuanto a longitud y diámetro de las fibras de refuerzo?
9.5 Liste los factores importantes que determinan las propiedades de los plásticos reforzados.
9.6 Compare las ventajas y desventajas de los compósitos de matriz metálica, los plásticos reforzados y los compósitos de matriz cerámica.
9.7 ¿Cuáles son los materiales más utilizados para matrices?
9.8 ¿Qué es un compósito híbrido?
9.9 ¿Qué propiedades de los materiales se mejoran al agregar fibras de refuerzo?
9.10 ¿Cuál es el propósito del material de la matriz?
9.11 ¿Cuáles son los tipos más comunes de fibras de vidrio?
9.12 ¿Existe alguna diferencia entre una fibra de carbono y una fibra de grafito? Explique su respuesta.
9.13 ¿Cómo se puede hacer que una fibra de grafito sea eléctrica y térmicamente conductora?
9.14 ¿Qué es una triquita? ¿Cuál es la diferencia entre una triquita y una fibra?
9.15 ¿Cómo están constituidas las fibras de boro? ¿Por qué son pesadas?
9.16 ¿Por qué son de interés los compósitos de matriz metálica?
9.17 ¿Qué características en común tienen los materiales para matrices metálicas?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

9.18 ¿Cómo cree que se descubrió originalmente el uso de la paja en la arcilla al hacer ladrillos para viviendas?
9.19 ¿Qué productos ha visto que estén hechos de plásticos reforzados? ¿Cómo puede afirmarlo?
9.20 ¿Qué aplicaciones no están bien adecuadas para materiales compósitos?
9.21 ¿Cuál es la diferencia entre un material compósito y un material recubierto?
9.22 Identifique los metales y las aleaciones que tienen resistencias comparables a las de los plásticos reforzados.
9.23 En este capítulo se describen las ventajas de los materiales compósitos. ¿Qué limitaciones o desventajas tienen estos materiales? ¿Qué sugeriría para superar estas limitaciones?
9.24 ¿Qué factores contribuyen al costo de las fibras de refuerzo? (Ver la tabla 9.2).
9.25 Proporcione ejemplos de materiales compósitos distintos de los ya indicados en este capítulo.
9.26 Un compósito híbrido se define como aquel que contiene dos o más tipos de fibras de refuerzo. ¿Qué ventajas tendría un compósito sobre otros?
9.27 Explique por qué los materiales presentados en la figura 9.5 se comportan como se muestra.
9.28 ¿Por qué las fibras son capaces de soportar una parte principal de la carga en materiales compósitos?
9.29 ¿Los compósitos de matriz metálica tienen ventajas sobre los plásticos reforzados? Explique su respuesta.
9.30 Dé varias razones para el desarrollo de compósitos de matriz cerámica. Nombre algunas posibles aplicaciones.
9.31 Explique cómo podría determinar la dureza de los plásticos reforzados y de los materiales compósitos. ¿Son representativas las mediciones de dureza en estos tipos de materiales? ¿El tamaño de la indentación representa alguna diferencia? Explique su respuesta.
9.32 ¿Cómo podría determinar la resistencia de una fibra?
9.33 ¿Cuáles son las ventajas de las triquitas como material de refuerzo?
9.34 Se ha dicho que las fibras de vidrio son mucho más resistentes que el vidrio en volumen. ¿A qué se debe?
9.35 ¿En qué circunstancias se podría utilizar un vidrio como matriz?
9.36 Cuando se establecieron los estados de las Grandes Llanuras en Estados Unidos, no había árboles para la construcción de viviendas. Los pioneros fabricaron ladrillos de tierra, básicamente tierra de pradera como matriz y pasto y su sistema de raíces como refuerzo. Explique por qué les funcionó. Además, si fuera un pionero, ¿colocaría los ladrillos con el pasto horizontal o verticalmente? Explique su respuesta.
9.37 Compare las ventajas y desventajas de los compósitos de matriz metálica, los plásticos reforzados y los compósitos de matriz cerámica.
9.38 En este capítulo se estudiaron las ventajas de los materiales compósitos. ¿Qué limitaciones o desventajas tienen estos materiales? ¿Qué sugeriría para superar estas limitaciones?
9.39 Al incorporar pequeñas cantidades de agente de soplado, es posible manufacturar fibras poliméricas al vacío con núcleos de vidrio. Liste las aplicaciones de dichas fibras.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

9.40 Calcule el aumento promedio de las propiedades de los plásticos proporcionados en la tabla 7.1 como resultado de su refuerzo, y describa sus observaciones.

9.41 En el ejemplo de la sección 9.3, ¿cuál sería el porcentaje de la carga soportada por las fibras si su resistencia es de 1100 MPa y la resistencia de la matriz es de 200 MPa? ¿Qué pasa si se duplica la rigidez de las fibras y la rigidez de la matriz se reduce a la mitad?

9.42 Realice un estudio de la literatura técnica reciente y datos técnicos actuales indicando los efectos de la longitud de las fibras en propiedades mecánicas como la resistencia, el módulo elástico y la energía de impacto de los plásticos reforzados.

9.43 Calcule el aumento de porcentaje en las propiedades mecánicas del nailon reforzado a partir de los datos indicados en la figura 9.4.

9.44 Grafique E/ρ y $E/\rho^{0.5}$ para los materiales compósitos listados en la tabla 9.1 y compárelos con las propiedades de los materiales descritos en los capítulos 4 al 8. (Ver también la tabla 9.2).

9.45 Calcule el esfuerzo en las fibras y en la matriz para el ejemplo de la sección 9.3.1. Asuma que el área transversal es 0.1 pulg^2 y P_c = 500 lb.

9.46 Repita los cálculos del ejemplo en la sección 9.3.1 *(a)* si se utilizara una fibra de carbono de alto módulo, y *(b)* si se usara Kevlar 29.

9.47 Véanse las propiedades listadas en la tabla 7.1. Si el acetal se refuerza con fibras de vidrio tipo E, ¿cuál es la gama del contenido de fibras en el acetal reforzado con vidrio?

9.48 Grafique el módulo elástico y la resistencia de un compósito de matriz metálica de aluminio con fibras de carbono de alto módulo en función del contenido de fibras.

9.49 En cuanto a los datos mostrados en el ejemplo numérico al final de la sección 9.3.1, ¿cuál debería ser el contenido de fibra para que las fibras y la matriz fallaran simultáneamente? Utilice un esfuerzo de fibra permisible de 200 MPa y una resistencia de matriz de 50 MPa.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

9.50 ¿En qué otras aplicaciones de los materiales compósitos diferentes de las listadas en la sección 9.4 puede pensar? ¿Por qué cree que sus aplicaciones serían apropiadas para estos materiales?

9.51 Utilizando la información proporcionada en este capítulo, desarrolle diseños y formas especiales para nuevas aplicaciones de materiales compósitos.

9.52 ¿Un material compósito con matriz resistente y rígida y refuerzo suave y flexible tendría usos prácticos? Explique su respuesta.

9.53 Liste algunos productos para los cuales el uso de materiales compósitos representaría una ventaja por sus propiedades anisotrópicas.

9.54 Revise la figura 9.1 y explique qué otros componentes de una aeronave, incluyendo las partes de la cabina, podrían hacerse de compósitos.

9.55 Nombre varias aplicaciones en las que sean importantes la resistencia y la rigidez específicas (fig. 9.2).

9.56 ¿En qué aplicaciones de materiales compósitos se le ocurre que sería deseable una conductividad térmica alta?

9.57 Al igual que en otros materiales, las propiedades mecánicas de los compósitos se obtienen al preparar las probetas apropiadas y después ensayarlas. Explique qué problemas podría encontrar al preparar probetas para pruebas de tensión. Sugiera métodos para hacer probetas adecuadas, incluyendo su forma y cómo deben sujetarse a las mordazas de las máquinas de prueba.

9.58 Diseñe y describa un método de prueba para determinar las propiedades mecánicas de los plásticos reforzados en su dirección de su espesor.

9.59 Se están realizando desarrollos sobre técnicas para refuerzo tridimensional de plásticos. Describa *(a)* las aplicaciones en las que es importante la resistencia en la dirección del espesor del compósito y *(b)* sus ideas sobre cómo lograr esta resistencia. Incluya esquemas simples de la estructura utilizando dichos plásticos reforzados.

9.60 Como se describe en este capítulo, el ambiente puede afectar de manera adversa los plásticos reforzados, en especial la humedad, los productos químicos y las variaciones de temperatura. Diseñe y describa métodos de prueba para determinar las propiedades mecánicas de los materiales compósitos sometidos a estas condiciones.

9.61 Comente sus observaciones sobre el diseño de la tabla de *windsurf* mostrada en la figura 9.8.

9.62 Describa las similitudes y diferencias que hay entre el cartón corrugado ordinario y una estructura de panal.

9.63 Sugiera diseños de productos en los que pueda utilizarse cartón corrugado. Comente sus ventajas y limitaciones.

9.64 Sugiera diseños de productos para el consumidor que podrían utilizar estructuras de panal. Por ejemplo, un elevador puede usar una lámina de panal como material de piso rígido y de peso ligero.

9.65 Realice un estudio de varios artículos deportivos e identifique los componentes hechos de materiales compósitos. Explique las razones y ventajas de utilizar compósitos en estas aplicaciones específicas.

9.66 En este capítulo se describieron varias combinaciones y estructuras de material. En términos relativos, identifique las que serían apropiadas para aplicaciones que involucran una de las siguientes condiciones: *(a)* temperaturas muy bajas, *(b)* temperaturas muy altas, *(c)* vibraciones y *(d)* alta humedad.

9.67 Consiga un libro de texto sobre materiales compósitos e investigue la rigidez eficaz de un polímero continuo reforzado con fibras. Grafique la rigidez de ese compósito en función de la orientación con respecto a la dirección de la fibra.

9.68 Derive una expresión general del coeficiente de expansión térmica de un compósito de fibra reforzada continua en la dirección de la fibra.

9.69 En vez de una sección transversal constante, es posible hacer fibras o triquitas con una sección transversal variable o una fibra "ondulada". ¿Qué ventajas tendrían dichas fibras?

9.70 Describa cómo podría producir algunos materiales compósitos simples utilizando las materias primas disponibles en su casa. Explique su respuesta.

Procesos y equipo para la fundición de metales

PARTE II

Como se describe en el resto de este libro, existen diferentes métodos para transformar los metales en productos útiles. Uno de los procesos más antiguos es la **fundición**, que básicamente consiste en vaciar metal fundido en la cavidad de un molde, donde (al solidificarse) adquiere la forma de la cavidad. La fundición se utilizó por primera vez alrededor del año 4000 a.C. para fabricar ornamentos, puntas de cobre para flechas y otros objetos. Es posible fundir una amplia variedad de productos y producir formas intrincadas de una sola pieza, incluyendo las que tienen cavidades internas, como los monobloques de motores. En la figura II.1 se muestran componentes fundidos de un automóvil común, producto que se utilizó en la introducción de la parte I para ilustrar la selección y el uso de varios materiales. En la figura II.2 se muestran los procesos de fundición desarrollados a lo largo de los años.

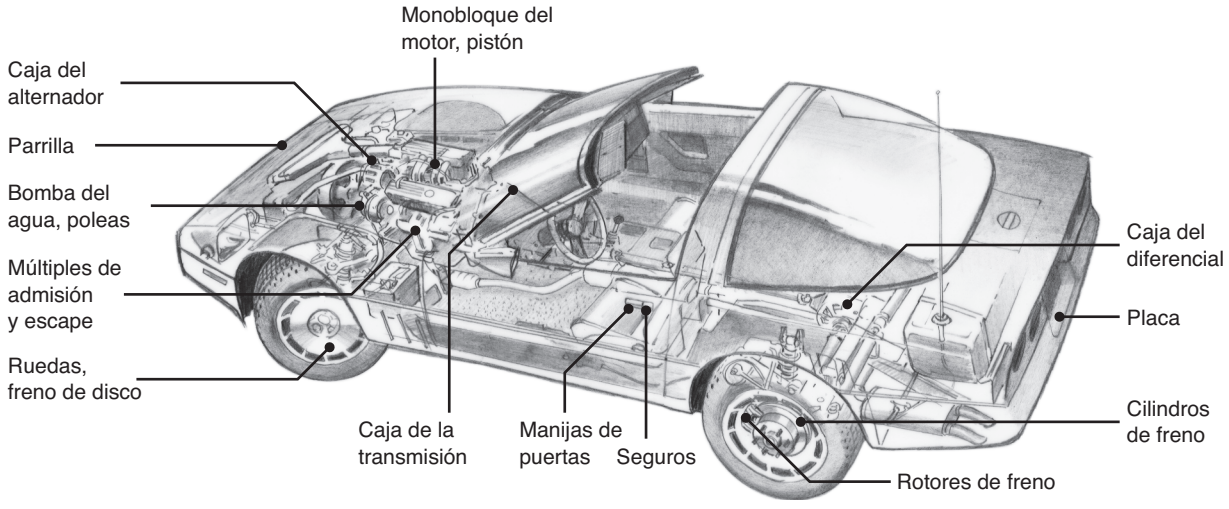


FIGURA II.1 Partes fundidas en un automóvil común.

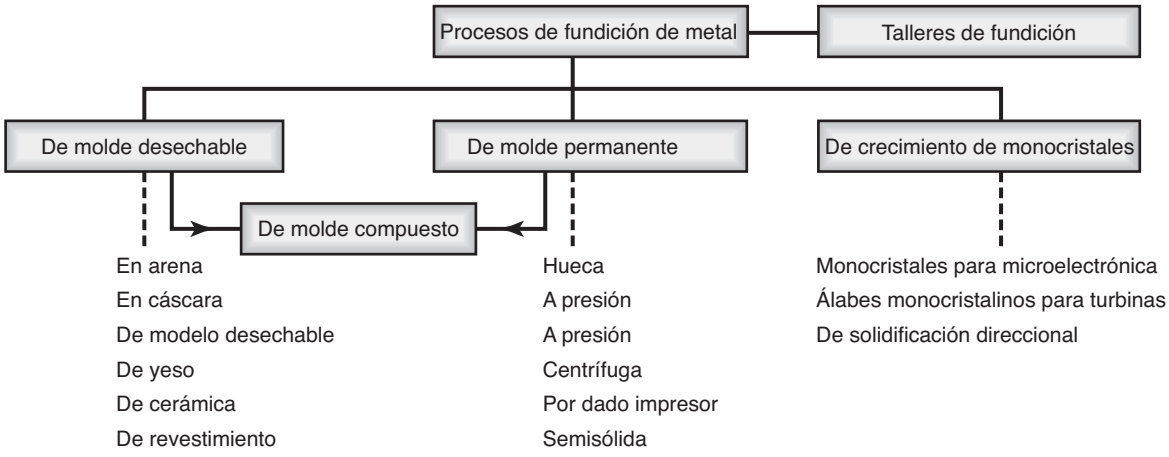


FIGURA II.2 Diagrama de los procesos de fundición de metales descritos en la parte II.

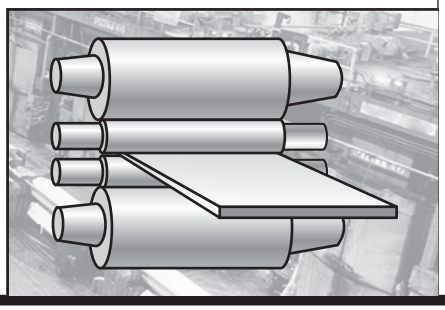
Al igual que toda la manufactura, cada proceso de fundición tiene sus características, aplicaciones, ventajas, limitaciones y costos. Estos procesos se seleccionan con mayor frecuencia que otros métodos de manufactura por las siguientes razones:

- La fundición puede producir formas complejas con cavidades internas o secciones huecas.
- Se pueden producir partes grandes de una sola pieza.
- La fundición puede utilizar materiales cuyo proceso por otros medios es difícil o no económico.
- El proceso de fundición es competitivo frente a otros procesos de manufactura.

Casi todos los metales se pueden fundir en la forma final deseada (o muy cerca de ella), a menudo con operaciones menores de acabado. Esta capacidad coloca a la fundición entre las tecnologías más importantes de la *manufactura de forma neta*, junto con el forjado *de forma neta* (capítulo 14), el estampado de lámina metálica (capítulo 16) y la metalurgia de polvos y el moldeo por inyección de metales (capítulo 17). Con la ayuda de técnicas modernas de procesamiento y el control de la composición química, las propiedades mecánicas de las fundiciones pueden igualar las de otros procesos de manufactura.

Fundamentos de la fundición de metales

CAPÍTULO 10



Utilizada por primera vez hace alrededor de seis mil años, la fundición continúa siendo un importante proceso de manufactura para producir partes muy pequeñas (o muy grandes). Para entender los aspectos fundamentales de este proceso, en este capítulo se describen:

- Los mecanismos de solidificación en los metales y sus aleaciones.
- La importancia de los patrones de solidificación en la fundición.
- Las características del flujo del fluido y de la transferencia de calor en los moldes y sus efectos.
- El papel de los gases y de la contracción en la formación de defectos en la fundición.

10.1 Introducción 261
10.2 Solidificación de los metales 262
10.3 Flujo del fluido 267
10.4 Fluidez del metal fundido 270
10.5 Transferencia de calor 272
10.6 Defectos 275

EJEMPLOS:

10.1 Tiempos de solidificación para varias formas 274
10.2 Fundición de pistones automovilísticos de aluminio 279

10.1 Introducción

El proceso de **fundición** consta de estos pasos básicos: *(a)* se vacía metal fundido en un molde con la forma de la parte a manufacturar, *(b)* se deja solidificar, y *(c)* se retira la parte del molde. Al igual que todos los otros procesos de manufactura, entender los fundamentos de la fundición es esencial para producir fundiciones económicas y de buena calidad, así como establecer técnicas apropiadas para el diseño de los moldes y las prácticas correspondientes.

Los siguientes son factores que es importante considerar en las operaciones de fundición:

- El flujo del metal fundido dentro de la cavidad del molde.
- La solidificación y el enfriamiento del metal dentro del molde.
- La influencia del tipo de material del molde.

En este capítulo se describe la relación entre los muchos factores involucrados en la fundición. Primero se analiza el flujo del metal fundido dentro de la cavidad del molde, en términos de las características de diseño del molde y del flujo del fluido. La solidificación y el enfriamiento de los metales dentro del molde son afectados por varios factores, incluyendo las propiedades metalúrgicas y térmicas del metal. El tipo de molde también es importante, ya que afecta la velocidad de enfriamiento del metal. Finalmente, se describen las circunstancias que inciden en la formación de defectos.

En los capítulos 11 y 12 se describen procesos industriales de fundición de metales, consideraciones de diseño y materiales para fundición. La fundición de cerámicas y de plásticos, que comprenden métodos y procedimientos similares a los de los metales, se abordan en los capítulos 18 y 19, respectivamente.

10.2 Solidificación de los metales

Una vez que se vacía el metal fundido en un **molde**, se solidifica y enfría a la temperatura ambiente; durante estos procesos ocurre una serie de eventos que influyen en gran medida en el tamaño, forma, uniformidad y composición química de los granos formados a lo largo de la fundición, que a su vez influyen en sus propiedades generales. Los factores importantes que afectan estos eventos son el tipo de metal, las propiedades térmicas del metal y del molde, la relación geométrica entre el volumen y el área superficial de la fundición y la forma del molde.

10.2.1 Metales puros

Debido a que un metal puro tiene un punto de fusión (o de solidificación) claramente definido, se solidifica a una temperatura constante, como se muestra en la figura 10.1. Por ejemplo, el aluminio puro se solidifica a 660 °C (1220 °F), el hierro a 1537 °C (2798 °F) y el tungsteno a 3410 °C (6170 °F). (Ver también la tabla 3.1 y la fig. 4.4). Luego que la temperatura del metal fundido desciende a su punto de solidificación, permanece constante mientras se disipa su *calor latente de fusión*. El *frente de solidificación* (interfaz sólido-líquido) se mueve a través del metal fundido de las paredes del molde hacia el centro. El metal solidificado, llamado fundición, se saca del molde y se enfría a la temperatura ambiente.

En la figura 10.2a se muestra la estructura del grano de la fundición de un metal puro en un molde cuadrado. En las paredes del molde, que se encuentran a la temperatura ambiente, o al menos mucho más frías que el metal fundido, el metal se enfría con rapidez y produce una **capa superficial** solidificada, o *cáscara*, de finos granos equiaxiales. Éstos crecen en dirección opuesta a la de la transferencia de calor a través del molde; los que tienen una orientación favorable crecen de manera preferencial y se les llama **granos columnares** (fig. 10.3). Conforme la fuerza impulsora de la transferencia de calor se reduce, alejándose de las paredes, los granos se vuelven equiaxiales y gruesos; los que tienen orientaciones sustancialmente diferentes ven bloqueado su crecimiento posterior. A

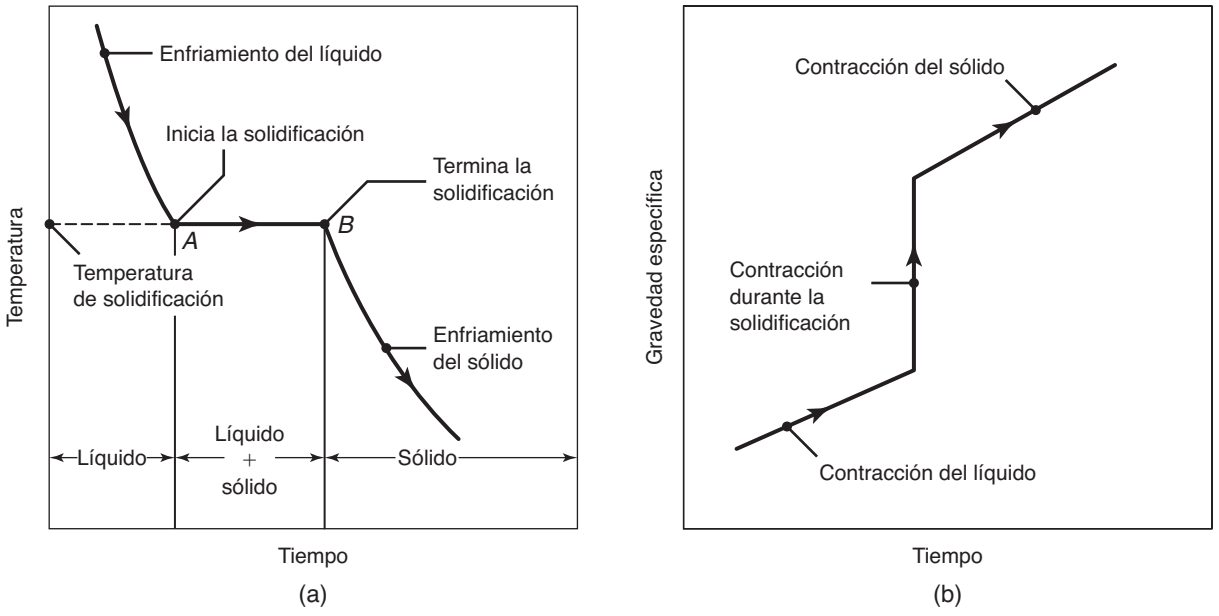


FIGURA 10.1 *(a)* Temperatura como función del tiempo de solidificación de los metales puros. Observe que la solidificación ocurre a temperatura constante. *(b)* Densidad, como función del tiempo.

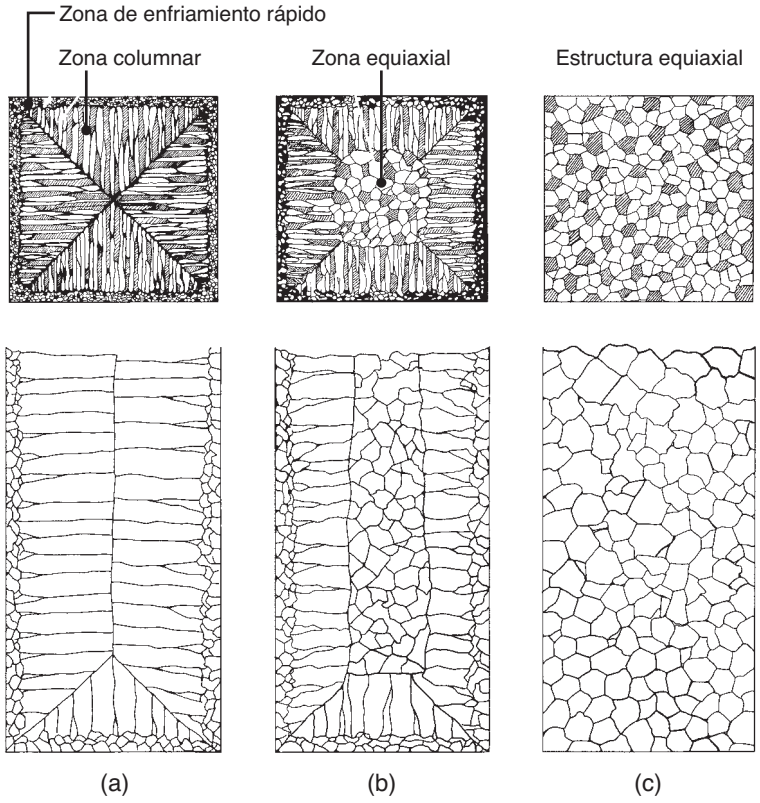


FIGURA 10.2 Esquema de tres estructuras de metales fundidos solidificados en un molde cuadrado: *(a)* metales puros; *(b)* aleaciones de solución sólida; y *(c)* estructura obtenida utilizando agentes nucleantes. *Fuente:* G. W. Form, J. F. Wallace, J. L. Walker y A. Cibula.

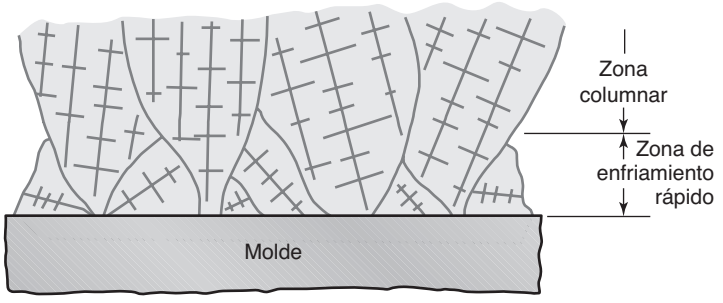


FIGURA 10.3 Desarrollo de una textura preferida en una pared fría del molde. Observe que los únicos granos orientados favorablemente crecen alejándose de la superficie del molde.

tal desarrollo de los granos se le conoce como **nucleación homogénea**, lo que significa que los granos (cristales) crecen sobre sí mismos, a partir de la pared del molde.

10.2.2 Aleaciones

La solidificación en las aleaciones comienza cuando la temperatura desciende por debajo del liquidus (T_L) y termina cuando alcanza el solidus, T_S (fig. 10.4). En este intervalo

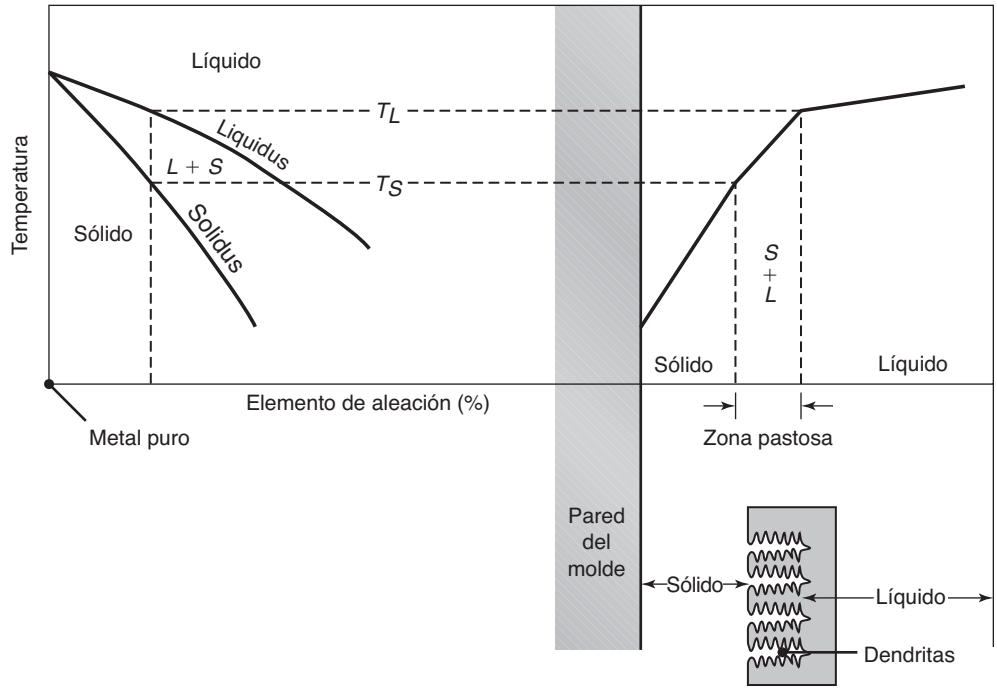


FIGURA 10.4 Esquema de la solidificación de una aleación y distribución de la temperatura en el metal que se solidifica. Observe la formación de dendritas en la zona pastosa.

de temperaturas, la aleación se encuentra en un estado *blando* o *pastoso* que consiste en **dendritas columnares** (del griego *dendron*, que significa "parecido a", y *drys*, que significa "árbol"). Obsérvese la presencia de metal líquido entre los brazos de las dendritas. Éstas tienen brazos y ramas tridimensionales (brazos secundarios) que se entrelazan al final, como se puede ver en la figura 10.5. Es importante (aunque complejo) el estudio de las estructuras dendríticas porque contribuyen a factores dañinos como las variaciones en la composición, segregación y microporosidad dentro de una parte fundida.

El ancho de la **zona pastosa** (donde coinciden las fases líquida y sólida) es un factor importante durante la solidificación. Esta zona se describe en términos de una diferencia de temperatura, conocida como **rango de solidificación** o de **congelamiento**, de la siguiente manera:

$$\text{Rango de solidificación} = T_L - T_S \tag{10.1}$$

En la figura 10.4 se puede ver que los metales puros tienen un rango de solidificación próximo a cero y que el frente de solidificación se mueve como un frente plano sin formar una zona pastosa. Las *eutécticas* (sección 4.3) se solidifican de manera similar, con un frente casi plano. El tipo de estructura desarrollado después de la solidificación depende de la composición del eutéctico. En aleaciones con un diagrama de fases casi simétrico, por lo general la estructura es laminar, con dos o más fases sólidas presentes, dependiendo del sistema de aleación. Cuando la porción volumétrica de la fase menor de la aleación baja de 25%, la estructura suele volverse fibrosa. Estas condiciones son particularmente importantes para los hierros fundidos.

Para las aleaciones, un *rango de solidificación corto* por lo común comprende una diferencia de temperatura de menos de 50 °C (90 °F), y un *rango de solidificación largo*, más de 110 °C (200 °F). En general, las fundiciones ferrosas tienen zonas pastosas estrechas, mientras que en las aleaciones de aluminio y de magnesio dichas zonas son amplias. Por lo tanto, estas aleaciones se encuentran en un estado pastoso durante la mayor parte del proceso de solidificación.

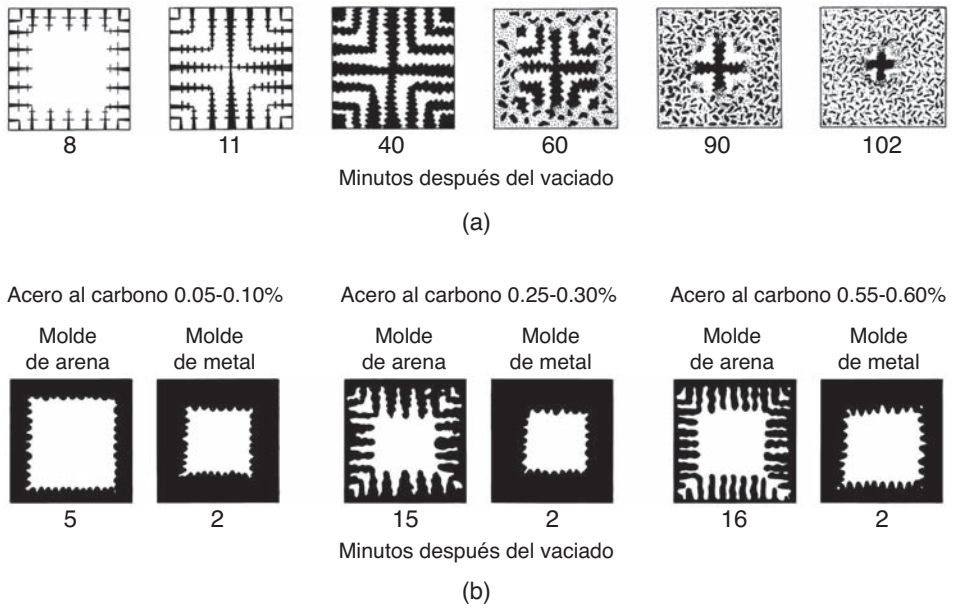


FIGURA 10.5 *(a)* Patrones de solidificación para el hierro fundido en una fundición cuadrada de 180 mm (7 pulgadas). Observe que después de 11 minutos de enfriamiento, las dendritas se alcanzan una a otra, pero la fundición todavía es pastosa en el interior. Son necesarias dos horas para que esta fundición se solidifique totalmente. *(b)* Solidificación de aceros al carbono en molde de arena y en molde de enfriamiento rápido (metálico). Observe la diferencia en los patrones de solidificación conforme aumenta el contenido de carbono. *Fuente:* H. F. Bishop y W. S. Pellini.

Efectos de las velocidades de enfriamiento. Las velocidades de enfriamiento bajas (del orden de 10^2 K/s), o los tiempos locales de solidificación largos, producen estructuras dendríticas *gruesas* con un gran espaciamiento entre los brazos de las dendritas. Si las velocidades de enfriamiento son mayores (del orden de 10^4 K/s) o los tiempos locales de solidificación cortos, la estructura se vuelve *más fina*, con un espaciamiento menor entre los brazos de las dendritas. Para velocidades de enfriamiento superiores (desde 10^6 hasta 10^8 K/s) las estructuras que se desarrollan son *amorfas*, como se describe en la sección 6.14.

Las estructuras desarrolladas y el tamaño del grano resultante afectan las propiedades de la fundición. Al disminuir el tamaño del grano aumentan la resistencia y la ductilidad de la aleación fundida, se reduce la microporosidad (huecos por contracción entre las dendritas) en la fundición y reduce su tendencia al agrietamiento (*agrietamiento en caliente*, ver fig. 10.12) durante la solidificación. La falta de uniformidad del tamaño del grano y de su distribución produce fundiciones con *propiedades anisotrópicas*.

Un criterio que define la cinética de la interfaz líquido-sólido es la relación G/R, donde G es el *gradiente térmico* y R la *velocidad* a la que se mueve dicha interfaz. Los valores típicos de G van de 10^2 a 10^3 K/m, y para R de 10^{-3} a 10^{-4} m/s. Las estructuras tipo dendrítico (fig. 10.6a y b) comúnmente tienen una relación G/R en el intervalo de 10^5 a 10^7, mientras que las relaciones de 10^{10} a 10^{12} producen una interfaz líquido-sólido no dendrítica de frente plano (fig. 10.7).

10.2.3 Relaciones estructura-propiedad

Debido a que se espera que todas las fundiciones posean ciertas propiedades que satisfagan los requerimientos de diseño y servicio, las relaciones entre las propiedades y las estructuras desarrolladas durante la solidificación son aspectos importantes de la fundición.

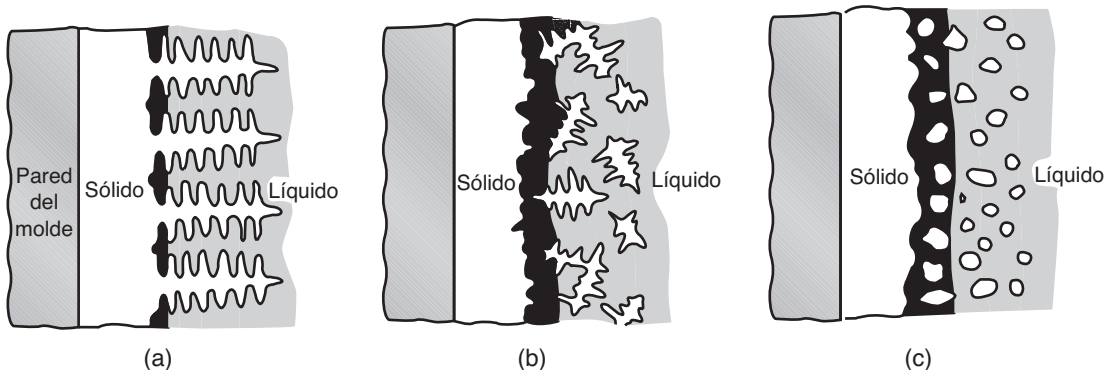


FIGURA 10.6 Esquema de tres tipos básicos de estructuras fundidas: *(a)* dendrítica columnar; *(b)* dendrítica equiaxial; y *(c)* equiaxial no dendrítica. *Fuente:* Cortesía de D. Apelian.

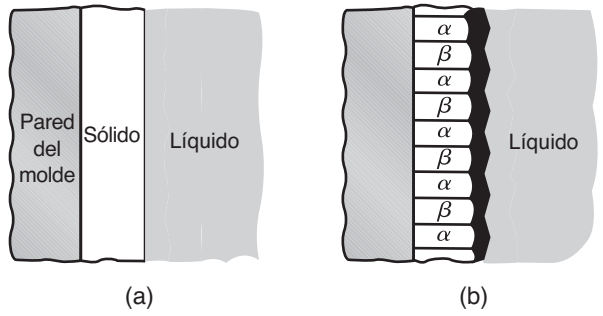


FIGURA 10.7 Esquema de estructuras fundidas en: *(a)* un frente plano, monofásico, y *(b)* un frente plano, bifásico. *Fuente:* Cortesía de D. Apelian.

En esta sección se describen estas relaciones en términos de la morfología de las dendritas y la concentración de los elementos de aleación en diferentes regiones del metal.

Las composiciones de las dendritas y del metal líquido se presentan en el *diagrama de fases* de la aleación en particular. Si la aleación se enfría de manera muy lenta, cada dendrita desarrolla una composición uniforme; sin embargo, en las condiciones normales (más rápidas) de enfriamiento, se forman **dendritas con núcleo**. Éstas tienen una composición superficial distinta de la de sus centros, diferencia que se conoce como *gradiente de concentración*. La superficie de la dendrita tiene una concentración de elementos de aleación mayor que la de su núcleo, debido al rechazo del soluto desde el núcleo hacia la superficie durante la solidificación de la dendrita (**microsegregación**). El sombreado más oscuro en el líquido interdendrítico, cerca de las raíces de la dendrita que se muestra en la figura 10.6, indica que estas regiones poseen una mayor concentración de soluto; la microsegregación en estas regiones es mucho más pronunciada que en otras.

Existen varios tipos de **segregación**. En contraste con la microsegregación, la **macrosegregación** implica diferencias de composición a lo largo de la propia fundición. En situaciones en las que el frente de solidificación se aleja de la superficie de una fundición como un frente plano (fig. 10.7), los constituyentes con punto de fusión más bajo de la aleación que se está solidificando son empujados hacia el centro (**segregación normal**). En consecuencia, los elementos de aleación de dicha fundición se concentran más en el centro que en la superficie. En las estructuras dendríticas, como las que se encuentran en las aleaciones de soluciones sólidas (fig. 10.2b), ocurre lo contrario: el centro de la fun-

dición tiene menos elementos de aleación (**segregación inversa**) que la superficie. La razón es que el metal líquido (que tiene una mayor concentración de dichos elementos) entra en las cavidades desarrolladas al contraerse por solidificación los brazos de las dendritas, que se han solidificado antes.

Otra forma de segregación se debe a la gravedad. La **segregación por gravedad** describe el proceso en que las inclusiones o los compuestos de mayor densidad se hunden y los elementos más ligeros (como el antimonio en una aleación antimonio-plomo) flotan en la superficie.

En la figura 10.2b se muestra una estructura típica de fundición de una aleación de soluciones sólidas, con una zona interna de granos equiaxiales. Esta zona interna se puede extender a través de la fundición, como se muestra en la figura 10.2c, agregando un **inoculante** (*agente nucleante*) en la aleación. Éste induce la nucleación de los granos a través del metal líquido (**nucleación heterogénea**).

Debido a la gravedad, a la diferencia de densidades resultante y a la presencia de *gradientes térmicos* en una masa de metal líquido que se está solidificando, la *convección* tiene una fuerte influencia en las estructuras que se desarrollan. La convección promueve la formación de una zona exterior de enfriamiento, refina el tamaño del grano y acelera la transición de granos columnares a equiaxiales. La estructura mostrada en la figura 10.6b también se puede obtener aumentando la convección dentro del metal líquido en donde se separan los brazos de las dendritas (**multiplicación de las dendritas**). Por el contrario, al reducir o eliminar la convección se producen granos dendríticos columnares más gruesos y largos.

Los brazos de las dendritas no son particularmente fuertes y se pueden romper mediante agitación o vibración mecánica en las etapas iniciales de la solidificación (**formado de metal semisólido** y **reofundición**, ver sección 11.3.7). Este proceso produce un grano de tamaño más fino con granos no dendríticos equiaxiales distribuidos con mayor uniformidad a lo largo de la fundición (fig. 10.6c). Un beneficio colateral es el comportamiento **tixotrópico** de las aleaciones (esto es, la viscosidad decrece cuando se agita el metal líquido), que lleva a una mejor capacidad de fundición (colabilidad). Otra forma de formado de metal semisólido es la *fundición tixotrópica*, o tixofundición, en la que una palanquilla sólida se calienta hasta el estado semisólido y después se inyecta en un molde de fundición a presión (sección 11.3.5). En general, el calentamiento se realiza por convección en un horno, pero puede reforzarse mediante métodos mecánicos o electromagnéticos.

Se están realizando experimentos durante los vuelos espaciales en relación con los efectos de la gravedad sobre la microestructura de las fundiciones. La falta de gravedad (**microgravedad**) significa que, a diferencia de lo que sucede en la Tierra, no existen diferencias significativas de densidad o gradientes térmicos (y por lo tanto no existe convección) durante la solidificación. Esta falta de convección afecta la estructura de solidificación y la distribución de impurezas. Experimentos recientes comprenden el crecimiento de cristales para la producción de muestras semiconductoras de teluriato de cadmio-zinc, teluriato de mercurio-zinc y arseniuro de galio dopado con selenio (ver sección 28.3).

10.3 Flujo del fluido

Para enfatizar la importancia del flujo del fluido en la fundición, describamos brevemente un sistema básico de fundición por gravedad como el que se muestra en la figura 10.8. El metal fundido se vacía a través de una **copa de vaciado**; después fluye a través del **sistema de alimentación** (bebedero, canales de alimentación y compuertas) dentro de la cavidad del molde. Como se ilustra en la figura 11.3, el **bebedero** es un canal cónico vertical por donde el metal fundido fluye hacia abajo, dentro del molde. Los **canales de alimentación** lo llevan desde el bebedero al interior de la cavidad del molde, o conectan el bebedero a la **compuerta** (la parte del canal de alimentación por la que el metal fundido entra en la cavidad del molde). Las **mazarotas** (también llamadas **alimentadores**) sirven como depósitos de metal fundido para proveer el metal necesario y evitar la porosidad debida a la contracción durante la solidificación. (Ver también fig. 11.3).

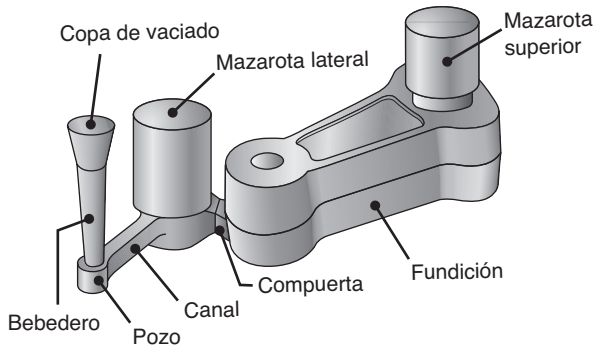


FIGURA 10.8 Esquema de una fundición característica con mazarotas y compuertas. Las mazarotas sirven como contenedores que suministran metal fundido a la fundición conforme se contrae durante la solidificación.

Aunque un sistema de alimentación como el señalado parece simple, una fundición satisfactoria requiere un diseño apropiado y el control del proceso de solidificación para asegurar un flujo del fluido adecuado en el sistema. Por ejemplo, una función importante del sistema de alimentación en la fundición en arena consiste en *atrapar contaminantes* (como óxidos y otras inclusiones) existentes en el metal fundido, al hacer que se adhieran a las paredes de dicho sistema para impedir que lleguen a la cavidad del molde. Además, un sistema de alimentación diseñado en forma apropiada ayuda a evitar o minimizar problemas (como enfriamiento prematuro, turbulencia o que algún gas quede atrapado). Incluso antes de llegar a la cavidad del molde, el metal fundido debe manejarse con cuidado para evitar la formación de óxidos en las superficies del mismo, originados por la exposición al medio ambiente o por la introducción de impurezas en el metal fundido.

Existen dos principios básicos fundamentales en el diseño de los canales de alimentación: el teorema de Bernoulli y la ley de continuidad de la masa.

Teorema de Bernoulli. Este teorema se basa en el principio de la conservación de la energía y relaciona presión, velocidad, la elevación del fluido a cualquier punto del sistema y las pérdidas por fricción en un sistema lleno de líquido. Esto se hace conforme a la ecuación

$$h + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \text{constante} \tag{10.2}$$

donde h es la elevación por encima de cierto plano de referencia, p la presión a esa elevación, v la velocidad del líquido a esa elevación, ρ la densidad del fluido (suponiendo que es incompresible) y g la constante gravitacional. La conservación de la energía obliga a que, en una ubicación particular en el sistema, se cumpla la siguiente relación:

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + f \tag{10.3}$$

donde los subíndices 1 y 2 representan dos elevaciones diferentes. En esta fórmula, f representa la pérdida por fricción en el líquido conforme viaja hacia abajo del sistema. Esta pérdida incluye factores como la pérdida de energía en las interfaces líquido-pared del molde y la turbulencia en el líquido.

Continuidad de masa. La ley de continuidad de masa establece que para líquidos incompresibles y en un sistema con paredes impermeables, la velocidad de flujo es constante. Por lo tanto,

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \tag{10.4}$$

donde Q es el gasto volumétrico (como m^3/s), A el área de la sección transversal de la corriente del líquido y v la velocidad promedio del líquido en dicha sección. Los subíndices 1 y 2 se refieren a dos puntos diferentes en el sistema. De acuerdo con esta ley, el gasto debe mantenerse en cualquier parte del sistema. La permeabilidad de las paredes es importante, porque de lo contrario parte del líquido pasaría a través de las paredes (como ocurre en los moldes de arena). Por ello, el gasto disminuye conforme el líquido se mueve a través del sistema. Con frecuencia se utilizan recubrimientos para inhibir dicho comportamiento en los moldes de arena.

Diseño del bebedero. Una aplicación de los dos principios recién establecidos es el diseño cónico tradicional de los bebederos (mostrado en la fig. 10.8). La forma del bebedero se puede determinar mediante las ecuaciones 10.3 y 10.4. Si la presión en la parte superior del bebedero es igual a la presión en el fondo y no existen pérdidas por fricción, la relación entre la altura y el área de la sección transversal en cualquier punto del bebedero está dada por la relación parabólica

$$\frac{A_1}{A_2} = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \tag{10.5}$$

donde, por ejemplo, el subíndice 1 denota la parte superior del bebedero y el 2 el fondo. Por lo tanto, al moverse de arriba abajo, debe disminuir el área de sección transversal del bebedero. Dependiendo de los supuestos asumidos, se pueden obtener expresiones distintas a la ecuación 10.5. Por ejemplo, supóngase cierta velocidad del metal fundido (V_1) en la parte superior del bebedero. Después, utilizando las ecuaciones 10.3 y 10.4, se puede obtener una expresión para la relación A_1/A_2, en función de h_1, h_2 y V_1.

Obsérvese que en un líquido en caída libre (como el agua de un grifo), el área de la sección transversal de la corriente disminuye al ganar velocidad. Si diseñamos un bebedero con una sección transversal de área constante y vaciamos el metal dentro de ella, se pueden desarrollar regiones en las que el líquido pierda contacto con las paredes del bebedero. A causa de ello puede darse el fenómeno de la **aspiración** (proceso en el que se succiona aire o éste queda atrapado en el líquido). Una alternativa común a los bebederos cónicos es el uso de bebederos con lados rectos, los cuales poseen un mecanismo de **estrangulación** en el fondo, que consiste en un núcleo o un canal de estrangulación. El estrangulador reduce el flujo lo suficiente para evitar la aspiración en el bebedero.

Modelación. Otra aplicación de las ecuaciones anteriores es la *modelación del llenado del molde*. Por ejemplo, considérese la situación mostrada en la figura 10.8, donde se vierte metal fundido en una copa de vaciado; fluye a través de un bebedero hacia un canal y una compuerta, y llena la cavidad del molde. Si la copa tiene un área de sección transversal mucho mayor que la del fondo del bebedero, entonces la velocidad del metal fundido en la parte superior de la copa es muy baja y puede considerarse cero. Si las pérdidas por fricción se deben a una disipación viscosa de energía, entonces f en la ecuación 10.3 se puede considerar una función de la distancia vertical y con frecuencia se aproxima a una función lineal. Por lo tanto, la velocidad del metal fundido que abandona la compuerta se obtiene de la ecuación 10.3 como

$$v = c\sqrt{2gh}$$

donde h es la distancia desde la base del bebedero hasta la altura del metal líquido y c un factor de fricción. Para un flujo sin fricción, c es igual a la unidad y se encuentra siempre

entre 0 y 1. La magnitud de c varía con el material del molde, la disposición y el tamaño del canal, y puede incluir pérdidas de energía debidas a turbulencia y a efectos viscosos.

Si el nivel del líquido ha alcanzado una altura x, entonces la velocidad en la compuerta es

$$v = c\sqrt{2g}\sqrt{h - x}$$

El gasto a través de la compuerta será el producto de esta velocidad y el área de la compuerta, según la ecuación 10.4. La forma de la fundición determinará la altura como una función del tiempo. Integrando la ecuación 10.4 se obtiene el tiempo medio de llenado y el gasto, y dividiendo el volumen de la fundición entre este gasto medio se obtiene el tiempo de llenado del molde.

La simulación de llenado del molde ayuda a los diseñadores a especificar el diámetro del canal, así como el tamaño y número de bebederos y copas de vaciado. Para asegurar que los canales se mantengan abiertos, el tiempo de llenado debe ser una pequeña fracción del tiempo de solidificación, pero la velocidad no debe ser tan alta como para erosionar el material del molde (a lo que se conoce como *lavado del molde*) o para producir un número de Reynolds demasiado alto (ver la siguiente parte). En caso contrario, se produce turbulencia y se atrapa aire. Por fortuna, ya existen muchas herramientas computacionales para evaluar los diseños de los sistemas de alimentación y ayudar a dimensionar los componentes.

Características del flujo. Un factor que debe considerarse en el flujo del fluido en los sistemas de alimentación es la presencia de **turbulencia**, en oposición al *flujo laminar* de los fluidos. El *número de Reynolds* (Re) se utiliza para cuantificar este aspecto del flujo del fluido. Representa la relación entre las fuerzas de la *inercia* y las de la *viscosidad*, y se define como

$$\text{Re} = \frac{vD\rho}{\eta} \tag{10.6}$$

donde v es la velocidad del líquido, D el diámetro del canal, y ρ y η son la densidad y la viscosidad del líquido, respectivamente. Cuanto mayor sea el número de Reynolds, mayor será la tendencia a que ocurra el flujo turbulento.

En los sistemas de alimentación, Re varía típicamente entre 2000 y 20,000, en donde un valor superior a 2000 representa flujo laminar. Entre 2000 y 20,000 representa una mezcla de flujo laminar y turbulento. Por lo general, esta mezcla se considera inofensiva en los sistemas de alimentación. Sin embargo, los valores de Re superiores a 20,000 constituyen una turbulencia severa, lo que produce aire atrapado y la formación de *espuma* (nata que se forma en la superficie del metal fundido) por la reacción del metal líquido con el aire y otros gases. En general, para minimizar la turbulencia hay que evitar cambios súbitos en la dirección del flujo y en la geometría de las secciones transversales del canal en el diseño del sistema de alimentación.

La espuma o la escoria se pueden eliminar casi en su totalidad sólo mediante la *fundición al vacío* (sección 11.3.2). La fundición convencional atmosférica mitiga la espuma o la escoria mediante *(a)* desnatado, *(b)* el uso de sistemas de copas y canales de vaciado diseñados apropiadamente, o *(c)* el uso de filtros, que también pueden eliminar el flujo turbulento en el sistema de canales. Por lo general, los filtros se fabrican con cerámicas, mica o fibra de vidrio; su ubicación y colocación apropiadas son importantes para el filtrado efectivo de la nata y la escoria.

10.4 Fluidez del metal fundido

A la capacidad del metal fundido para llenar las cavidades del molde se le llama *fluidez*, que consta de dos factores básicos: (1) las características del metal fundido y (2) los parámetros de fundición. Las siguientes características del metal fundido afectan la fluidez.

Viscosidad. Al aumentar la viscosidad y su sensibilidad a la temperatura (*índice de viscosidad*), la fluidez disminuye.

Tensión superficial. Una tensión superficial elevada en el metal líquido reduce su fluidez. Por esta causa, las películas de óxido sobre la superficie del metal fundido tienen un efecto adverso significativo sobre la fluidez. Por ejemplo, una película de óxido sobre la superficie del aluminio puro fundido triplica la tensión superficial.

Inclusiones. Las inclusiones pueden afectar significativamente la fluidez debido a que son insolubles. Este efecto se puede verificar observando la viscosidad de un líquido (como el aceite) con partículas de arena o sin ellas; el líquido con arena tiene una viscosidad mayor y, por lo tanto, una fluidez menor.

Patrón de solidificación de la aleación. La manera en que ocurre la solidificación (sección 10.2) puede afectar la fluidez. Más aún, la fluidez es inversamente proporcional al intervalo de solidificación. Cuanto menor es el intervalo (como en los metales puros y en los eutécticos), mayor será la fluidez. Por el contrario, las aleaciones con intervalos más largos de solidificación (como las aleaciones de soluciones sólidas) tienen una fluidez menor.

Los siguientes parámetros de fundición afectan la fluidez y también pueden afectar el flujo del fluido y las características térmicas del sistema.

Diseño del molde. El diseño y las dimensiones del bebedero, los canales y las mazarotas, afectan la fluidez.

Material del molde y sus características superficiales. Cuanto mayor sea la conductividad térmica del molde y más rugosas sus superficies, menor será la fluidez del metal fundido. Aunque el calentamiento del molde mejora la fluidez, también hace más lenta la solidificación del metal. Por ende, la fundición desarrolla granos más gruesos y, de ahí, una menor resistencia.

Grado de sobrecalentamiento. El sobrecalentamiento (definido como el incremento de temperatura de una aleación por encima de su punto de fusión) mejora la fluidez al retrasar la solidificación. Con frecuencia se especifica la **temperatura de vaciado** en lugar del grado de sobrecalentamiento, porque aquélla se determina más fácilmente.

Velocidad de vaciado. Cuanto menor sea la velocidad de vaciado del metal fundido dentro del molde, menor será la fluidez, debido a que la velocidad de enfriamiento es mayor cuando se vacía lentamente.

Transferencia de calor. Este factor afecta directamente la viscosidad del metal líquido (ver más adelante).

Aunque complejo, el concepto **capacidad de fundición** (colabilidad) se utiliza generalmente para describir la facilidad con que un metal puede fundirse para producir una parte con buena calidad. Este término no sólo incluye la fluidez, sino también la naturaleza de las prácticas de fundición.

10.4.1 Pruebas de fluidez

Se han desarrollado varias pruebas para cuantificar la fluidez, aunque ninguna se acepta de manera universal. En una prueba común de este tipo, se hace fluir el metal fundido a lo largo de un canal que se encuentra a la temperatura ambiente (fig. 10.9); la distancia que recorre el metal antes de solidificarse y detenerse es una medida de su fluidez. Obviamente, tal longitud está en función de las propiedades térmicas del metal y del molde, así como del diseño del canal. Aun así, dichas pruebas de fluidez son útiles y simulan situaciones de fundición en un grado razonable.

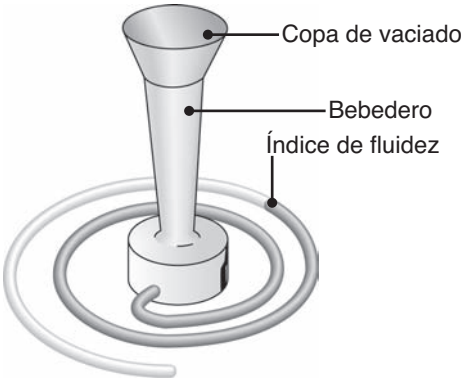


FIGURA 10.9 Método de prueba de fluidez en el que se utiliza un molde espiral. El *índice de fluidez* es la longitud del metal solidificado en el pasaje espiral. Cuanto mayor sea la longitud del metal solidificado, mayor será la fluidez.

10.5 Transferencia de calor

La transferencia de calor durante el ciclo completo (desde el vaciado a la solidificación y el enfriamiento a la temperatura ambiente) es otro factor que debe considerarse en la fundición de metales. El flujo de calor en diferentes puntos del sistema es un fenómeno complejo y depende de varios factores relacionados con el metal que se está fundiendo y con parámetros del molde y del proceso. Por ejemplo, en la fundición de secciones delgadas, las velocidades de flujo del metal deben ser lo suficientemente altas para evitar un enfriamiento y solidificación prematuros. Por otro lado, el gasto no debe ser tan elevado como para provocar turbulencia excesiva, con sus efectos dañinos en el proceso de fundición.

En la figura 10.10 se muestra una distribución típica de temperaturas en la interfaz líquido-metal del molde. El calor del metal líquido se libera a través de las paredes del molde y hacia el aire circundante. La temperatura baja en las interfaces aire-molde y molde-metal por la presencia de capas limítrofes y el contacto imperfecto en estas interfaces. La forma de la curva depende de las propiedades térmicas del metal fundido y del molde.

10.5.1 Tiempo de solidificación

Durante las etapas iniciales de la solidificación, comienza a formarse una delgada capa superficial solidificada en las paredes frías del molde, y conforme pasa el tiempo, el espesor de la capa aumenta (fig. 10.11). Con las paredes rectas de los moldes, este espesor es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo. Cuando éste se duplica, por consiguiente, la capa se vuelve $\sqrt{2} = 1.41$ veces (o 41%) más gruesa.

El **tiempo de solidificación** está en función del volumen de una fundición y de su área superficial (*regla de Chvorinov*):

$$\text{Tiempo de solidificación} = C\left(\frac{\text{Volumen}}{\text{Área de superficie}}\right)^n \qquad (10.7)$$

donde C es una constante que refleja *(a)* el material del molde, *(b)* las propiedades del metal (incluyendo el calor latente) y *(c)* la temperatura. El parámetro n tiene un valor de entre 1.5 y 2, pero por lo general se considera 2. Por lo tanto, una esfera sólida grande se

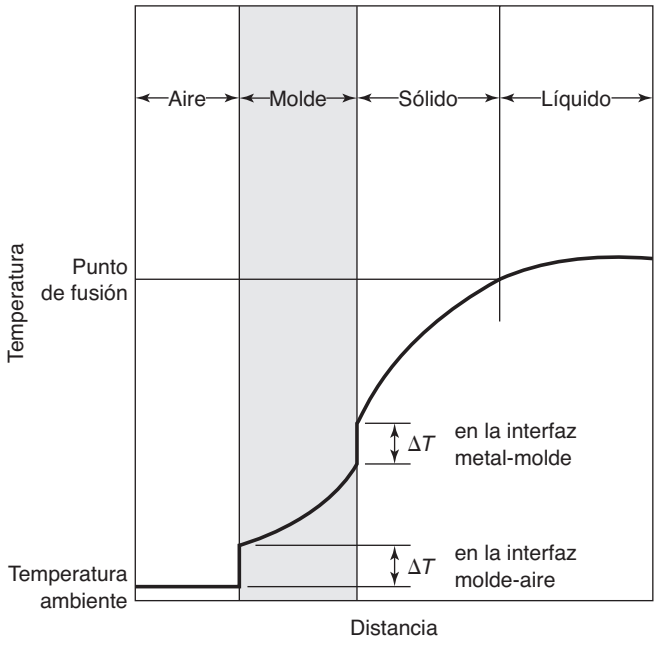


FIGURA 10.10 Distribución de la temperatura en la interfaz de la pared del molde y el metal líquido durante la solidificación de los metales en fundición.

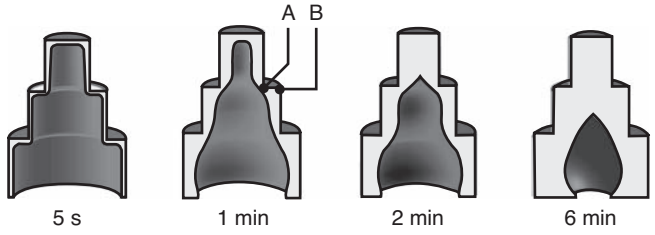


FIGURA 10.11 Capa superficial solidificada en una fundición de acero. El metal fundido restante se extrae en los tiempos indicados en la figura. Los objetos huecos decorativos se fabrican mediante un proceso llamado fundición hueca, que se basa en este principio. *Fuente*: H. F. Taylor, J. Wulff y M. C. Flemings.

solidificará y enfriará a la temperatura ambiente a una velocidad mucho menor que una esfera sólida pequeña. La razón de esto es que el volumen de una esfera es proporcional al cubo de su diámetro, y el área superficial es proporcional al cuadrado de su diámetro. De manera similar, puede demostrarse que el metal fundido se solidifica más rápido en un molde con forma de cubo que en uno esférico del mismo volumen (ver ejemplo 10.1).

En la figura 10.11 se muestran los efectos de la geometría del molde y el tiempo transcurrido sobre la forma y el espesor de la capa superficial. Como se ilustra, el metal fundido no solidificado se ha vaciado del molde a diferentes intervalos de tiempo, que van de cinco segundos a seis minutos. Obsérvese que (como se esperaba) el espesor de la capa superficial aumenta con el tiempo transcurrido y la capa es más delgada en los ángulos internos (punto *A* de la figura) que en los externos (punto *B*). Esta última condición es ocasionada por un enfriamiento más lento en los ángulos internos que en los externos.

EJEMPLO 10.1 Tiempos de solidificación para varias formas

Se están fundiendo tres piezas metálicas que tienen el mismo volumen, pero diferentes formas: una esfera, un cubo y un cilindro cuya altura es igual a su diámetro. ¿Cuál de las piezas se solidificará primero y cuál será la más lenta? Supóngase que $n = 2$.

Solución Se considera el volumen de cada pieza como la unidad. Entonces, de la ecuación 10.7:

$$\text{Tiempo de solidificación} \propto \frac{1}{(\text{Área de la superficie})^2}$$

Las áreas superficiales son las siguientes:

Esfera:

$$V = \left(\frac{4}{3}\right)\pi r^3,\ r = \left(\frac{3}{4\pi}\right)^{1/3}$$

$$A = 4\pi r^2 = 4\pi\left(\frac{3}{4\pi}\right)^{2/3} = 4.84$$

Cubo:

$$V = a^3,\ a = 1,\ \text{y}\ A = 6a^2 = 6$$

Cilindro:

$$V = \pi r^2 h = 2\pi r^3,\ r = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^{1/3}$$

$$A = 2\pi r^2 + 2\pi rh = 6\pi r^2 = 6\pi\left(\frac{1}{2\pi}\right)^{2/3} = 5.54$$

Por lo tanto, los tiempos de solidificación respectivos son:

$$t_{\text{esfera}} = 0.043C,\ t_{\text{cubo}} = 0.028C,\ t_{\text{cilindro}} = 0.033C$$

Entonces, la pieza con forma de cubo se solidificará más rápido y la esférica lo hará más despacio.

10.5.2 Contracción

Debido a sus características de dilatación térmica, los metales en general se contraen (comprimen) durante la solidificación y se enfrían a la temperatura ambiente. La *contracción*, que provoca cambios dimensionales y (algunas veces) agrietamiento, es el resultado de tres eventos consecutivos:

1. La contracción del metal fundido al enfriarse antes de solidificar.
2. La contracción del metal durante el cambio de fase de líquido a sólido (calor latente de fusión).
3. La contracción del metal solidificado (la fundición) conforme su temperatura se reduce a la temperatura ambiente.

La mayor medida potencial de contracción ocurre cuando la fundición se enfría a la temperatura ambiente. En la tabla 10.1 se muestra la medida en que se contraen diver-

TABLA 10.1

Contracción o dilatación volumétrica por solidificación para diversos metales fundidos

Contracción (%)		Dilatación (%)	
Aluminio	7.1	Bismuto	3.3
Zinc	6.5	Silicio	2.9
Al-4.5% de Cu	6.3	Hierro gris	2.5
Oro	5.5		
Hierro blanco	4–5.5		
Cobre	4.9		
Bronce (70–30)	4.5		
Magnesio	4.2		
90% de Cu-10% de Al	4		
Aceros al carbono	2.5–4		
Al-12% de Si	3.8		
Plomo	3.2		

sos metales durante la solidificación. Obsérvese que algunos metales (como el hierro fundido gris) se dilatan (la razón es que el grafito tiene un volumen específico relativamente alto y cuando se precipita en forma de hojuelas de grafito, al solidificarse la fundición de hierro gris, provoca una dilatación neta del metal). En la sección 12.2.1 se estudia la contracción, respecto de las consideraciones de diseño para la fundición.

10.6 Defectos

Como se verá en esta sección (y en otras de las partes II a VI), en los procesos de manufactura pueden desarrollarse diversos defectos, dependiendo de factores como los materiales, el diseño de la pieza y las técnicas de procesamiento. En tanto que algunos defectos sólo afectan la apariencia de las partes producidas, otros pueden tener efectos adversos importantes en su integridad estructural.

En las fundiciones se pueden desarrollar varios defectos (figs. 10.12 y 10.13). Debido a que en el pasado se utilizaron diferentes nombres para describir el mismo defecto, el International Committee of Foundry Technical Associations ha elaborado una nomenclatura estandarizada que consta de siete categorías básicas de defectos de fundición, identificadas con letras mayúsculas en negritas:

- **A: Proyecciones metálicas**: consisten en aletas, rebabas o proyecciones, como ampollas y superficies rugosas.
- **B: Cavidades:** consisten en cavidades redondeadas o rugosas, internas o expuestas, incluyendo sopladuras, puntas de alfiler y cavidades por contracción (ver *porosidad*, sección 10.6.1).
- **C: Discontinuidades:** como grietas, desgarramientos en frío o en caliente, y puntos frío. Si no se permite que el metal se contraiga libremente al solidificarse, pueden presentarse grietas y desgarres. Aunque varios factores están involucrados en el desgarramiento, el tamaño grueso del grano y la presencia de segregaciones de bajo punto de fusión a lo largo de los límites de los granos (*intergranulares*) incrementan la tendencia al desgarramiento en caliente. El punto *frío* es una interfaz en una fundición que no se funde totalmente debido al encuentro de dos corrientes de metal líquido provenientes de dos compuertas diferentes.
- **D: Superficie defectuosa:** como pliegues, traslapes y cicatrices superficiales, capas de arena adherida y escamas de óxido.

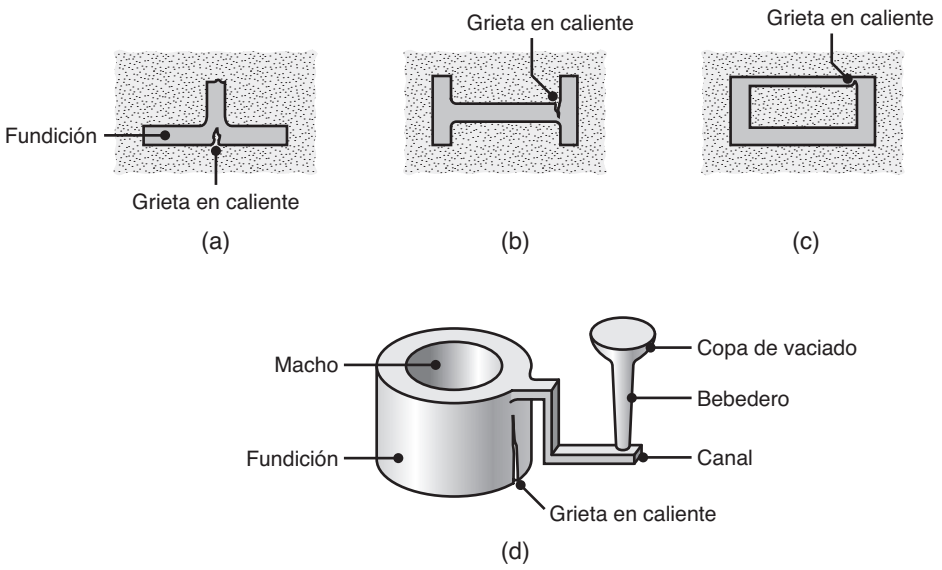


FIGURA 10.12 Ejemplos de grietas o desgarramientos en caliente en las fundiciones. Estos defectos obedecen a que la fundición no se puede contraer con libertad durante el enfriamiento, debido a restricciones en diversas partes de los moldes y los machos. Se pueden utilizar compuestos exotérmicos (productores de calor) como amortiguadores exotérmicos para controlar el enfriamiento en secciones críticas y evitar los agrietamientos en caliente.

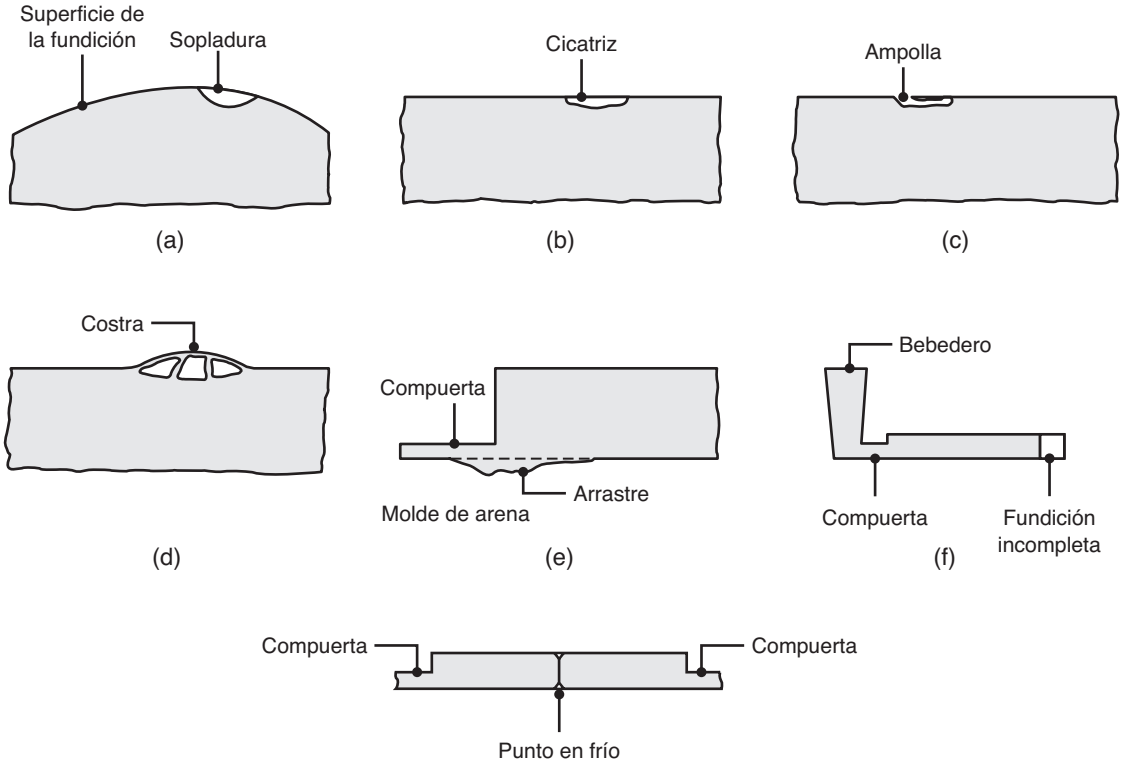


FIGURA 10.13 Ejemplos de defectos comunes en las fundiciones. Estos defectos se pueden minimizar o eliminar mediante el diseño apropiado, la preparación de los moldes y el control de los procedimientos de vaciado. *Fuente:* J. Datsko.

E: Fundición incompleta: como fallas (debidas a solidificación prematura), volumen insuficiente del metal vaciado y fugas (por la pérdida de metal del molde después de haber sido vaciado). Las fundiciones incompletas también pueden provenir de una temperatura muy baja del metal fundido o de un vaciado muy lento del mismo.

F: Dimensiones o formas incorrectas: debido a factores como tolerancia inapropiada para la contracción, error de montaje del modelo, contracción irregular, modelo deformado o fundición alabeada.

G: Inclusiones: se forman durante la fusión, solidificación y moldeo; en general son no metálicas. Se consideran dañinas porque actúan como multiplicadoras de esfuerzos y, por lo tanto, reducen la resistencia de la fundición. Durante el procesamiento del metal fundido se pueden filtrar partículas tan pequeñas como 30 μm. Las inclusiones se pueden formar durante la fusión, cuando el metal fundido reacciona con el medio ambiente (por lo común oxígeno) o con el crisol o el material del molde; por reacciones químicas entre los componentes del metal fundido; o a partir de escorias y otros materiales extraños atrapados en el metal fundido. El astillado de la superficie del molde y de los corazones o machos también puede producir inclusiones, lo que indica la importancia de la calidad de los moldes y de su mantenimiento.

10.6.1 Porosidad

La *porosidad* en una fundición puede ser ocasionada por *contracción*, *gases*, o por ambos. Se pueden desarrollar regiones porosas debido a la **contracción** del metal solidificado. Las secciones delgadas de una fundición se solidifican antes que las regiones gruesas; en consecuencia, el metal fundido fluye dentro de las regiones más gruesas que aún no se han solidificado. Las regiones porosas se pueden desarrollar en la parte central debido a la contracción, ya que la región más gruesa comienza a solidificarse primero. También puede desarrollarse *microporosidad* cuando el metal líquido se solidifica y contrae entre las dendritas y entre sus ramas.

La porosidad es dañina para la ductilidad de una fundición y para su acabado superficial, haciéndola permeable y, por lo tanto, afectando la hermeticidad de recipientes presurizados producidos por fundido. La porosidad ocasionada por la contracción se puede reducir o eliminar por los siguientes medios:

- Debe suministrarse la cantidad adecuada de metal líquido para evitar las cavidades ocasionadas por la contracción.
- Los **enfriadores** internos o externos, como los utilizados en la fundición en arena (fig. 10.14), también son un medio efectivo de reducir la porosidad por contracción. Su función consiste en aumentar la velocidad de solidificación en las regiones críticas. En general, los enfriadores internos se fabrican con el mismo material que la fundición y se dejan dentro de ella. Sin embargo, pueden surgir problemas relativos a la fusión apropiada de los enfriadores internos con la fundición; por ello, los talleres de fundición suelen evitar el uso de dichos enfriadores. Los enfriadores externos pueden ser del mismo material o ser de hierro, cobre o grafito.
- En las aleaciones, la porosidad se puede reducir o eliminar haciendo más pronunciado el gradiente de temperatura. Por ejemplo, es posible utilizar materiales para moldes que tienen una mayor conductividad térmica.
- Otro método para reducir la porosidad consiste en someter la fundición a un *prensado isostático en caliente* (ver sección 17.3.2).

Debido a que los metales líquidos tienen una solubilidad mucho mayor para los **gases** que los metales sólidos (fig. 10.15), cuando un metal comienza a solidificarse, los gases disueltos se expelen de la solución. Los gases también pueden provenir de la reac-

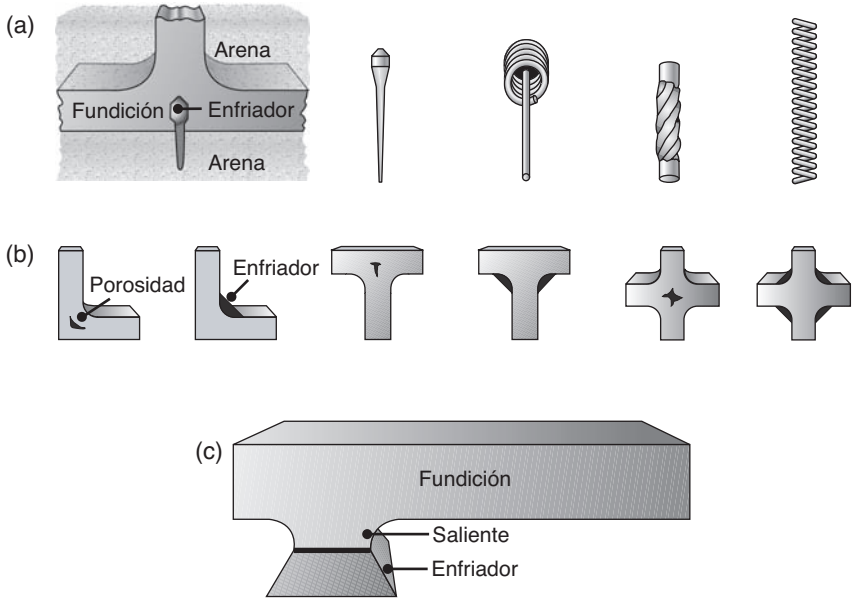


FIGURA 10.14 Diversos tipos de enfriadores *(a)* internos y *(b)* externos (áreas oscuras en la esquinas) utilizados en las fundiciones para eliminar la porosidad originada por la contracción. Los enfriadores se colocan en regiones en las que existe un gran volumen de metal, como se muestra en *(c)*.

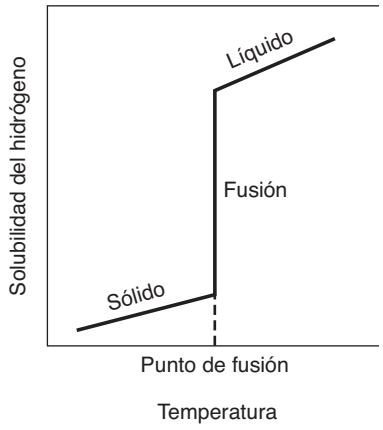


FIGURA 10.15 Solubilidad del hidrógeno en aluminio. Observe la disminución abrupta de la solubilidad conforme el metal fundido comienza a solidificarse.

ción del metal fundido con los materiales del molde. Los gases se acumulan en zonas donde existe porosidad (como en las regiones interdendríticas), u originan microporosidad en la fundición, sobre todo en el hierro, aluminio y cobre fundidos. Los gases disueltos se pueden retirar del metal fundido mediante el *lavado* o *purgado*, con un gas inerte, o fundiendo y vaciando el metal al vacío. Si el gas disuelto es oxígeno, el metal fundido se puede *desoxidar*. En general, el acero se desoxida con materiales de aluminio, silicio, aleaciones a base de cobre con cobre fosforoso, titanio y zirconio.

Es difícil determinar si la microporosidad es el resultado de la contracción o si la causan los gases. Si la porosidad es esférica y tiene paredes lisas (similar a los agujeros brillantes del queso suizo), generalmente se debe a gases; pero si las paredes son rugosas y angulares, es probable que se deba a la contracción entre dendritas. La porosidad gruesa obedece a la contracción y por lo común se le llama **cavidad por contracción**.

EJEMPLO 10.2 Fundición de pistones automovilísticos de aluminio

En la figura 10.16 se muestra un pistón de aluminio utilizado en motores automovilísticos de combustión interna. Estos productos se pueden manufacturar a velocidades muy altas, con tolerancias dimensionales estrechas y estrictos requisitos de materiales para lograr una operación apropiada. Los intereses económicos son obviamente mayúsculos, y es fundamental que los pistones se produzcan con un mínimo de costosas operaciones de acabado y con muy pocas piezas rechazadas.

Los pistones de aluminio se manufacturan mediante fundición debido a su capacidad para producir piezas con formas cercanas a la neta a las velocidades de producción requeridas. Sin embargo, con moldes diseñados de manera deficiente, llenados incompletos o porosidad excesiva, se puede ocasionar el rechazo de las partes, lo que aumentaría el costo. Tradicionalmente, estos defectos se controlaban mediante grandes tolerancias de maquinado, en conjunto con un diseño intuitivo de los moldes basado en la experiencia.

Los pistones se producen con aleaciones cuyo contenido de silicio es alto, como la aleación de aluminio 413.0, que tiene una fluidez elevada y puede crear superficies de alta definición mediante la fundición de molde permanente; también posee alta resistencia a la corrosión, buena soldabilidad y baja gravedad específica. La aceptación universal de los pistones de aluminio para los motores de combustión interna se debe sobre todo a su ligereza y a su alta conductividad térmica. Su inercia reducida permite mayores velocidades del motor y un contrapeso reducido en el cigüeñal, en tanto que su mayor conductividad térmica permite una transferencia de calor más eficiente del motor.

El molde de acero para herramental H13 se precalienta de 200 °C a 450 °C, dependiendo de la aleación a fundir y del tamaño de la pieza. Inicialmente, el precalen-



FIGURA 10.16 Pistón de aluminio para un motor de combustión interna: *(a)* recién fundido, y *(b)* después del maquinado.

tamiento se logra con un soplete manual, pero después de unas pocas fundiciones el molde alcanza un perfil de temperatura estable. El aluminio fundido se calienta a entre 100 °C y 200 °C por encima de su temperatura de liquidus, y después se coloca una cantidad de metal en el punto de alimentación del molde. Una vez que la cantidad de metal fundido se encuentra en su lugar, un pistón empuja el metal dentro del molde. Debido a la alta conductividad térmica del material del molde, la extracción de calor del metal fundido es rápida y el metal se puede solidificar en pequeños canales antes de llenar totalmente el molde. En general, la solidificación comienza en un extremo de la fundición antes de que se llene por completo el molde.

Al igual que con la mayoría de las aleaciones, es deseable que la solidificación comience en un extremo de la fundición y que el frente de solidificación se transmita a través del volumen. Esto produce una microestructura solidificada direccionalmente y la eliminación de la porosidad gruesa que surge cuando dos frentes de solidificación se encuentran dentro de una fundición. Además, pueden presentarse zonas de defectos en la fundición, como rebajes, puntos calientes, porosidad, agrietamiento y aire atrapado (como las sopladuras y costras). Un diseño deficiente del molde podría ocasionar defectos en 5% de las fundiciones.

Para mejorar la confiabilidad y reducir los costos asociados con la fundición de molde permanente, se utiliza un programa de computadora para simular el llenado del molde y sugerir causas potenciales de los defectos. Los modelos de computadora utilizan las ecuaciones de Bernoulli y de continuidad —junto con la transferencia de calor y la solidificación— para modelar el proceso de fundición e identificar posibles deficiencias. Por ejemplo, en la figura 10.17 se muestra el resultado de una simulación de llenado de un molde, en donde permanece atrapada cierta cantidad de aire. Esto se corrige colocando un respiradero en el área correspondiente para permitir que el aire escape durante la fundición. La simulación en computadora permite a los diseñadores evaluar las características y geometrías de los moldes antes de comprar herramentales costosos, por lo que se ha convertido en un proceso indispensable para reducir costos y eliminar defectos en la fundición.

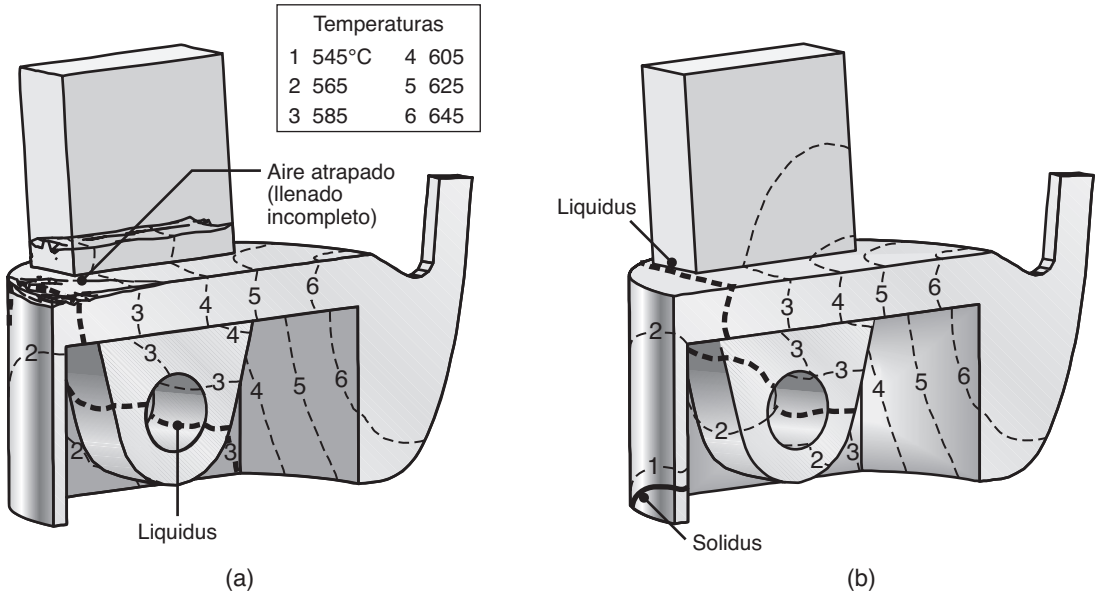


FIGURA 10.17 Simulación de llenado de un molde y solidificación. *(a)* 3.7 segundos después del inicio del vaciado. Observe que la zona pastosa se ha establecido antes de que el molde esté completamente lleno. *(b)* Utilizando respiraderos en el molde para retirar el aire atrapado, 5 segundos después del vaciado.

RESUMEN

- La fundición es un proceso de solidificación mediante el cual se vacía metal fundido dentro de un molde y se deja enfriar. El metal puede fluir a través de una variedad de pasajes (copas de vaciado, bebederos, canales de alimentación, mazarotas y compuertas) antes de alcanzar la cavidad final del molde. Las herramientas analíticas utilizadas en el diseño de fundiciones son el teorema de Bernoulli, la ley de continuidad de masa y el número de Reynolds, con los objetivos de obtener una velocidad apropiada del flujo y eliminar defectos asociados con la fluidez del fluido.
- La solidificación de los metales puros ocurre a temperatura constante, mientras que la de las aleaciones ocurre dentro de intervalos de temperatura. Los diagramas de fases son herramientas importantes para identificar el punto o puntos de solidificación de metales tecnológicamente importantes.
- La composición y las velocidades de enfriamiento del metal fundido afectan el tamaño y la forma de los granos y de las dendritas en la aleación que se está solidificando. A su vez, el tamaño y la estructura de los granos y de las dendritas influye en las propiedades de la fundición solidificada. El tiempo de solidificación está en función del volumen de la fundición y de su área superficial (regla de Chvorinov).
- La estructura de los granos de las fundiciones se puede controlar por diferentes medios para obtener las propiedades deseadas. Debido a que los metales se contraen durante la solidificación y el enfriamiento, se pueden formar cavidades en la fundición. La porosidad originada por los gases liberados durante la solidificación puede ser un problema significativo, en particular debido a su efecto adverso sobre las propiedades mecánicas de las fundiciones. También podrían presentarse diversos defectos en las fundiciones a causa de la falta de control de las variables del material y del proceso.
- Aunque la mayoría de los metales se contraen durante la solidificación, el hierro fundido gris y algunas aleaciones de aluminio en realidad se dilatan. Los cambios dimensionales y el agrietamiento (hojeamiento en caliente) son dificultades que pueden surgir durante la solidificación y el enfriamiento. Se han clasificado siete categorías básicas de defectos de fundición.
- Las prácticas de fusión tienen el mismo efecto directo en la calidad de las fundiciones que las operaciones en los talleres de fundición, como la producción de diseños y moldes, el vaciado del metal fundido, la remoción de partes fundidas de los moldes, limpieza, tratamiento térmico e inspección.

TÉRMINOS CLAVE

Aspiración
Bebedero
Canales de alimentación
Capa superficial
Compuerta
Contracción
Copa de vaciado
Dendritas
Dendritas columnares
Dendritas con núcleo
Enfriadores
Fluidez
Fundición
Granos columnares
Inoculante
Macrosegregación
Mazarotas
Microsegregación
Molde
Nucleación heterogénea
Nucleación homogénea
Número de Reynolds
Porosidad
Rango de solidificación o de congelamiento
Segregación
Sistema de alimentación
Solidificación
Teorema de Bernoulli
Turbulencia
Zona pastosa

BIBLIOGRAFÍA

Alexiades, V., *Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes,* Hemisphere, 1993.

Analysis of Casting Defects, American Foundrymen's Society, 1974.

ASM Handbook, Vol. 15: *Casting*, ASM International, 1998.

Bradley, E. F., *High-Performance Castings: A Technical Guide*, Edison Welding Institute, 1989.

Campbell, J., *Castings*, Butterworth-Heinemann, 1991.

Casting in Tool and Manufacturing Engineers Handbook, Volume II: *Forming*, Society of Manufacturing Engineers, 1984.

Casting Defects Handbook, American Foundrymen's Society, 1972.

Flemings, M. C., *Solidification Processing*, McGraw-Hill, 1974.

Heine, R., *Principles of Metal Casting,* McGraw-Hill, 1999.

Lieberman, H. H. (ed.), *Rapidly Solidified Alloys*, Marcel Dekker, 1993.

Mikelonis, P. J. (ed.), *Foundry Technology: A Source Book*, ASM International, 1982.

Minkoff, I., *Solidification and Cast Structure*, Wiley, 1986.

Steel Castings Handbook, 6a. ed., Steel Founders' Society of America, 1995.

Szekely, J., *Fluid Flow Phenomena in Metals Processing,* Academic Press, 1979.

PREGUNTAS DE REPASO

10.1 ¿Por qué la fundición es un proceso importante de manufactura?

10.2 ¿Cuál es la diferencia entre la solidificación de los metales puros y las aleaciones metálicas?

10.3 ¿Qué son las dendritas?

10.4 Establezca la diferencia entre rangos de solidificación cortos y largos. ¿Cómo se determina el rango?

10.5 ¿Qué es el sobrecalentamiento?

10.6 Defina contracción y porosidad. ¿Cómo puede saber si las cavidades en una fundición se deben a porosidad o a contracción?

10.7 ¿Cuál es la función de los enfriadores?

10.8 ¿Qué es el número de Reynolds? ¿Por qué es importante en la fundición?

10.9 ¿Cómo se define la fluidez? ¿Por qué es importante?

10.10 Explique las razones de los desgarramientos en caliente en las fundiciones.

10.11 ¿Por qué es importante retirar la nata o escoria durante el vaciado del metal líquido dentro del molde? ¿Qué métodos se utilizan para retirarlos?

10.12 ¿Cuáles son los efectos de los materiales para moldes en el flujo del fluido y la transferencia de calor?

10.13 ¿Por qué es importante la ecuación de Bernoulli en la fundición?

10.14 Describa la tixofundición y la reofundición.

PROBLEMAS CUALITATIVOS

10.15 Describa las etapas comprendidas en la contracción de los metales durante la fundición.

10.16 Explique las razones por las que la transferencia de calor y el flujo del fluido son importantes en la fundición de los metales.

10.17 Sabemos que vaciar metal a alta velocidad dentro de un molde tiene ciertas desventajas. ¿Existe alguna desventaja en vaciarlo muy lentamente?

10.18 Describa los eventos mostrados en la figura 10.5.

10.19 ¿Le preocuparía el hecho de que partes de los enfriadores internos se dejan dentro de la fundición? ¿Qué materiales cree que deberían utilizarse para fabricar los enfriadores y por qué?

10.20 ¿Qué demostraciones prácticas puede ofrecer para indicar la relación del tiempo de solidificación con el volumen y el área de la superficie?

10.21 Explique por qué desearía someter una fundición a diferentes tratamientos térmicos.

10.22 ¿Por qué la porosidad tiene efectos dañinos en las propiedades mecánicas de las fundiciones? ¿La porosidad también podría afectar las propiedades físicas (como la conductividad térmica y eléctrica)? Explique su respuesta.

10.23 Se va a fundir un volante manual de rayos en hierro gris. Para evitar el desgarramiento en caliente de los rayos, ¿los aislaría, o los enfriaría? Explique su respuesta.

10.24 ¿Cuál(es) de la(s) siguiente(s) consideración(es) es(son) importante(s) para que una mazarota funcione apropiadamente? Ésta(s) debe(n): *(a)* tener un área superficial mayor que la parte que se está fundiendo, *(b)* mantenerse abierta(s) a la presión atmosférica, y/o *(c)* solidificar primero? ¿Por qué?

10.25 Explique por qué la constante C en la ecuación 10.7 depende del material del molde, de las propiedades del metal y de la temperatura.
10.26 ¿Los enfriadores externos son tan efectivos como los internos? Explique su respuesta.
10.27 Explique por qué la fundición de hierro gris sufre una dilatación en lugar de una contracción durante la solidificación, como se muestra en la tabla 10.1.
10.28 En relación con la figura 10.11, explique por qué las esquinas internas (como *A*) desarrollan una capa superficial más delgada que las esquinas externas (como *B*) durante la solidificación.
10.29 Observe la forma de las dos mazarotas de la figura 10.8 y discuta sus observaciones en relación con la ecuación 10.7.
10.30 ¿Existe alguna diferencia entre la tendencia a la formación de huecos por contracción en los metales con rangos de solidificación cortos y largos, respectivamente? Explique su respuesta.
10.31 ¿Cuál es la influencia del área de sección transversal del canal espiral de la figura 10.9 sobre los resultados de la prueba de fluidez? ¿Cuál es el efecto de la altura del bebedero? Si esta prueba se realiza con el dispositivo de prueba calentado a temperaturas elevadas, ¿serían más útiles los resultados de la prueba? Explique su respuesta.
10.32 Los fundidores y fabricantes de lingotes han observado durante mucho tiempo que las temperaturas bajas de vaciado (es decir, sobrecalentamiento bajo) promueven la formación de granos equiaxiales sobre granos columnares. Igualmente, los granos equiaxiales se vuelven más finos al disminuir la temperatura de vaciado. Explique estos fenómenos.
10.33 ¿Qué esperaría que ocurriera (al fundir aleaciones metálicas) si el molde se agitara agresivamente después de que el metal fundido estuvo dentro del molde el tiempo suficiente para formar una capa superficial?
10.34 Si examina un cubo de hielo común, verá cavidades y grietas en el mismo. Sin embargo, algunos cubos de hielo son de forma tubular y no tienen cavidades de aire o grietas apreciables en su estructura. Explique este fenómeno.
10.35 ¿Cómo puede saber si las cavidades en una fundición se deben a contracción o a burbujas de aire atrapadas?
10.36 Describa las desventajas de tener una mazarota que sea: *(a)* demasiado grande, y *(b)* demasiado pequeña.
10.37 ¿Cuáles son los beneficios y perjuicios de tener una temperatura de vaciado que sea mucho mayor que la temperatura de fusión de un metal? ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de tener una temperatura de vaciado que permanezca cercana a la temperatura de fusión?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

10.38 Dibuje una gráfica de volumen específico en función de la temperatura para un metal que se contrae al enfriarse del estado líquido a la temperatura ambiente. En la gráfica, marque el área en la que las mazarotas compensan la contracción.
10.39 Una fundición redonda tiene 0.2 m (7.9 pulgadas) de diámetro y 0.5 m (19.7 pulgadas) de longitud. Otra fundición del mismo metal tiene sección transversal elíptica con una relación de ejes mayor a menor de 2 y tiene la misma longitud y área de sección transversal que la fundición redonda. Ambas piezas se funden en las mismas condiciones. ¿Cuál es la diferencia entre los tiempos de solidificación de las dos fundiciones?
10.40 Una placa cuadrada de 100 mm (4 pulgadas) de espesor y un cilindro recto circular con un radio de 100 mm (4 pulgadas) y una altura de 50 mm tienen el mismo volumen. Si se va a fundir cada uno de ellos utilizando una mazarota cilíndrica, ¿cada una de las piezas requerirá una mazarota del mismo tamaño para asegurar una alimentación apropiada? Explique su respuesta.
10.41 Suponga que la parte superior de un bebedero redondo tiene un diámetro de 3 pulgadas (75 mm) y una altura de 8 pulgadas (200 mm) desde el canal de alimentación. Con base en la ecuación 10.5, grafique el perfil del diámetro del bebedero, en función de su altura. Suponga que el fondo del bebedero tiene un diámetro de 0.25 pulgadas (6 mm).
10.42 Se vacía aluminio puro en un molde de arena. El nivel del metal en la copa de vaciado es 8 pulgadas por encima del nivel del metal dentro del molde y el canal de alimentación es circular con un diámetro de 0.5 pulgadas. ¿Cuál es la velocidad y el gasto del flujo de metal dentro del molde? ¿El flujo es laminar o turbulento?
10.43 Un cilindro con un diámetro de 1 pulgada y una altura de 3 pulgadas se solidifica en tres minutos en una operación de fundición en arena. ¿Cuál es el tiempo de solidificación si se duplica la altura del cilindro? ¿Cuál es el tiempo si se duplica el diámetro?
10.44 El gasto volumétrico de metal dentro de un molde es de 0.01 m^3/s. La parte superior del bebedero tiene un diámetro de 20 mm y una longitud de 200 mm. ¿Qué diámetro deberá especificarse para el fondo del bebedero a fin de evitar la aspiración? ¿Cuál es la velocidad y el número de Reynolds resultantes en el fondo del bebedero si el metal que se va a fundir es aluminio con una viscosidad de 0.004 Ns/m^2?
10.45 Un molde rectangular con dimensiones de 100 mm $\times$ 200 mm $\times$ 400 mm se llena con aluminio sin sobrecalentamiento. Determine las dimensiones finales de la parte al enfriarse a la temperatura ambiente. Repita el análisis para el hierro fundido gris.

10.46 La constante C en la regla de Chvorinov está dada como 3 s/mm^2 y se utiliza para producir una fundición cilíndrica con un diámetro de 75 mm y una altura de 125 mm. Estime el tiempo en que la fundición se solidificará totalmente. El molde se puede romper con seguridad cuando la cáscara solidificada tiene cuando menos 20 mm. Suponiendo que el cilindro se enfría de modo uniforme, ¿cuánto tiempo debe pasar después de vaciar el metal fundido para que se pueda romper el molde?

10.47 Suponga que es un instructor que domina los temas descritos en este capítulo y que está entregando un cuestionario sobre los aspectos numéricos para examinar el grado de comprensión de los estudiantes. Prepare dos problemas cuantitativos y proporcione las respuestas.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

10.48 ¿Puede proponer pruebas de fluidez distintas de la mostrada en la figura 10.9? Explique las características de sus métodos de prueba.

10.49 En la figura P10.49 se muestran diversos defectos y discontinuidades en productos fundidos. Revise cada uno de ellos y ofrezca soluciones para evitarlos.

10.50 La prueba de fluidez mostrada en la figura 10.9 sólo ilustra el principio de esta prueba. Diseñe una configuración para dicha prueba que muestre el tipo de materiales y el equipo a utilizar. Explique el método por el que determinaría la longitud del metal solidificado en el pasaje espiral.

10.51 Utilizando el equipo y los materiales disponibles en una cocina típica, diseñe un experimento para reproducir resultados similares a los mostrados en la figura 10.11. Comente sus observaciones.

10.52 Un método para relevar concentraciones de esfuerzos en una pieza es aplicando una pequeña deformación plástica uniforme a la misma. Liste sus preocupaciones y recomendaciones si se sugiere un método similar para una fundición.

10.53 Si a una fundición de cierta forma se le va a duplicar el volumen, describa los efectos sobre el diseño del molde, incluyendo el cambio requerido en el tamaño de las mazarotas, canales de alimentación, estranguladores y bebederos.

10.54 Con frecuencia quedan pequeñas cantidades de escoria después del desnatado y se introducen en el flujo del metal fundido en la fundición. Reconociendo que la escoria es mucho menos densa que el metal, diseñe características del molde que retiren pequeñas cantidades de escoria antes de que el metal llegue a la cavidad del molde.

10.55 En la figura II.1 se muestra una variedad de componentes en un automóvil común que se producen mediante fundición. Piense en otros productos, como herramientas eléctricas y pequeños electrodomésticos, y elabore una ilustración similar a la que se hizo en esa figura.

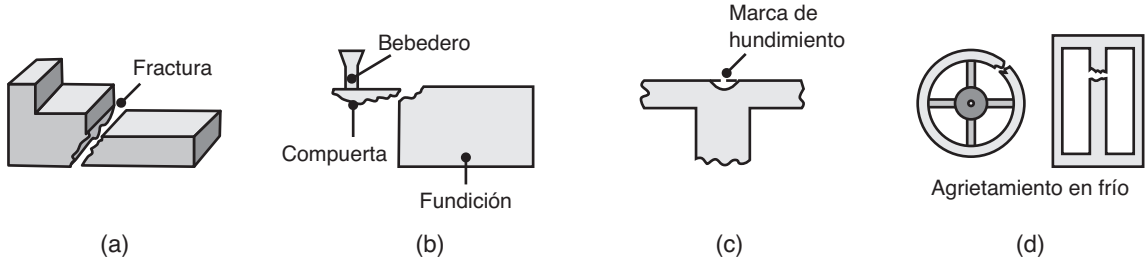
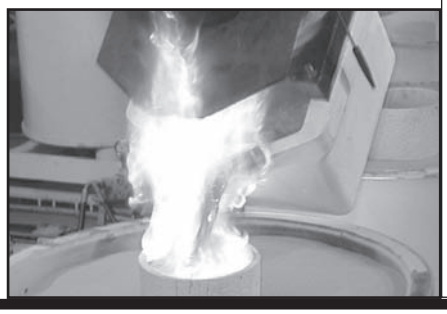


FIGURA P10.49

Procesos de fundición de metales

CAPÍTULO 11



En el capítulo anterior se estudiaron los fundamentos de la solidificación de los metales y los efectos del flujo del fluido y la transferencia del calor en los moldes; ahora se describirá en detalle:

- Las características de los procesos de molde desechable y de molde permanente.
- Las aplicaciones, ventajas y limitaciones de los procesos comunes de fundición.
- Fundición de monocristales.
- Técnicas de inspección para fundiciones.
- Breve revisión de los talleres de fundición y su automatización.

Productos fabricados comúnmente mediante fundición: monobloques para motores, cigüeñales, tapacubos, herramientas eléctricas, álabes para turbinas, plomería, dientes para cremalleras, matrices y moldes, engranes, ruedas de ferrocarril, propulsores, equipo de oficina, estatuas y cajas.

Procesos alternativos: forjado, metalurgia de polvos, maquinado y fabricación.

11.1 Introducción 285
11.2 Procesos de fundición de molde desechable 287
11.3 Procesos de fundición en molde permanente 303
11.4 Técnicas de fundición para componentes monocristalinos 312
11.5 Solidificación rápida 314
11.6 Inspección de las fundiciones 314
11.7 Prácticas y hornos para fusión 315
11.8 Talleres de fundición y su automatización 316

EJEMPLO:

11.1 Componentes de superaleaciones fundidas por revestimiento para turbinas de gas 303

ESTUDIO DE CASO:

11.1 Fundición a la espuma perdida de monobloques para motores 299

11.1 Introducción

Las primeras fundiciones metálicas se realizaron entre los años 4000 y 3000 a.C. mediante moldes de piedra y metal para fundir cobre. Con el paso del tiempo se han desarrollado diversos procesos de fundición, cada uno con características y aplicaciones propias (ver también fig. I.7a), a fin de cumplir requerimientos específicos de ingeniería y de servicio (tabla 11.1). Una gran variedad de partes y componentes se producen por medio de fundición, como monobloques para motores, cigüeñales, componentes automovilísticos y trenes de potencia (fig. 11.1), equipo agrícola y de ferrocarril, tubos y accesorios de plomería, herramientas eléctricas, cañones para armas, sartenes, equipo de oficina y componentes muy grandes para turbinas hidráulicas.

Dos tendencias han tenido un impacto importante en la industria de la fundición. La primera es la mecanización y automatización de este proceso, que ha conducido a cambios significativos en el uso del equipo y la mano de obra. Maquinaria avanzada y sistemas automáticos de control de procesos han reemplazado a los métodos tradicionales de fundición. La segunda tendencia importante es la creciente demanda de fundiciones de alta calidad, con tolerancias dimensionales cerradas.

Este capítulo está organizado conforme a las clasificaciones importantes de las prácticas de fundición (ver fig. II.2 en la Introducción a la parte II). Estas clasificaciones

TABLA 11.1

Resumen de procesos de fundición

Proceso	Ventajas	Limitaciones
En arena	Casi cualquier metal fundido; sin límite en el tamaño, forma o peso de la parte; bajo costo del herramental.	Se requiere algún acabado; acabado superficial relativamente grueso; tolerancias amplias.
Molde en cáscara	Buena precisión dimensional y acabado superficial; alta capacidad de producción.	Tamaño limitado de la pieza; modelos y equipos costosos.
Modelo evaporativo	La mayoría de los metales fundidos, sin límite de tamaño; partes de formas complejas.	Los modelos tienen baja resistencia y pueden ser costosos para pequeñas cantidades
Molde de yeso	Partes de formas intrincadas; buena tolerancia dimensional y acabado superficial; baja porosidad.	Limitado a metales no ferrosos; límite al tamaño de la parte y al volumen de producción; tiempo relativamente largo para fabricar el molde.
Molde cerámico	Partes de formas intrincadas; partes con tolerancias cerradas; buen acabado superficial.	Tamaño limitado de la parte.
Por revestimiento	Partes de formas intrincadas; excelente acabado superficial y precisión; casi cualquier metal fundido.	Partes de tamaño limitado; modelos, moldes y mano de obra costosos.
Molde permanente	Buen acabado superficial y tolerancia dimensional; baja porosidad; alta capacidad de producción.	Alto costo del molde; partes de tamaño y complejidad limitados; no es adecuado para metales con alto punto de fusión.
A presión en matriz	Excelente precisión dimensional y acabado superficial; alta capacidad de producción.	Alto costo de la matriz; partes de tamaño limitado; generalmente limitado a metales no ferrosos; largo tiempo de entrega.
Centrífuga	Grandes partes cilíndricas o tubulares con buena calidad; alta capacidad de producción.	Equipo costoso; partes de forma limitada.

se relacionan con los materiales del molde, los procesos de moldeo y los métodos de alimentación del molde con metal fundido. Las principales categorías son las siguientes:

1. **Moldes desechables,** que suelen producirse con arena, yeso, cerámica y materiales similares, y que por lo general se mezclan con diversos aglutinantes (*agentes de unión*) para mejorar sus propiedades. Un molde típico de arena consta de 90% de arena, 7% de arcilla y 3% de agua. Como se señaló en el capítulo 8, estos materiales son *refractarios* (esto es, capaces de soportar las altas temperaturas de los metales fundidos). Una vez que la fundición solidifica, se rompe el molde para retirarla.
2. **Moldes permanentes,** que se fabrican con metales que mantienen su resistencia a temperaturas elevadas. Como su nombre indica, se utilizan en repetidas ocasiones y se diseñan de manera que las fundiciones puedan retirarse con facilidad y sea posible utilizar el molde en la siguiente fundición. Los moldes metálicos son mejores conductores de calor que los moldes desechables no metálicos (ver tabla 3.1); por consiguiente, la fundición que se está solidificando experimenta una mayor velocidad de enfriamiento, lo que a su vez afecta la microestructura y el tamaño de grano de la misma.
3. **Moldes compósitos,** que se producen con dos o más materiales (como arena, grafito y metales) y combinan las ventajas de cada uno. Estos moldes tienen una parte permanente y otra desechable, y se utilizan en diversos procesos de fundición para mejorar la resistencia del molde, controlar las velocidades de enfriamiento y optimizar la economía global de los procesos de fundición.

En la tabla 11.2 se presentan las características generales de la fundición en arena y de otros procesos de fundición. Casi todos los metales utilizados comercialmente se pueden fundir. Y aunque el material del molde determina el acabado superficial, las fundiciones en arena tienen por lo general superficies rugosas y de aspecto granular, como era de esperarse. Las tolerancias dimensionales no suelen ser tan buenas como las del maquinado y otros procesos de forma neta. Sin embargo, mediante fundición se pueden producir formas intrincadas, como los monobloques de hierro fundido para motores y propulsores muy grandes para barcos transatlánticos.

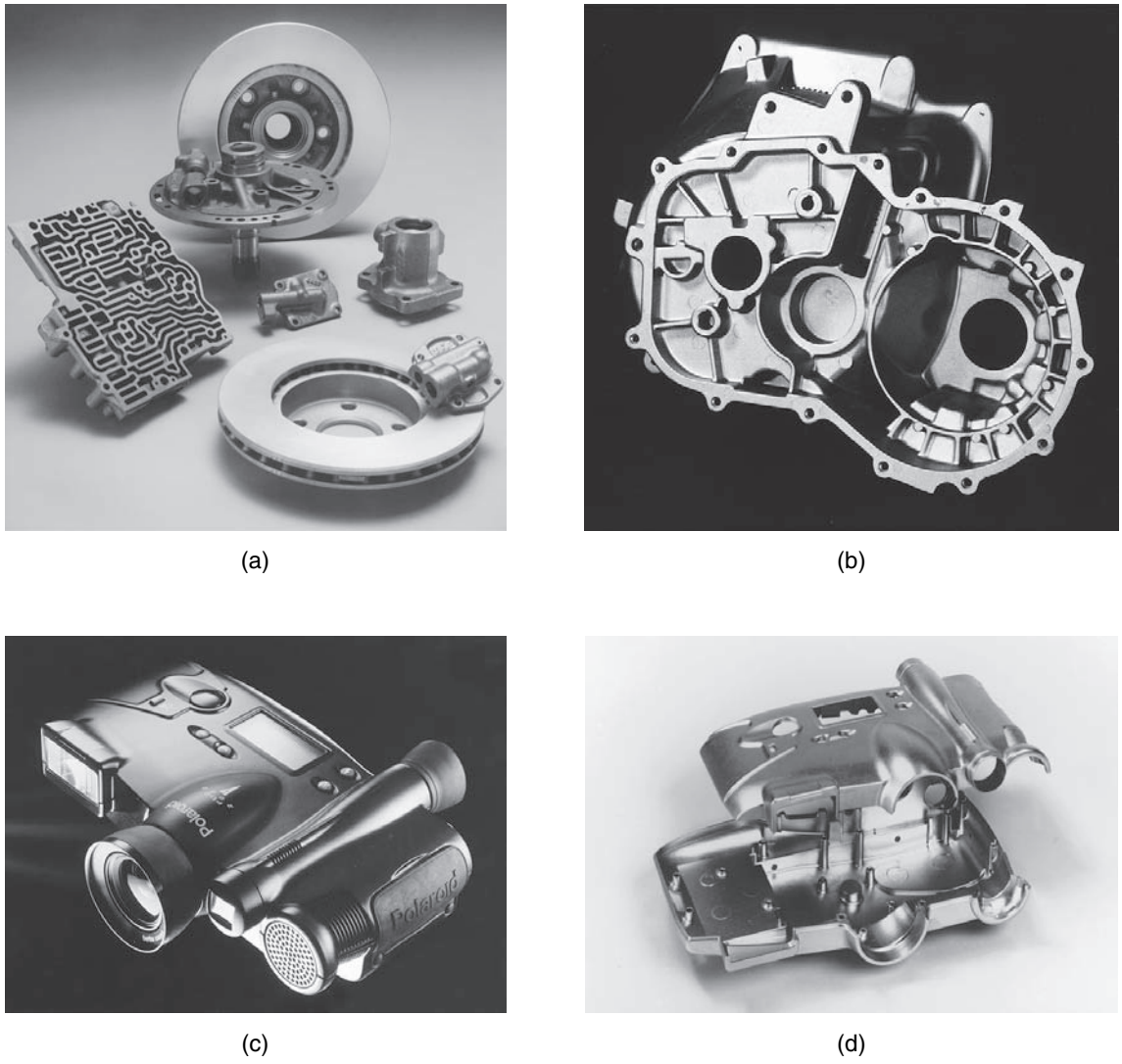


FIGURA 11.1 *(a)* Fundiciones comunes de hierro gris utilizadas en automóviles, incluyendo el cuerpo de la válvula de transmisión (izquierda) y el rotor de la masa con el cilindro de frenos (frente). *Fuente:* Cortesía de Central Foundry Division de General Motors Corporation. *(b)* Caja fundida para transmisión. *(c)* La cámara digital Polaroid PDC-2000 con una caja de magnesio de alta pureza AZ191D y fundición a presión en matriz. *(d)* Cámara Polaroid de dos piezas producida mediante el proceso de fundición a presión en matriz de cámara caliente. *Fuente:* Cortesía de Polaroid Corporation y Chicago White Metal Casting, Inc.

Debido a sus características y aplicaciones únicas, sobre todo en la manufactura de dispositivos microelectrónicos (parte V), en este capítulo también se describen técnicas básicas de crecimiento de cristales y se concluye con un breve resumen de los talleres de fundición modernos.

11.2 Procesos de fundición de molde desechable

Las principales categorías de fundición de moldes desechables son la fundición en arena, en molde de cáscara, en molde de yeso, en moldes cerámicos, de modelo evaporativo y de revestimiento.

TABLA 11.2

Características generales de los procesos de fundición

	Arena	Cáscara	Modelo evaporativo	Yeso	Revestimiento	Molde permanente	Matriz a presión	Centrífuga
Materiales fundidos comúnmente	Todos	Todos	Todos	No ferrosos (Al, Mg, Zn, Cu)	Todos	Todos	No ferrosos (Al, Mg, Zn, Cu)	Todos
Peso (kg):								
Mínimo	0.01	0.01	0.01	0.01	0.001	0.1	<0.01	0.01
Máximo	s/lím.	100+	100+	50+	100+	300	50	5000+
Tipo de acabado superficial (R_a en μm)	5–25	1–3	5–25	1–2	0.3–2	2–6	1–2	2–10
Porosidad[1]	3–5	4–5	3–5	4–5	5	2–3	1–3	1–2
Complejidad de forma[1]	1–2	2–3	1–2	1–2	1	2–3	3–4	3–4
Precisión dimensional[1]	3	2	3	2	1	1	1	3
Espesor sección (mm):								
Mínimo	3	2	2	1	1	2	0.5	2
Máximo	s/lím.	—	—	—	75	50	12	100
Tipo de tolerancia dimensional (mm/mm)	1.6–4 mm (0.25 mm para partes pequeñas)	±0.003		±0.005–0.010	±0.005	±0.015	±0.001–0.005	0.015
Costo[1,2]								
Equipo	3–5	3	2–3	3–5	3–5	2	1	1
Modelo/matriz	3–5	2–3	2–3	3–5	2–3	2	1	1
Mano de obra	1–3	3	3	1–2	1–2	3	5	5
Tiempo típico de entrega[2]	Días	Semanas	Semanas	Días	Semanas	Semanas	Semanas-meses	Meses
Capacidad típica de producción[2] (partes/molde-hora)	1–20	5–50	1–20	1–10	1–1000	5–50	2–200	1–1000
Cantidad mínima[2]	1	100	500	10	10	1000	10,000	10–10,000

Notas: 1. Clasificación relativa, de 1 (mejor) a 5 (peor). Por ejemplo, la fundición a presión en matriz tiene una porosidad relativamente baja, complejidad de la forma de media a baja, alta precisión dimensional, altos costos de equipo y matrices y bajos costos de mano de obra. Estas clasificaciones sólo son generales; pueden ocurrir variaciones significativas, dependiendo de los métodos de manufactura empleados.

2. Valores aproximados sin el uso de tecnologías de elaboración rápida de prototipos.

Fuente: Datos tomados de J. A. Schey, *Introduction to Manufacturing Processes*, 3a. ed., McGraw-Hill, 2000.

11.2.1 Fundición en arena

El método tradicional de fundición de metales es el de moldes de arena; se ha utilizado por milenios y todavía es la forma prevaleciente de fundición; sólo en Estados Unidos, cada año se funden unos 15 millones de toneladas de metal por este método. Sus aplicaciones características incluyen bases para máquinas, grandes impulsores de turbinas, propulsores, accesorios de plomería y numerosos componentes para equipo agrícola y de ferrocarriles. En la tabla 11.2 se presentan las capacidades de la fundición en arena.

Básicamente, la *fundición en arena* consiste en: *(a)* colocar un modelo (que tiene la forma de la fundición deseada) en arena para hacer una impresión, *(b)* incorporar un sistema de alimentación, *(c)* retirar el modelo y llenar la cavidad del molde con metal fundido, *(d)* permitir que el metal se enfríe y solidifique, *(e)* separar el molde de arena, y *(f)* retirar la fundición (fig. 11.2).

Arenas. En la mayoría de las operaciones de fundición en arena se utiliza arena sílice (SiO_2) como material para el molde, porque es barata y resulta adecuada debido a sus características de alta temperatura y elevado punto de fusión. Existen dos tipos generales de arena: **aglutinada naturalmente** (*banco de arena*) y **sintética** (*arena de lago*). La mayoría de los talleres de fundición prefiere esta última porque puede controlar su composición con mayor facilidad. Para una fundición apropiada, la arena debe estar limpia y de preferencia ser nueva.

La selección de arena para moldes implica considerar varios factores y ciertas concesiones respecto de las propiedades. La arena que tiene granos finos y redondos se puede apisonar de modo más compacto y, en consecuencia, formar un molde con superficie más lisa. Aunque la arena de grano fino refuerza la resistencia del molde, estos granos también reducen su *permeabilidad* (penetración a través de los poros). Una buena permeabilidad de los moldes y de los machos o corazones permite que los gases y el vapor generado durante la fundición escapen fácilmente. El molde también debe tener una *colapsabilidad* adecuada para permitir que la fundición se contraiga al enfriarse, evitando así defectos como el desgarramiento y agrietamiento en caliente (ver fig. 10.12).

Tipos de moldes de arena. Los moldes de arena (fig. 11.3) se caracterizan por los tipos de arena que los componen y por los métodos utilizados para producirlos. Existen

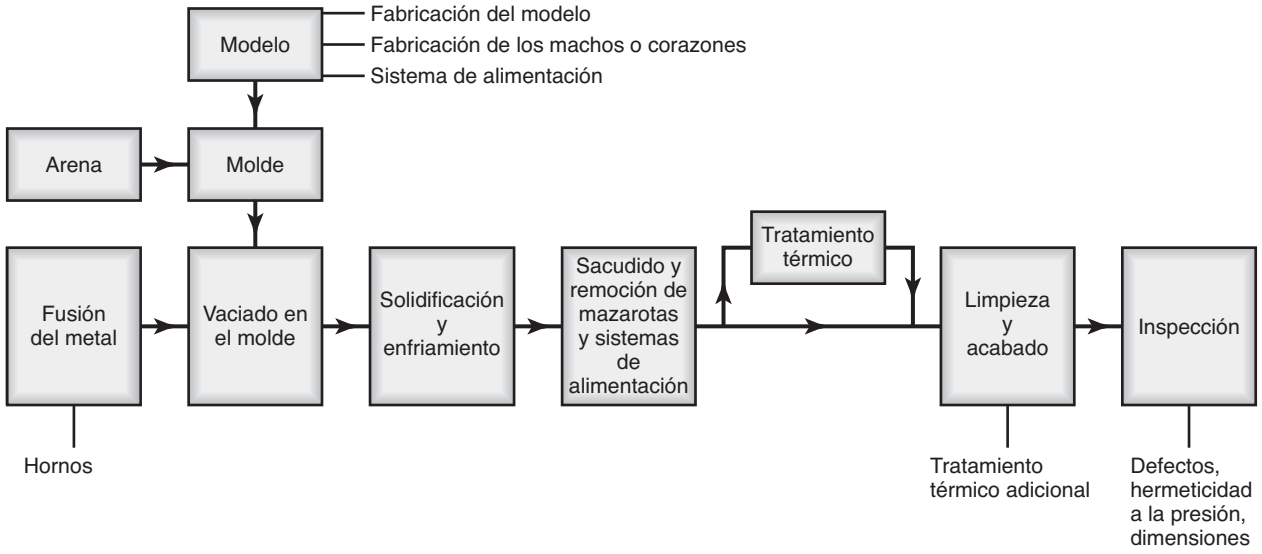


FIGURA 11.2 Descripción de los pasos de producción en una operación característica de fundición en arena.

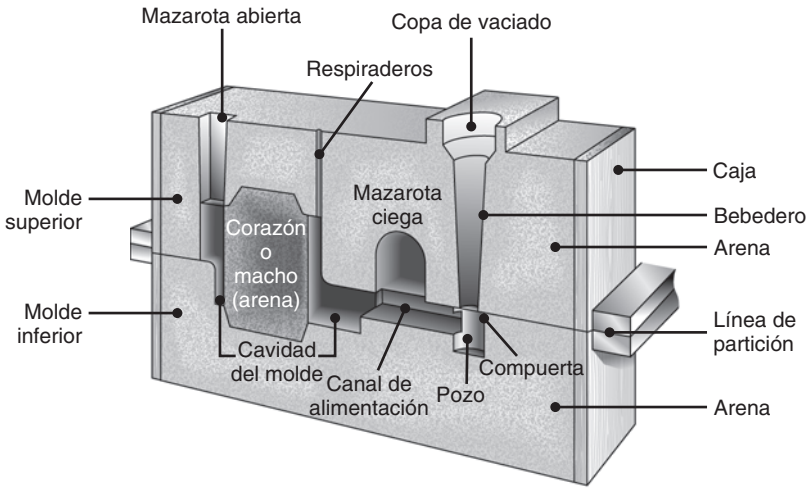


FIGURA 11.3 Esquema de un molde de arena mostrando diferentes características.

tres tipos básicos de moldes de arena: de arena verde, de caja fría y sin cocción. El material más común es la **arena verde para moldeo**, que es una mezcla de arena, arcilla y agua. El término "verde" indica que la arena dentro del molde está húmeda o mojada mientras se vacía el metal en su interior. Éste es el método menos costoso para fabricar moldes y la arena se recicla fácilmente para su uso posterior. En el método de **superficie seca**, la superficie del molde se seca, ya sea guardando el molde en aire o secándolo con sopletes. Debido a su mayor resistencia, estos moldes se utilizan en general para fundiciones grandes.

En el proceso de **molde de caja fría** se mezclan diversos *aglutinantes* orgánicos e inorgánicos con la arena, para unir químicamente los granos y obtener una mayor resistencia. Estos moldes tienen dimensiones más precisas que los de arena verde, pero son más costosos. En el proceso de **molde no cocido** se agrega una resina sintética líquida a la arena y la mezcla se endurece a temperatura ambiente. Debido a que el aglutinamiento del molde en este proceso y en el de caja fría ocurre sin calor, se les llama **procesos de curado en frío**.

Los moldes de arena se secan en hornos (horneados) antes de vaciar el metal fundido; son más resistentes que los moldes de arena verde y proporcionan mejor precisión dimensional y acabado superficial a la fundición. Sin embargo, este método tiene las siguientes desventajas: *(a)* la distorsión del molde es mayor, *(b)* las fundiciones son más susceptibles al desgarramiento en caliente debido a que el molde es menos colapsable, y *(c)* la capacidad de producción es menor porque se requiere mucho tiempo para el secado.

A continuación se describen las principales características de los moldes de arena.

1. La **caja,** que soporta el propio molde. Los moldes de dos piezas constan de un **molde superior** y uno **inferior**; la unión entre ambos es la *línea de partición*. Cuando se utilizan más de dos piezas en un molde de arena, a las partes adicionales se les llama *centros*.
2. Una **copa de vaciado** o **basín,** en la cual se vierte el metal fundido.
3. Un **bebedero**, a través del cual el metal fundido fluye hacia abajo.
4. Un **sistema de canales de alimentación**, que llevan el metal fundido desde el bebedero hasta la cavidad del molde. Las **compuertas** son las entradas a dicha cavidad.

5. Las **mazarotas**, que suministran metal fundido adicional a la fundición conforme ésta se contrae durante la solidificación. En la figura 11.3 se muestran dos tipos de mazarotas, una *ciega* y una *abierta*.
6. Los **machos** o **corazones**, que son insertos hechos de arena. Se colocan en el molde para formar regiones huecas o para definir la superficie interior de la fundición. También se utilizan en la parte exterior de la misma a fin de formar características como letras sobre la superficie o cavidades externas profundas.
7. **Respiraderos**, o vientos, que se colocan en los moldes para extraer los gases producidos cuando el metal fundido entra en contacto con la arena en el molde y en el macho. También dejan escapar el aire de la cavidad del molde conforme el metal fundido fluye en su interior.

Modelos. Los *modelos* se utilizan para moldear la mezcla de arena y dar forma a la fundición; pueden estar hechos de madera, plástico o metal. La selección de un material para el modelo depende del tamaño y la forma de la fundición, la precisión dimensional, la cantidad de fundiciones requeridas y el proceso de moldeo. Debido a que los modelos se reutilizan para elaborar moldes, la resistencia y durabilidad del material elegido debe reflejar el número de fundiciones que dichos modelos producirán. Éstos pueden fabricarse de una combinación de materiales para reducir el desgaste en regiones críticas, y por lo general se recubren con un **agente de separación** para que la fundición se extraiga más fácilmente de los moldes.

Los modelos se pueden diseñar con distintas características para que se adapten a aplicaciones específicas y a los requerimientos económicos. Los **modelos de una sola pieza**, también llamados *modelos sueltos*, o *sólidos*, se utilizan por lo común para formas más simples y para producir cantidades bajas; suelen fabricarse con madera y son económicos. Los **modelos divididos** son de dos piezas y se elaboran de modo que cada parte forme una porción de la cavidad para la fundición; de esta manera se pueden producir fundiciones con formas complicadas. Los **modelos de placa bipartidos** son un tipo común de modelo montado en el que se construyen modelos de dos piezas, asegurando cada mitad de uno o más modelos divididos a los lados opuestos de una placa sencilla (fig. 11.4). En este tipo de construcciones, el sistema de alimentación se puede montar en el lado del molde superior. Estos modelos se utilizan a menudo junto con máquinas de moldeo y grandes lotes de producción de fundiciones más pequeñas.

Un importante desarrollo en la elaboración de moldes y modelos es la aplicación de la **producción rápida de prototipos** (capítulo 20). Por ejemplo, en la fundición en arena se puede fabricar un modelo en una máquina de este tipo y sujetarlo a una placa soporte en una fracción del tiempo y del costo de maquinar un modelo. Existen varias técnicas de producción rápida de prototipos con las que estas herramientas se pueden producir rápidamente.

El diseño del modelo es un aspecto crítico de toda la operación de fundición, pues debe considerar la **contracción del metal**, la facilidad de extracción del molde de arena mediante una ligera inclinación o ángulo de salida favorable de las superficies paralelas a la dirección de extracción (fig. 11.5) y el flujo apropiado del metal dentro de la cavidad del molde. Estos temas se describen con mayor detalle en el capítulo 12.

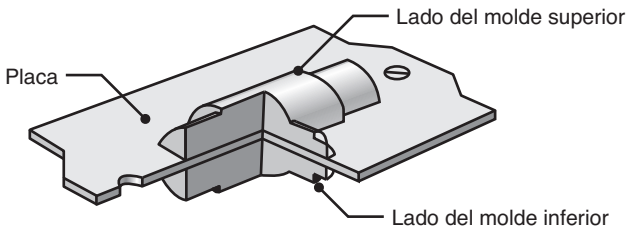


FIGURA 11.4 Modelo característico de placa bipartida metálica, utilizado en la fundición en arena.

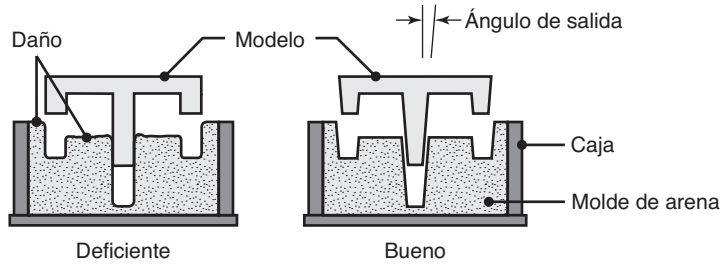


FIGURA 11.5 Ángulos de salida en modelos para facilitar la extracción del molde de arena.

Machos o corazones. Los *machos* o *corazones* se utilizan en las fundiciones con cavidades o pasajes internos, como los que se encuentran en un monobloque de motor automovilístico o en el cuerpo de una válvula. Se colocan en la cavidad del molde para formar superficies interiores de la fundición, y se retiran de la parte terminada durante el sacudido y procesamiento posteriores. Al igual que los moldes, los machos o corazones deben poseer resistencia, permeabilidad, capacidad para soportar el calor y colapsabilidad; de ahí que se produzcan con agregados de arena. El macho se ancla en **plantillas de corazones**, que son recesos agregados al modelo para soportar el macho y proporcionar un respiradero para el escape de los gases (fig. 11.6). Un problema común con los machos es que (para algunos requerimientos de fundición, como en el caso de que se requiera un receso) pueden carecer de soporte estructural suficiente en la cavidad. Es posible evitar que se muevan utilizando soportes metálicos (**soportes de corazones**) para fijarlos en su lugar (fig. 11.6b).

Por lo general, los corazones se fabrican como los moldes; la mayoría se elabora mediante procesos de cáscara (ver sección 11.2.2), sin cocción, o de caja fría. A los corazones se les da forma en las *cajas de corazones*, que se utilizan de manera muy similar a como se usan los modelos para formar moldes de arena.

Máquinas para moldeo de arena. El método para moldear más antiguo, que aún se utiliza en fundiciones sencillas, consiste en compactar la arena mediante martillado manual (*apisonado*), o compactándola alrededor del modelo. Sin embargo, en la mayoría de las operaciones, la mezcla de arena se apisona alrededor del modelo mediante *máquinas de moldeo*. Éstas eliminan una laboriosa mano de obra, ofrecen una fundición de alta calidad al mejorar la aplicación y distribución de las fuerzas, manipulan el molde de manera controlada y cuidadosa e incrementan la capacidad de producción.

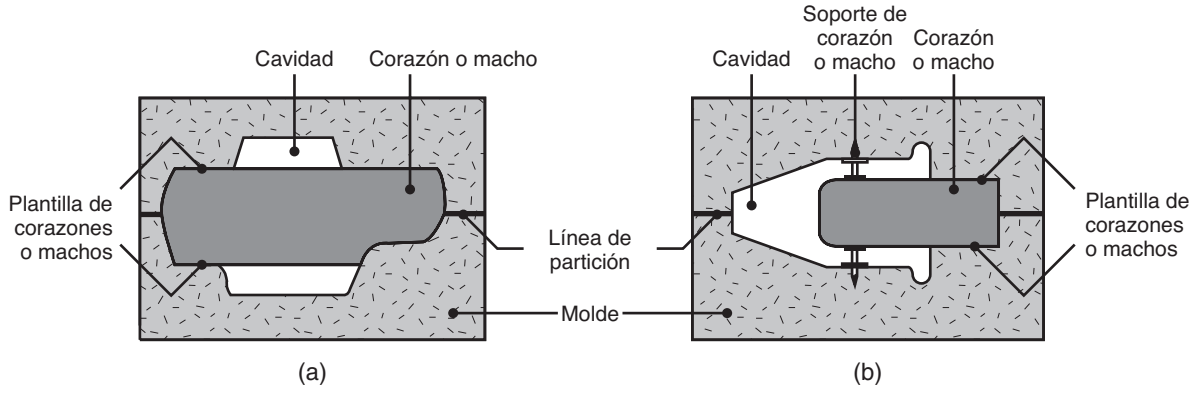


FIGURA 11.6 Ejemplos de corazones o machos de arena que muestran las plantillas y soportes para sostenerlos.

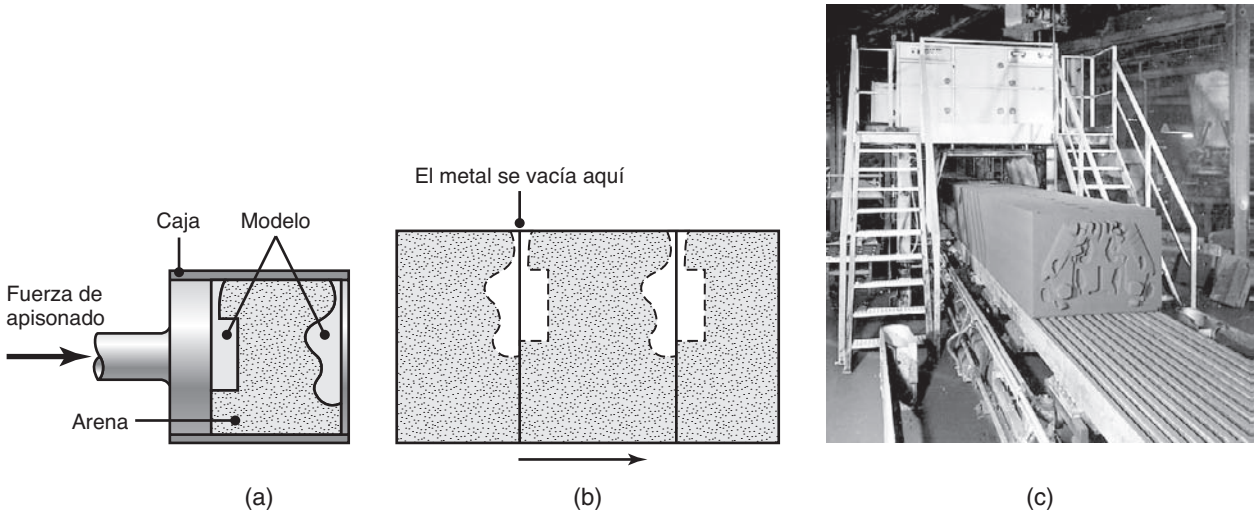


FIGURA 11.7 Moldeo vertical sin caja. *(a)* La arena se comprime entre las dos mitades del modelo. *(b)* Los moldes ensamblados pasan a lo largo de una línea de ensamble para vaciado. *(c)* Fotografía de una línea de moldeo vertical sin caja. *Fuente:* Cortesía de American Foundry Society.

En el **moldeo vertical sin caja**, las mitades del modelo forman una pared vertical contra la que se lanza y compacta la arena (fig. 11.7). Después, las mitades del molde se apilan de modo horizontal con la línea de partición orientada verticalmente, y se conducen a lo largo de un transportador de vaciado. Esta operación es sencilla, elimina la necesidad de manipular cajas y permite capacidades de producción muy altas, en particular cuando se automatizan otros aspectos de la operación (como la fabricación de corazones y el vaciado).

Los **lanzadores de arena** llenan de modo uniforme la caja con arena mediante una corriente de alta presión; se utilizan para llenar cajas grandes y por lo común los acciona una máquina. Un impulsor dentro de ésta lanza arena desde sus aspas (o copas) a velocidades tan elevadas que no sólo coloca la arena, sino que también la apisona apropiadamente.

En el **moldeo por impacto**, la arena se compacta mediante una explosión controlada o mediante la liberación instantánea de gases comprimidos. Este método produce moldes de una resistencia uniforme y buena permeabilidad.

En el **moldeo de vacío** (también conocido como *proceso V*), el modelo se cubre con una delgada lámina de plástico. La caja se coloca sobre dicho modelo y se llena con arena seca sin aglutinante. Después se pone una segunda lámina de plástico sobre la parte superior de la arena y una acción de vacío compacta la arena, de modo que puede retirarse el modelo. Las dos mitades del molde se producen de esta manera y se ensamblan. Durante el vaciado, el molde se mantiene al vacío, pero no la cavidad de la fundición. Cuando se solidifica el metal, el vacío se desactiva y la arena cae, liberando la fundición. El moldeo de vacío produce fundiciones con detalles superficiales y precisión dimensional de alta calidad; es adecuado en particular para fundiciones grandes y relativamente lisas (planas).

Operación de fundición en arena. Después de darse forma al molde y de colocarse los machos en su posición, las dos mitades (moldes superior e inferior) se cierran y se sujetan; se les agrega peso para evitar la separación de las secciones por la presión que ejerce el metal fundido cuando se vacía en la cavidad del molde. En la figura 11.8 se muestra una secuencia completa de operaciones de fundición en arena.

Después de solidificarse, la fundición se sacude para sacarla del molde y se retiran de ella la arena y las capas de óxido por vibración (utilizando un agitador) o con chorros de arena. Las fundiciones también se limpian mediante un chorro de granalla de acero o

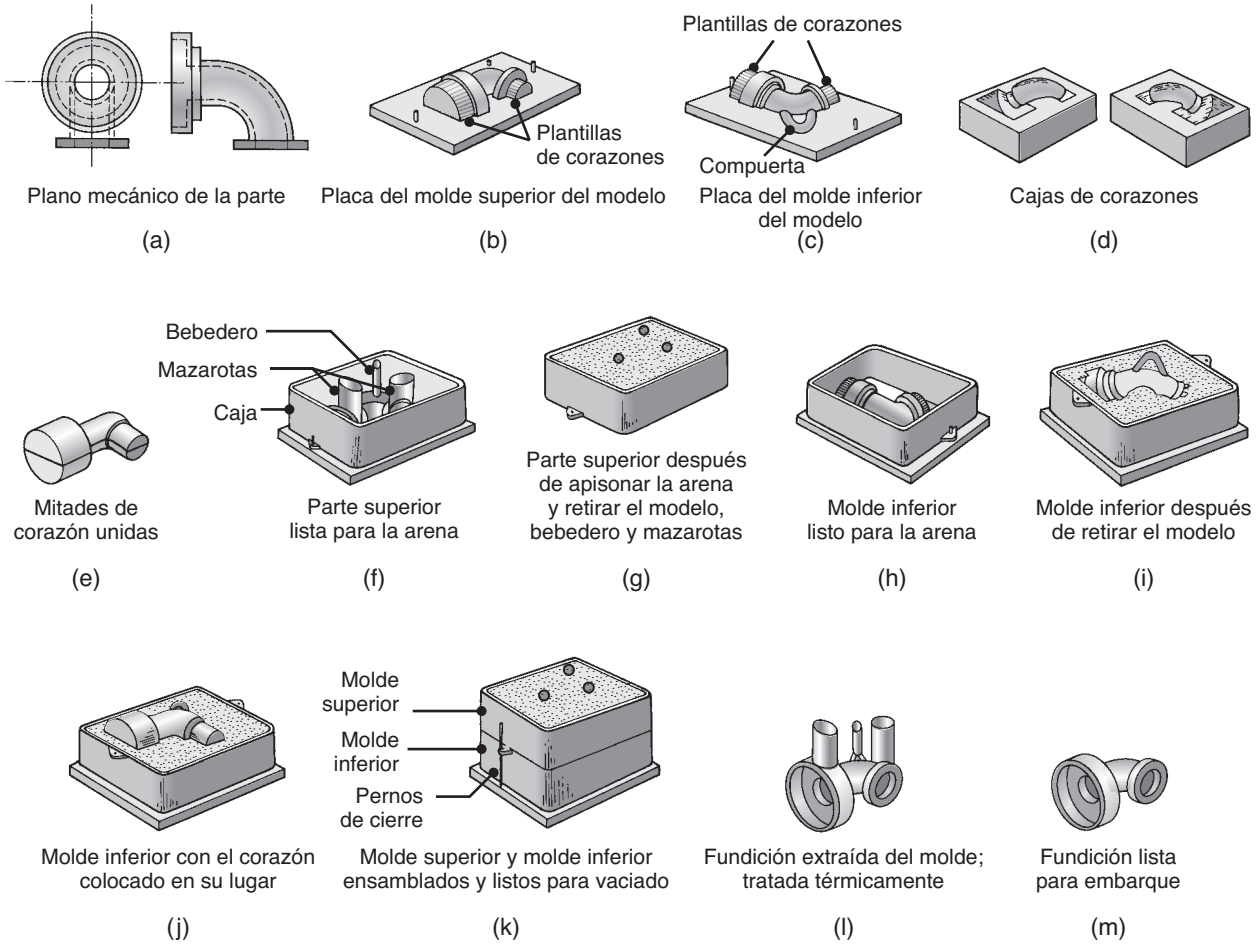


FIGURA 11.8 Esquema de la secuencia de operaciones para fundición en arena: *(a)* el plano mecánico de la parte se utiliza para generar un diseño para el modelo. En el plano deben considerarse factores como la contracción de la parte y el cono para extracción. *(b-c)* Los modelos se montan en placas equipadas con pernos para alineación. Obsérvese la presencia de plantillas para machos o corazones diseñados con el propósito de mantener los corazones en su lugar. *(d-e)* En las cajas de corazones se producen las mitades de éstos, que después se unen. Los corazones se utilizan para producir el área hueca de la parte mostrada en *(a)*. *(f)* La mitad superior del molde se ensambla asegurando la placa superior del modelo a la caja mediante pernos de alineación y sujetando insertos a fin de formar el bebedero y las mazarotas. *(g)* La caja se apisona con arena y se retiran la placa y los insertos. *(h)* La parte inferior se produce de manera similar con el modelo insertado. Se coloca un tablero debajo del molde inferior y se alinea con pernos. *(i)* Se invierten el modelo, caja y tablero inferior y se retira el modelo, dejando la impresión apropiada. *(j)* Se coloca el corazón en su lugar dentro de la cavidad del molde inferior. *(k)* Se cierra el molde colocando la parte superior sobre la inferior y asegurando el ensamble con pernos. Después se somete la caja a presión para contrarrestar las fuerzas de flotación del líquido, que pueden levantar el molde superior. *(l)* Una vez que se solidifica el metal, se retira la fundición del molde. *(m)* Se cortan y reciclan el bebedero y las mazarotas, y la fundición se limpia e inspecciona y (de ser necesario) se le da tratamiento térmico. *Fuente:* Cortesía de Steel Founders' Society of America.

arena (*chorro de granalla*; sección 26.8). Las mazarotas y los sistemas de alimentación se cortan mediante oxígeno y gas combustible, por ejemplo oxiacetileno, aserrado, cizallado y ruedas abrasivas; o se recortan con matrices. Los sistemas de alimentación y las mazarotas de las fundiciones de acero también pueden retirarse con arcos de carbón-aire (sección 30.8) o con sopletes. Las fundiciones se limpian además por medios electroquímicos o mediante decapado con productos químicos para retirar óxidos superficiales.

La fundición puede recibir después *tratamiento térmico* a fin de mejorar ciertas propiedades que su uso requiere; estos procesos son importantes, particularmente para las fundiciones de acero. Las *operaciones de acabado* pueden comprender maquinado,

enderezado o forjado con matrices (dimensionado) para obtener las dimensiones finales. La *inspección* es un paso final básico que se realiza para asegurar que la fundición satisface todos los requisitos de diseño y control de calidad.

Moldeo con grafito compactado. En este proceso, el grafito compactado (sección 8.6) se utiliza en la fabricación de moldes para fundir metales reactivos, como titanio y zirconio. No se puede utilizar la arena porque estos metales reaccionan vigorosamente con la sílice. Los moldes se empacan como los de arena, se secan con aire, se hornean a 175 °C (350 °F), se calientan a 870 °C (1600 °F) y después se almacenan en humedad y temperatura controladas. Los procedimientos de fundición son similares a los de los moldes de arena.

11.2.2 Moldeo en cáscara

El *moldeo en cáscara* se desarrolló por primera vez en la década de 1940 y ha crecido de manera significativa porque puede producir muchos tipos de fundiciones, con tolerancias dimensionales cerradas y un buen acabado superficial, a bajo costo. Se aplica en pequeñas partes mecánicas que requieren alta precisión, como las cajas para engranes, cabezas de cilindros y bielas. El proceso también se utiliza ampliamente para producir corazones o machos de moldeo de alta precisión. En la tabla 11.2 se presentan las capacidades del moldeo en cáscara.

En este proceso, un modelo montado, fabricado con un metal ferroso o aluminio, *(a)* se calienta a entre 175 °C y 370 °C (350 °F a 700 °F), *(b)* se recubre con un agente de separación (como la silicona) y *(c)* se sujeta a una caja o cámara. Ésta contiene arena fina mezclada con entre 2.5% y 4% de un aglutinante de resina termofija (como el fenol-formaldehído), que recubre las partículas de arena. Luego la caja se voltea (fig. 11.9) o la mezcla de arena se sopla sobre el modelo para cubrirlo.

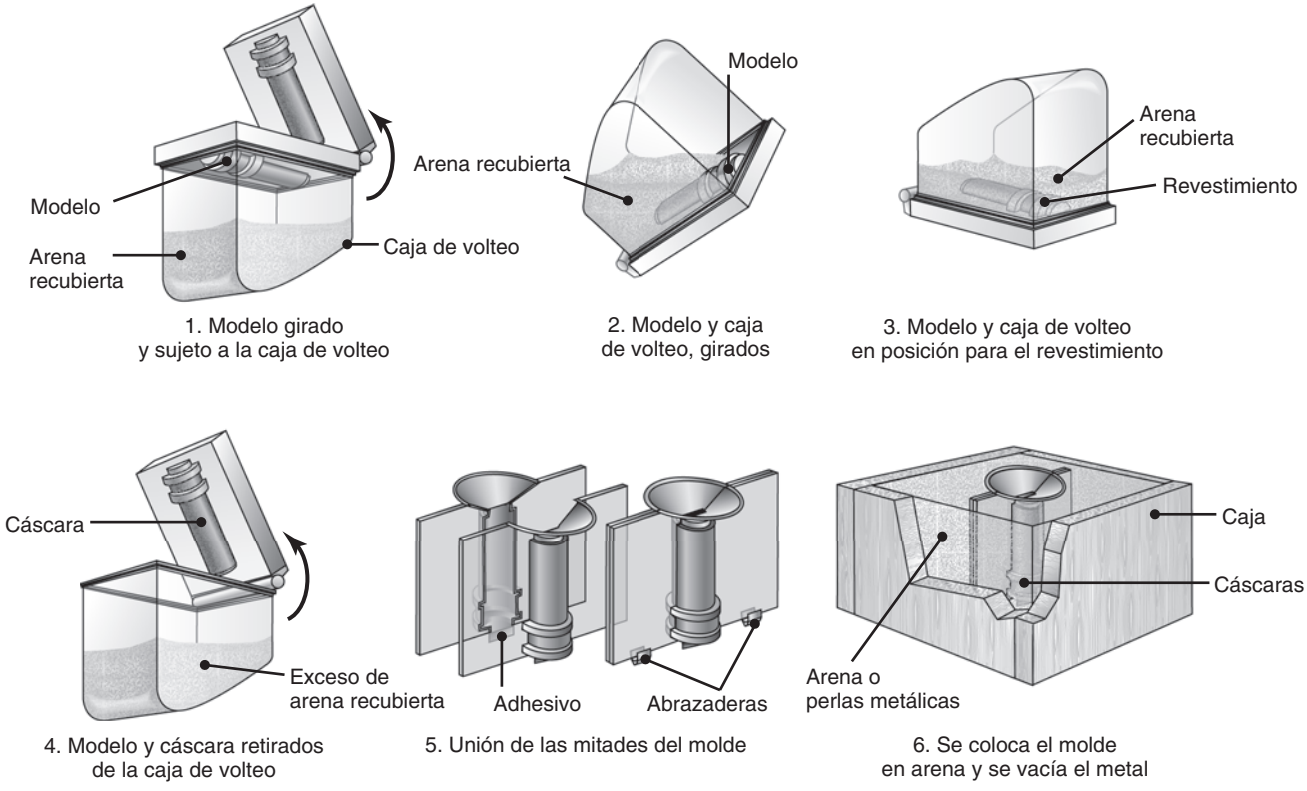


FIGURA 11.9 Proceso de moldeo en cáscara, también llamada técnica de la *caja de volteo*.

Después se coloca el ensamble en un horno por un periodo corto para que se complete el curado de la resina. En la mayoría de las máquinas de moldeo en cáscara, el horno consiste en una caja metálica con quemadores de gas que giran sobre el molde en cáscara para curarlo. La cáscara se endurece alrededor del modelo y se retira utilizando pernos integrados en él. De esta manera se producen dos medias cáscaras que se unen o sujetan para formar un molde.

Se puede determinar con precisión el espesor de la cáscara controlando el tiempo que el modelo está en contacto con el molde. De esta manera, será posible formarla con la resistencia y rigidez requeridas para soportar el peso del líquido fundido. Las cáscaras son ligeras y delgadas (por lo general de 5 mm a 10 mm, 0.2 a 0.4 pulgadas) y, en consecuencia, sus características térmicas se diferencian de las de los moldes más gruesos.

La arena en cáscara tiene menos permeabilidad que la utilizada para el moldeo en arena verde, ya que su tamaño de grano es mucho menor. Asimismo, la descomposición del aglutinante de la arena produce un gran volumen de gas, por lo cual, a menos que los moldes se ventilen apropiadamente, el aire y los gases atrapados causarían serios problemas en el moldeo en cáscara de las fundiciones ferrosas. La alta calidad de la fundición terminada puede reducir de modo significativo los costos de limpieza, maquinado y acabado. Las formas complejas se pueden producir con menos mano de obra y el proceso puede automatizarse con gran facilidad.

11.2.3 Fundición en molde de yeso

A este proceso, y a los procesos de molde de cerámica y de fundición de revestimiento descritos en las secciones 11.2.4 y 11.2.6, se les conoce como **fundición de precisión,** debido a la gran exactitud dimensional y el buen acabado superficial obtenido. Las partes características fabricadas por este medio son los componentes de cerraduras, engranes, válvulas, accesorios, herramental y ornamentos. En general las fundiciones pesan menos de 10 kg (22 libras) y se encuentran en el intervalo de 125 g a 250 g (1/4 a 1/2 libra), aunque pueden producirse piezas tan ligeras como 1 g (0.035 onza). En la tabla 11.2 se presentan las capacidades de la fundición en molde de yeso.

En el *proceso de moldeo en yeso*, el molde se fabrica con blanco de París (yeso o sulfato de calcio), talco y harina de sílice a fin de mejorar la resistencia y controlar el tiempo necesario para que se endurezca el yeso. Estos componentes se mezclan con agua, y el lodo resultante se vierte sobre el modelo. Una vez que se endurece el yeso (por lo general antes de 15 minutos), se le retira y el molde se seca a una temperatura de entre 120 °C y 260 °C (250 °F a 500 °F) para eliminar la humedad. Se pueden utilizar temperaturas mayores de secado, según el tipo de yeso. Las mitades del molde se ensamblan para formar la cavidad correspondiente y se precalientan a unos 120 °C (250 °F). Después se vacía el metal fundido dentro del molde.

Debido a que los moldes de yeso tienen muy baja permeabilidad, los gases generados al solidificarse el metal no pueden escapar; en consecuencia, el metal fundido se vierte en vacío o a presión. La permeabilidad del molde se puede incrementar sustancialmente por medio del *proceso Antioch*, en el que los moldes se deshidratan en una *autoclave* (horno presurizado) de 6 a 12 horas y después se rehidratan en aire por 14 horas. Otro método para aumentar la permeabilidad consiste en utilizar yeso espumado, que contiene burbujas de aire atrapadas.

Por lo general, los modelos para el moldeo en yeso están hechos de materiales como las aleaciones de aluminio o de zinc, los plásticos termofijos y el bronce. Los modelos de madera no son adecuados para producir un gran número de moldes, ya que se encuentran en contacto constante con el lodo de yeso a base de agua. En virtud de que la temperatura máxima que puede soportar el molde es, por lo general, de unos 1200 °C (2200 °F), la fundición en molde de yeso sólo se utiliza para el aluminio, magnesio, zinc y algunas aleaciones a base de cobre. Las fundiciones tienen un buen acabado superficial con detalles finos. Debido a que los moldes de yeso poseen una conductividad térmica menor que la de los otros, las fundiciones se enfrían lentamente y, por ende, se obtiene

una estructura más uniforme de granos, con menos alabeo. El espesor de pared de las partes fundidas puede ser de 1 mm a 2.5 mm (0.04 a 0.1 pulgadas).

11.2.4 Fundición en molde cerámico

El *proceso de fundición en molde cerámico* (también llamado *fundición de revestimiento de molde superior e inferior*) es similar al proceso de molde de yeso, excepto porque utiliza materiales refractarios para el molde que se adecuan a las aplicaciones de alta temperatura. Las partes que más se producen son los propulsores, cortadores para operaciones de maquinado, matrices para trabajar los metales y moldes para fabricar componentes de plástico y hule. Mediante este proceso se han fundido partes hasta de 700 kg (1500 libras).

El lodo es una mezcla de zirconio de grano fino ($ZrSiO_4$), óxido de aluminio y sílice fundida, que se agrega a los agentes aglutinantes y se vierte sobre el modelo (fig. 11.10) que se ha colocado en una caja de moldeo.

El modelo puede estar hecho de madera o metal. Después del endurecimiento, los moldes (caras de cerámica) se retiran, se secan, se queman para eliminar la materia volátil y se hornean; se sujetan con firmeza y se utilizan como moldes totalmente de cerámica. En el *proceso Shaw*, las caras de cerámica se refuerzan con arcilla refractaria (que tolera altas temperaturas) para dar resistencia al molde. Posteriormente las caras se ensamblan como molde completo, listas para el vaciado.

La resistencia a la temperatura elevada por parte de los materiales refractarios para moldeo permite utilizar estos moldes para fundir metales ferrosos y otras aleaciones de alta temperatura, aceros inoxidables y aceros para herramentales. Aunque el proceso es costoso, las fundiciones tienen buena precisión dimensional y gran acabado superficial en una amplia gama de tamaños y formas.

11.2.5 Fundición de modelo evaporativo (proceso a la espuma perdida)

A la fundición de modelo evaporativo (y a la fundición de revestimiento tratada después) también se les conoce como procesos de fundición de *modelo desechable*, o procesos *de molde-modelo desechable*. Son únicos, pues deben producirse un modelo y un molde para cada fundición, mientras que los modelos de los procesos ya descritos son reutilizables. Se aplican en cabezas para cilindros, monobloques para motores, cigüeñales, componentes para frenos, múltiples y bases para máquinas. En la tabla 11.2 se presentan las capacidades de la fundición de modelo evaporativo.

Este proceso utiliza un modelo de poliestireno que se evapora al contacto con el metal fundido, a fin de formar una cavidad para la fundición; también se le conoce como *fundición a la espuma perdida* y recibe el nombre comercial de proceso *molde lleno*. Se

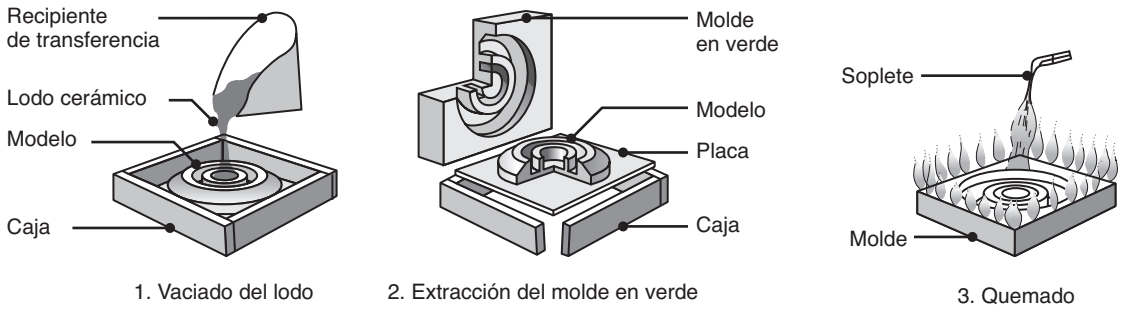


FIGURA 11.10 Secuencia de operaciones para fabricar un molde cerámico. *Fuente: Metals Handbook*, Vol. 5, 8ª. ed.

ha convertido en uno de los procesos de fundición más importantes para metales ferrosos y no ferrosos, particularmente en la industria automotriz.

En este proceso se colocan perlas de poliestireno desechable (EPS) sin tratamiento, que contienen de 5% a 8% de pentano (un hidrocarburo volátil) en una matriz precalentada que, por lo general está hecha de aluminio. El poliestireno se expande y adquiere la forma de la cavidad de la matriz. Se aplica calor adicional para fundir y unir las perlas. Después se enfría la matriz, se abre y se retira el modelo de poliestireno. También pueden producirse modelos complejos uniendo diversas secciones de modelos individuales mediante un adhesivo de fusión por calor (sección 32.4.1).

El modelo se recubre con un lodo refractario a base de agua, se seca y se coloca en una caja de moldeo. Después ésta se llena con arena fina suelta, que rodea y soporta al modelo (fig. 11.11), y se puede secar o mezclar con agentes aglutinantes para darle resistencia adicional. La arena se compacta periódicamente sin retirar el modelo de poliestireno; luego se vacía el metal fundido dentro del molde y vaporiza de inmediato el modelo. Al llenarse la cavidad, se reemplaza por completo el espacio que ocupaba antes el poliestireno. Este último es degradado (despolimerizado) por el calor y los productos de la degradación se ventilan hacia la arena circundante.

La velocidad del flujo de metal fundido dentro del molde depende del nivel de degradación del polímero. Algunos estudios han demostrado que dicho flujo es fundamentalmente laminar, con números de Reynolds que van de 400 a 3000. La velocidad del metal fundido en el frente metal-modelo de polímero (interfaz) va de 0.1 a 1.0 m/s y se puede controlar produciendo modelos con cavidades o secciones huecas. Por lo tanto, la velocidad aumenta conforme el metal fundido cruza estas regiones huecas, de manera similar al vaciado del metal dentro de una cavidad vacía.

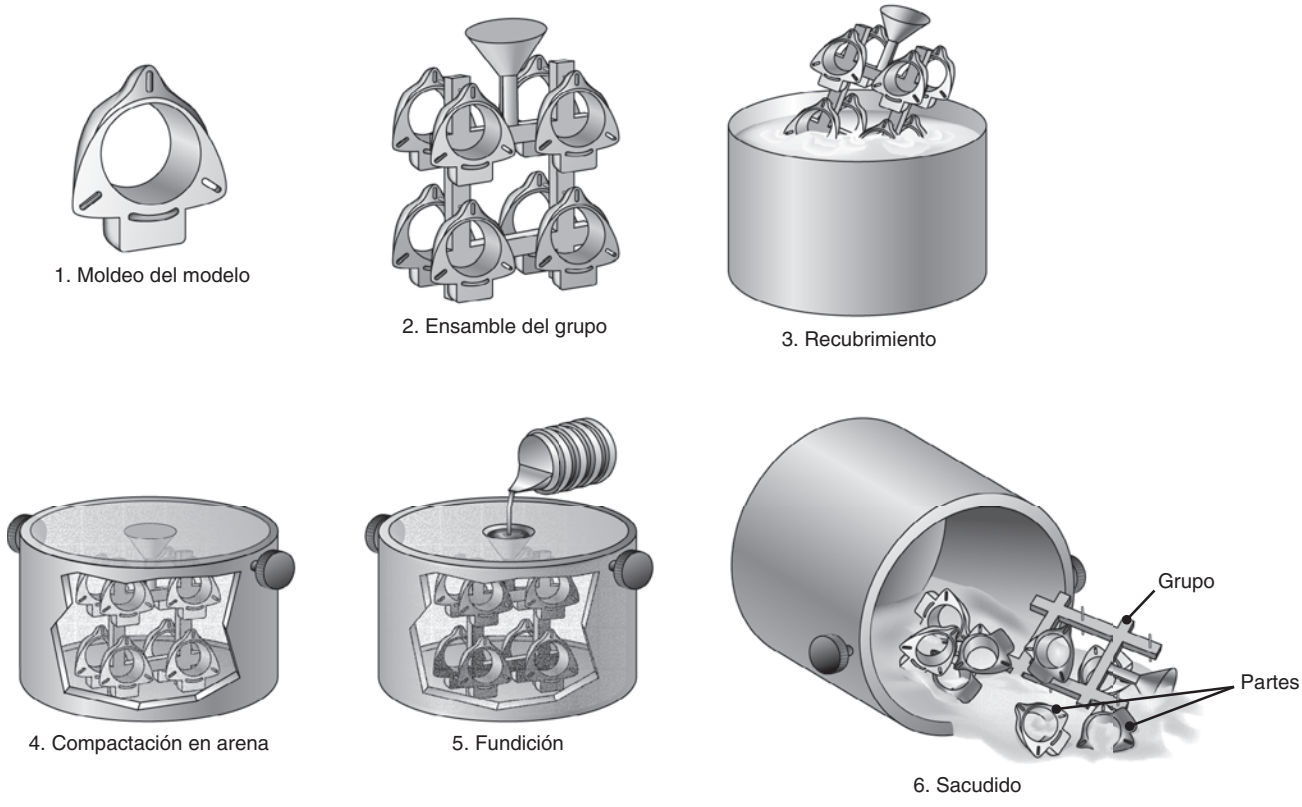


FIGURA 11.11 Esquema del proceso de fundición de modelo desechable, también conocido como fundición a la espuma perdida o fundición de modelo evaporativo.

Debido a que el polímero requiere mucha energía para degradarse, se presentan grandes gradientes térmicos en la interfaz metal-polímero. En otras palabras, el metal fundido se enfría de modo más rápido que si se vaciara directamente en una cavidad vacía y, en consecuencia, la fluidez es menor que en la fundición en arena. Esto tiene efectos importantes en la microestructura de toda la fundición y puede llevar a una solidificación direccional del metal. También pueden utilizarse el polimetilmetacrilato (PMMA) y el carbonato de polialquileno como materiales para modelos en fundiciones ferrosas.

El proceso de modelo evaporativo tiene muchas ventajas sobre otros métodos de fundición:

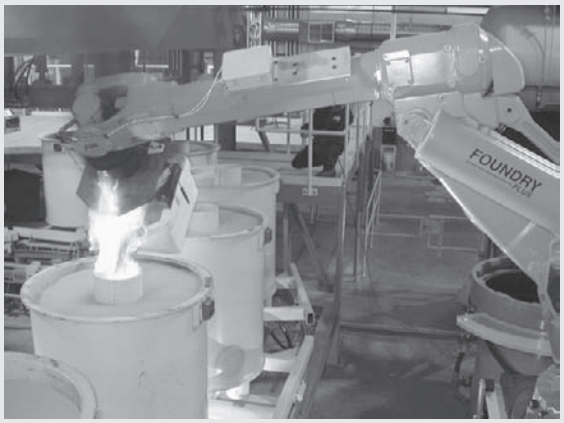
- El proceso es relativamente simple porque no existen líneas de partición, machos o corazones, o sistemas de mazarotas. De ahí que tenga flexibilidad de diseño.
- El proceso requiere cajas de moldeo económicas.
- El poliestireno es barato y se puede procesar fácilmente para producir modelos con formas complejas, tamaños diversos y detalles superficiales finos.
- La fundición requiere operaciones mínimas de acabado y limpieza.
- El proceso se puede automatizar y es económico para grandes lotes de producción. Sin embargo, hay que tomar en cuenta el costo de producción de la matriz que se utiliza al expandir las perlas de poliestireno para fabricar el modelo y la necesidad de dos juegos de herramental. De igual manera, el proceso sirve para nuevos diseños de fundición y no para los diseños existentes.

En una modificación del proceso de modelo evaporativo, llamada *proceso Replicast C-S*, una cáscara de cerámica circunda el modelo de poliestireno, que se quema antes de vaciar el metal fundido dentro del molde. Su principal ventaja sobre la fundición de revestimiento (que utiliza modelos de cera, sección 11.2.6) es que se evita por completo la inclusión de carbono en el metal. Desarrollos posteriores en la fundición de modelo evaporativo incluyen la producción de compósitos con matriz metálica (secciones 9.5 y 19.14). Durante el moldeo del modelo de polímero, se le insertan fibras o partículas que después se vuelven parte integral de la fundición. Técnicas adicionales incluyen la modificación y el refinamiento del grano de la fundición mediante refinadores de grano y aleaciones modificadoras maestras (sección 11.7) dentro del modelo cuando éste se moldea.

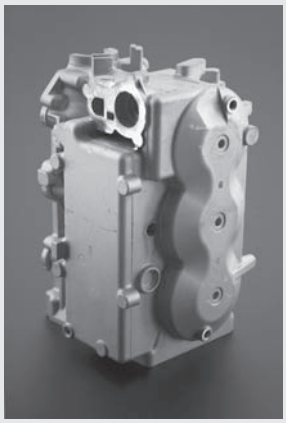
ESTUDIO DE CASO 11.1 | Fundición a la espuma perdida de monobloques para motores

Una de las partes más importantes del motor de combustión interna es el monobloque, el cual forma la envolvente del motor, aporta la estructura básica que encierra pistones y cilindros y resiste una presión significativa durante la operación.

Al advertir las presiones de la industria en favor de diseños de alta calidad, bajo costo y ligereza, Mercury Castings construyó una línea de fundición a la espuma perdida con el propósito de producir monobloques de aluminio para motores y cabezas de cilindros. Un ejemplo de una parte producida mediante fundición a la espuma perdida es un monobloque para motor de tres cilindros de 60 hp, utilizado en aplicaciones marinas y que se ilustra en la figura 11.12. Antes manufacturado como ocho fundiciones a presión por separado, el monobloque pasó así a sólo una fundición a la espuma perdida, de 22 libras, con un ahorro en peso y costo de 2 libras y 25 dólares por cada monobloque, respectivamente. Este tipo de fundición también permitió consolidar la cabeza de los cilindros del motor y los sistemas de escape y enfriamiento del monobloque, además de eliminar el maquinado asociado y los sujetadores requeridos en los diseños de fundición en arena o a presión. Asimismo, como el modelo contenía orificios que se podían fundir sin el uso de machos, se eliminaron numerosas operaciones de taladrado.



(a)



(b)

FIGURA 11.12 *(a)* El metal se vacía dentro del molde para fundir a la espuma perdida un motor marino de tres cilindros de 60 hp; *(b)* parte trasera del motor terminado. *Fuente:* Cortesía de Mercury Marine.

Mercury Marine también estaba en pleno desarrollo de un nuevo motor V6 utilizando una aleación de aluminio resistente a la corrosión y con mayor resistencia al desgaste. Este diseño de motor también requería la integración del monobloque de los cilindros y la cabeza, pues tenía secciones huecas para enfriamiento por chaqueta de agua que no se podían fabricar con corazones en la fundición a presión o mediante moldeo semipermanente (los procesos utilizados para sus otros monobloques V6). Con base en el éxito obtenido con el monobloque de tres cilindros a la espuma perdida, los ingenieros aplicaron la misma fundición a la matriz del monobloque V6. Ahora el nuevo monobloque de motor comprende una sola fundición, más ligera y económica que los diseños anteriores. Producido con una cabeza de cilindros y un sistema de escape y enfriamiento integrados, este componente se funde hueco a fin de crear un enfriamiento por chaqueta de agua más eficiente para la operación del motor.

La compañía también ha desarrollado un proceso presurizado a la espuma perdida. Se fabrica un molde de espuma, se coloca en una caja de moldeo y se cubre con arena. Después la caja se pone dentro de un recipiente a presión, donde un robot vacía aluminio fundido sobre el modelo de poliestireno. Se cierra la tapa de dicho recipiente y se aplica una presión de 150 psi a la fundición hasta que solidifica. El resultado es una fundición con mejor precisión dimensional, menor porosidad y una resistencia mejorada en comparación con la fundición convencional a la espuma perdida.

Fuente: Cortesía de Mercury Marine.

11.2.6 Fundición por revestimiento

El proceso de *fundición por revestimiento*, también llamado **proceso a la cera perdida**, se utilizó por primera vez entre los años 4000 y 3000 a.C. Las partes producidas comúnmente son componentes para equipo de oficina y componentes mecánicos, como engra-

nes, válvulas y manerales. Por medio de este proceso se han fundido exitosamente partes hasta de 1.5 m (60 pulgadas) de diámetro, con un peso hasta de 1140 kg (2500 libras). En la tabla 11.2 se presentan las capacidades de la fundición por revestimiento.

En la figura 11.13 se muestra la secuencia comprendida en la fundición por revestimiento. El modelo se fabrica con cera o con un plástico como el poliestireno, mediante moldeo o técnicas de elaboración rápida de prototipos. Después el modelo se sumerge en un lodo de material refractario, por ejemplo, arena sílice muy fina con aglutinantes, incluyendo agua, silicato de etilo y ácidos. Una vez que se ha secado este recubrimiento inicial, el modelo se recubre varias veces para aumentar su espesor y mejorar su resistencia.

El término *revestimiento* proviene del hecho de que el modelo se reviste (circunda) con material refractario. Los modelos de cera requieren un manejo cuidadoso porque no son suficientemente fuertes para resistir las fuerzas propias de la fabricación de moldes; sin embargo, a diferencia de los modelos de plástico, la cera se puede recuperar y usar de nuevo.

El molde de una pieza se seca al aire y se calienta a una temperatura de 90 °C a 175 °C (200 °F a 375 °F). Se sostiene en posición invertida por unas 12 horas para fundir y extraer la cera. Después se le aplican entre 650 °C a 1050 °C (1200 °F a 1900 °F) por casi cuatro horas (dependiendo del metal a fundir) a fin de sacar el agua de la cristalización (agua combinada químicamente) y quemar cualquier cera residual. Una vez que se ha vaciado y solidificado el metal, el molde se rompe y la fundición se retira. Se pueden unir varios modelos para hacer un molde, al que entonces se le llama **árbol** (fig. 11.13), lo que

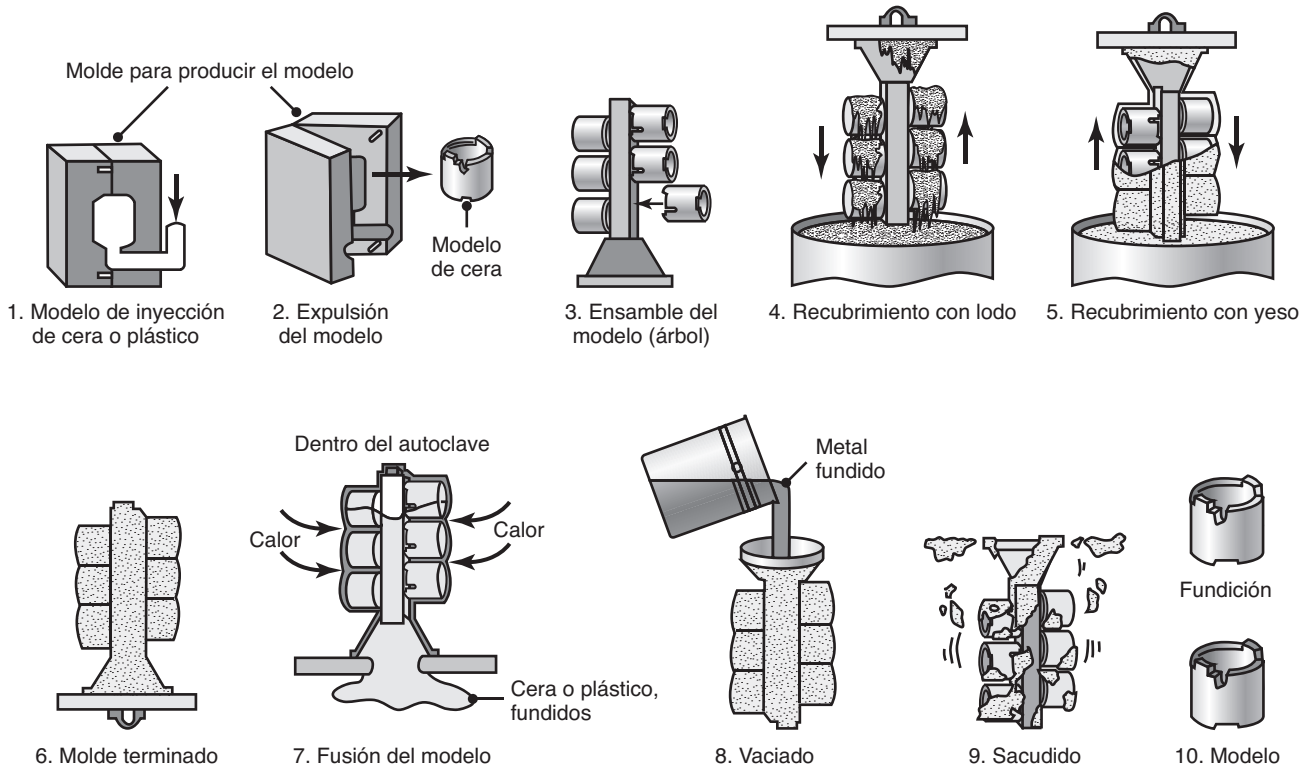


FIGURA 11.13 Esquema del proceso de fundición por revestimiento (a la cera perdida). Las fundiciones producidas por este método se pueden hacer con detalles muy finos a partir de una variedad de metales. *Fuente*: Cortesía de Steel Founder's Society of America.

incrementa de modo significativo la capacidad de producción. Para partes pequeñas, se puede insertar el árbol dentro de una caja de moldeo permeable y revestirla de lodo líquido. Después se coloca el revestimiento en una cámara y se evacua (para retirar las burbujas de aire) cuando se solidifica el molde. En general, la caja de moldeo se coloca en una máquina de fundición de vacío para que el metal fundido se introduzca en el molde permeable y sobre la parte, produciendo detalles finos.

Aunque los materiales del molde y la mano de obra involucrada hacen costoso el proceso a la cera perdida, éste es adecuado para fundir aleaciones de alto punto de fusión con buenos acabados superficiales y tolerancias dimensionales cerradas; se requieren muy pocas, o ninguna, operaciones de acabado, que de otra manera aumentarían de modo significativo el costo total de la fundición. Este proceso es capaz de producir formas intrincadas, con partes que pesan desde 1 g hasta 35 kg (0.035 onzas a 75 libras) a partir de una amplia variedad de metales y aleaciones ferrosas y no ferrosas. Los avances recientes incluyen la fundición de componentes de titanio para motores y marcos estructurales para aeronaves con paredes de 1.5 mm (0.060 pulgadas) de espesor, compitiendo así con las estructuras de láminas metálicas utilizadas antes.

Fundición por revestimiento de cáscara cerámica. Una variación del proceso de fundición por revestimiento es la *fundición de cáscara cerámica*. Utiliza el mismo tipo de modelo de cera o plástico, que primero se sumerge en gel de silicato de etilo y luego en una cama fluida (ver sección 4.12) de sílice fundida de grano fino, o harina de zirconio. Después el modelo se sumerge en sílice de grano más grueso para integrar recubrimientos adicionales y desarrollar un espesor apropiado a fin de que el modelo pueda soportar el impacto térmico debido al vaciado. El resto del procedimiento es similar al de la fundición por revestimiento. Este proceso es económico y se utiliza extensamente para la fundición de precisión de aceros y aleaciones de alta temperatura.

En la figura 11.14 se muestra la secuencia de operaciones comprendidas en la fabricación de un disco para turbina por este método. Si se utilizan corazones de cerámica en la fundición, se retiran mediante lixiviado con soluciones cáusticas a alta presión y temperatura. El metal fundido se puede vaciar en vacío para extraer los gases generados y reducir la oxidación, mejorando así la calidad de la fundición. Para disminuir aún más la microporosidad, las fundiciones producidas mediante este y otros procesos se someten a prensado isostático en caliente. Las fundiciones de aluminio, por ejemplo, se someten a una presión de gas de hasta 100 MPa (15 ksi) a 500 °C (900 °F).

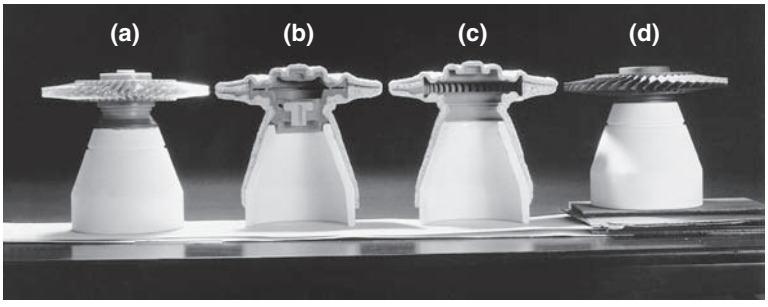


FIGURA 11.14 Fundición por revestimiento de un rotor fundido integralmente para una turbina de gas. *(a)* Ensamble del modelo de cera. *(b)* Cáscara cerámica alrededor del modelo de cera. *(c)* Se funde la cera y se llena el molde, en vacío, con una superaleación fundida. *(d)* Rotor fundido, producido con una forma neta o cercana a la neta. *Fuente:* Cortesía de Howmet Corporation.

EJEMPLO 11.1 Componentes de superaleaciones fundidas por revestimiento para turbinas de gas

Desde la década de 1960, las superaleaciones fundidas por revestimiento han reemplazado a sus contrapartes forjadas en las turbinas de gas de alto rendimiento. Gran parte del desarrollo ha tenido lugar al producir superaleaciones más limpias (base níquel y cobalto). Se han obtenido mejoras en las técnicas de fusión y fundición, como la fusión por inducción al vacío, y al utilizar controles con microprocesadores. Se han reducido continuamente los niveles de impurezas y de inclusiones, mejorando la resistencia y la ductilidad de estos componentes. Dicho control es fundamental, ya que estas partes operan a temperaturas sólo 50 °C (90 °F) debajo de la temperatura solidus de la aleación (sección 4.3).

En la mitad superior de la figura 11.15 se muestra la microestructura de un rotor para turbina de gas, fundido en su totalidad por revestimiento. Obsérvense los granos equiaxiales finos y uniformes en toda la sección transversal del rotor. Los procedimientos incluyen el uso de una adición nucleante al metal fundido, un control estricto de su sobrecalentamiento, técnicas de vaciado y el control de la velocidad de enfriamiento de la fundición. Por el contrario, nótese la estructura de grano grueso en la mitad inferior de la figura 11.15, que muestra el mismo tipo de rotor fundido convencionalmente. Éste tiene propiedades inferiores si se compara con el rotor de grano fino. Debido a los desarrollos en estos procesos, la proporción de partes fundidas con respecto a otras partes en los motores para aeronaves se ha incrementado de 20% a cerca de 45% en peso.

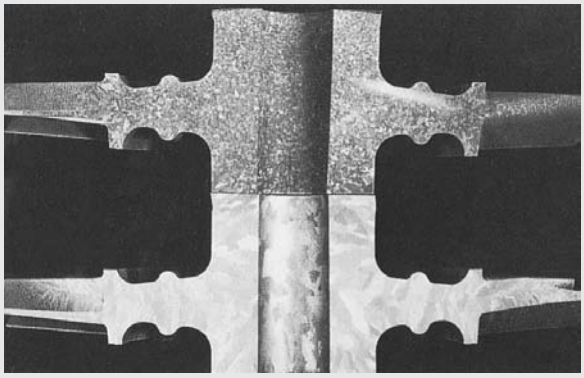


FIGURA 11.15 Sección transversal y microestructura de dos rotores: fundido por revestimiento (arriba); fundido convencionalmente (abajo). *Fuente: Advanced Materials and Processes,* octubre de 1990, página 25, ASM International.

11.3 Procesos de fundición en molde permanente

Los procesos de fundición en molde permanente tienen ciertas ventajas sobre otros procesos de fundición, como se indica a continuación.

11.3.1 Fundición en molde permanente

En la *fundición en molde permanente* (también llamada *fundición en molde duro*), se fabrican dos mitades de un molde con materiales de alta resistencia a la erosión y a la fatiga térmica, como el hierro fundido, acero, latón, grafito o aleaciones metálicas refractarias. Las partes que más se producen mediante este proceso son los pistones automovilísticos,

cabezas para cilindros, bielas, discos para engranes de electrodomésticos y artículos de cocina. Las partes que pueden producirse económicamente suelen pesar menos de 25 kg (55 libras), aunque se han producido fundiciones especiales que pesan cientos de kilogramos utilizando este proceso. En la tabla 11.2 se presentan las capacidades de la fundición en molde permanente.

La cavidad del molde y el sistema de alimentación se maquinan en el molde, por lo que se vuelven parte integral del mismo. Para producir fundiciones con cavidades internas, antes se colocan machos fabricados con metal o agregados de arena en el molde. Los materiales característicos de los machos o corazones son arena aglutinada con aceite o resina, yeso, grafito, hierro gris, acero de bajo carbono y acero para matrices de trabajo en caliente. El que se usa más es el hierro gris, sobre todo en grandes moldes para fundiciones de aluminio y magnesio. También se utilizan insertos para diversas partes del molde.

Para aumentar la vida de los moldes permanentes, las superficies de la cavidad del molde suelen recubrirse con un lodo refractario (como silicato de sodio y arcilla) o se rocían con grafito después de algunas fundiciones. Estos recubrimientos también sirven como agentes de separación y como barrera térmica, controlando así la velocidad de enfriamiento de la fundición. Es posible que se requieran expulsores mecánicos (como pernos localizados en diferentes partes del molde) para retirar fundiciones complejas; por lo general los expulsores dejan pequeñas impresiones redondas.

Los moldes se sujetan por medios mecánicos y se calientan a entre 150 °C y 200 °C (300 °F a 400 °F) para facilitar el flujo del metal y reducir el daño térmico a las matrices debido a los altos gradientes de temperatura. Luego se vacía el metal fundido a través del sistema de alimentación. Tras la solidificación, se abren los moldes y se retira la fundición. Se utilizan medios especiales para enfriar el molde, incluyendo agua o aletas similares a las empleadas en los motores de motocicleta o podadoras de pasto, que enfrían el monobloque del motor.

Aunque la operación de fundición en molde permanente se realiza manualmente, puede automatizarse en grandes lotes de producción. La mayoría de las veces este proceso se utiliza para aluminio, magnesio, aleaciones de cobre y hierro gris debido a sus puntos de fusión, que por lo general son más bajos, aunque también se pueden fundir aceros mediante moldes de grafito o de metales resistentes al calor. Este método produce fundiciones con buen acabado superficial, tolerancias dimensionales cerradas, propiedades mecánicas buenas y uniformes, y grandes capacidades de producción. Aunque los costos del equipo pueden ser elevados debido al alto precio de las matrices, los costos de mano de obra se mantienen bajos automatizando el proceso. La fundición en molde permanente no es económica para pequeños lotes de producción ni para formas intrincadas, por la dificultad de retirar la fundición del molde. Sin embargo, pueden utilizarse machos o corazones de arena que se colapsan con facilidad y que después se retiran de la fundición, dejando intrincadas cavidades internas. A este proceso se le llama entonces **fundición de molde semipermanente**.

11.3.2 Fundición de vacío

En la figura 11.16 se muestra un esquema del proceso de *fundición de vacío*, o *proceso de baja presión contra-gravedad* (CL) (no confundir con el proceso de moldeo de vacío descrito en la sección 11.2.1). La fundición de vacío es una alternativa a la fundición por revestimiento, de molde en cáscara y de arena verde, y es sobre todo adecuada para formas complejas con paredes delgadas (0.75 mm; 0.03 pulgadas) con propiedades uniformes. Las partes más producidas son componentes de superaleaciones para turbinas de gas. Estas partes, que a menudo se encuentran en forma de superaleaciones para turbinas de gas, tienen paredes tan delgadas como 0.5 mm (0.02 pulgadas).

En este proceso, una mezcla de arena fina y uretano se moldea sobre matrices metálicas y se cura con vapor de amina. Después el molde se sostiene con un brazo robot y se sumerge parcialmente en el metal fundido que se mantiene en un horno de inducción. El metal se puede fundir en aire (*proceso CLA*) o en vacío (*proceso CLV*). El vacío redu-

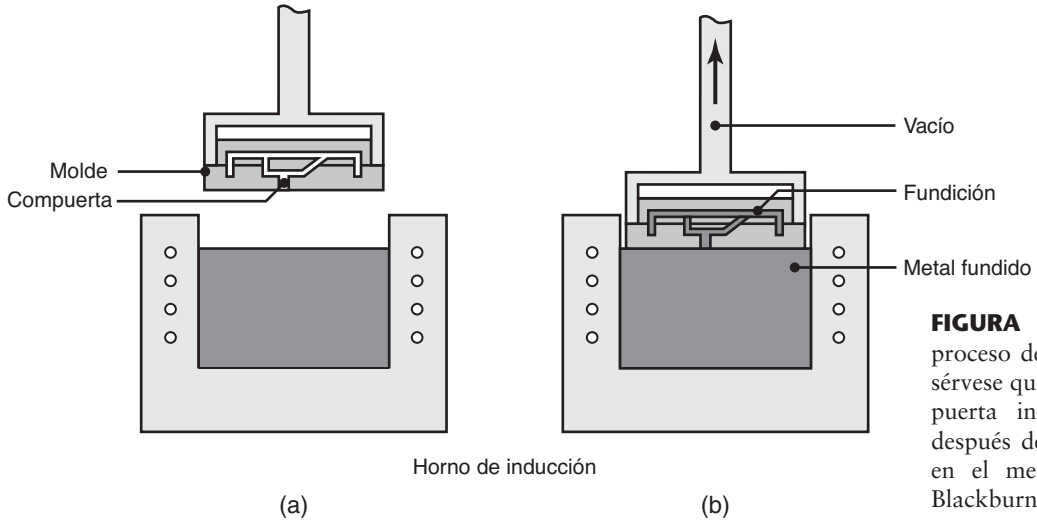


FIGURA 11.16 Esquema del proceso de fundición al vacío. Obsérvese que el molde tiene una compuerta inferior. *(a)* Antes y *(b)* después de la inmersión del molde en el metal fundido. *Fuente:* R. Blackburn.

ce la presión del aire dentro del molde a casi dos tercios de la presión atmosférica, introduciendo así el metal fundido dentro de las cavidades del molde a través de una compuerta en el fondo del molde. Por lo general, el metal en el horno se encuentra a una temperatura de 55 °C (100 °F) por encima de la temperatura liquidus de la aleación. En consecuencia, comienza a solidificarse en muy poco tiempo; una vez que se llena el molde, se retira del metal fundido.

El proceso puede automatizarse y los costos de producción ser similares a los de la fundición en arena verde. Por medio de este método se han fundido al vacío partes de acero inoxidable, al carbono y de alta y baja aleación que pesan hasta 70 kg (155 libras). Las partes CLA se producen con facilidad en volúmenes elevados y a un costo relativamente bajo. Por lo general, las partes CLV comprenden metales reactivos, como el aluminio, titanio, zirconio y hafnio.

11.3.3 Fundición hueca

Se había observado en la figura 10.11 que en una fundición primero se desarrollaba una capa superficial solidificada, la cual se volvía más gruesa con el tiempo. Utilizando este principio, se pueden hacer fundiciones huecas de paredes delgadas mediante la fundición de molde permanente: un proceso denominado *fundición hueca*, que es adecuado para pequeños lotes de producción y que se utiliza en la fabricación de objetos ornamentales y decorativos (como bases y vástagos para lámparas) y en juguetes con metales de bajo punto de fusión, como zinc, estaño y aleaciones de plomo. El metal fundido se vacía en el molde metálico. Una vez que se obtiene el espesor deseado de la capa superficial solidificada, se invierte (o se gira) el molde y se vacía el metal líquido restante. Después se abren las dos mitades del molde y se retira la fundición. Obsérvese que esta operación es muy similar a la fabricación de formas huecas de chocolate, huevos y otras confiterías.

11.3.4 Fundición a presión

En los dos procesos de molde permanente ya descritos, el metal fundido fluye hacia la cavidad del molde por gravedad. En la *fundición a presión* (también llamada *fundición de baja presión* o de *vaciado a presión*), el metal fundido se fuerza hacia arriba mediante presión de gas, dentro de un molde de grafito o metálico. La presión se mantiene hasta que el metal se solidifica por completo en el molde. El metal fundido también se puede forzar hacia arriba por medio de un vacío, que retira los gases disueltos y produce una fundición

con menor porosidad. La fundición a presión suele utilizarse en fundiciones de alta calidad, como las ruedas de acero para carros de ferrocarril, aunque éstas también se pueden fundir en moldes de arena o en moldes semipermanentes hechos de grafito y arena.

11.3.5 Fundición a presión en matriz [N. del RT.]

N. del RT. Este proceso se conoce comúnmente como inyección de metales.

El proceso de *fundición a presión en matriz*, desarrollado a principios de 1900, es un ejemplo más de la fundición en molde permanente. Las partes que por lo común se producen mediante la fundición a presión en matriz son cajas y monobloques para motores, componentes para máquinas de oficina y artículos electrodomésticos, herramientas manuales y juguetes. El peso de la mayoría de las fundiciones va de menos de 90 g (3 onzas) a casi 25 kg (55 libras). Los costos de los equipos, en particular el de las matrices, es alto, pero en general los costos de la mano de obra son bajos debido a que ahora el proceso es semi (o totalmente) automatizado. La fundición a presión en matriz es económica para grandes lotes de producción. En la tabla 11.2 se presentan las capacidades de este tipo de fundición.

En este proceso, el metal fundido se fuerza dentro de la cavidad de la matriz a presiones que varían de 0.7 a 700 MPa (0.1 a 100 ksi). No debe confundirse el término europeo *fundición a presión en matriz* (o simplemente fundición a presión), que se aborda en esta sección, con el término *fundición a presión* descrito en la sección 11.3.4. Existen dos tipos básicos de máquinas de fundición a presión en matriz: de cámara caliente y de cámara fría.

El **proceso de cámara caliente** (fig. 11.17) comprende el uso de un pistón, que atrapa cierto volumen de metal fundido y lo fuerza dentro de la cavidad de la matriz a través de un cuello de ganso y una boquilla. Las presiones llegan hasta 35 MPa (5000 psi), con un promedio de unos 15 MPa (2000 psi). El metal se mantiene a presión hasta que se solidifica en la matriz. Para mejorar la vida de ésta y promover un enfriamiento rápido del metal (y de ese modo reducir el tiempo del ciclo de inyección), las matrices suelen enfriarse por circulación de agua o aceite a través de diversos pasajes dentro de su bloque. Por lo regular, las aleaciones de bajo punto de fusión (como el zinc, magnesio, estaño y plomo) se funden mediante este proceso. Los tiempos del ciclo varían de 200 a 300 inyecciones individuales por hora para el zinc, aunque se pueden fundir componentes muy pequeños, como los dientes para cremalleras, a razón de 18,000 inyecciones por hora.

En el **proceso de cámara fría** (fig. 11.18), se vacía metal fundido dentro del cilindro de inyección (*cámara de inyección*). Esta cámara no se calienta, de ahí el término *cámara*

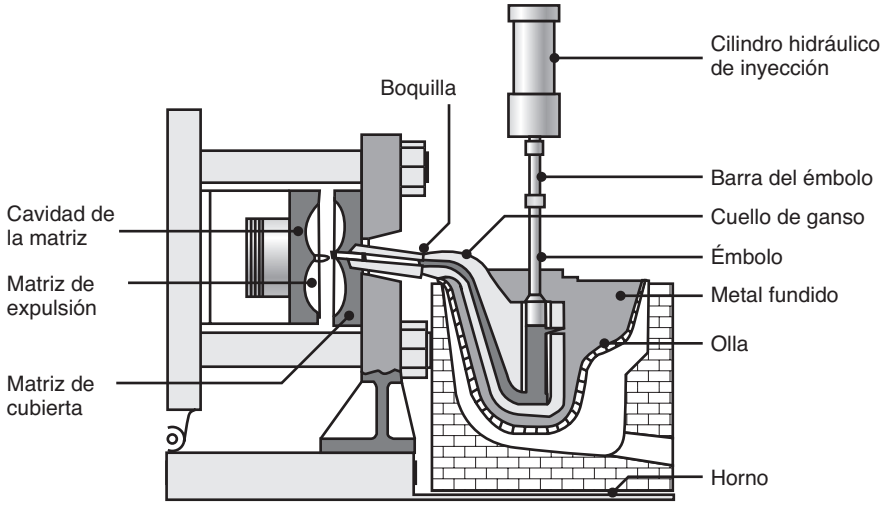


FIGURA 11.17 Esquema del proceso de fundición a presión en matriz de cámara caliente.

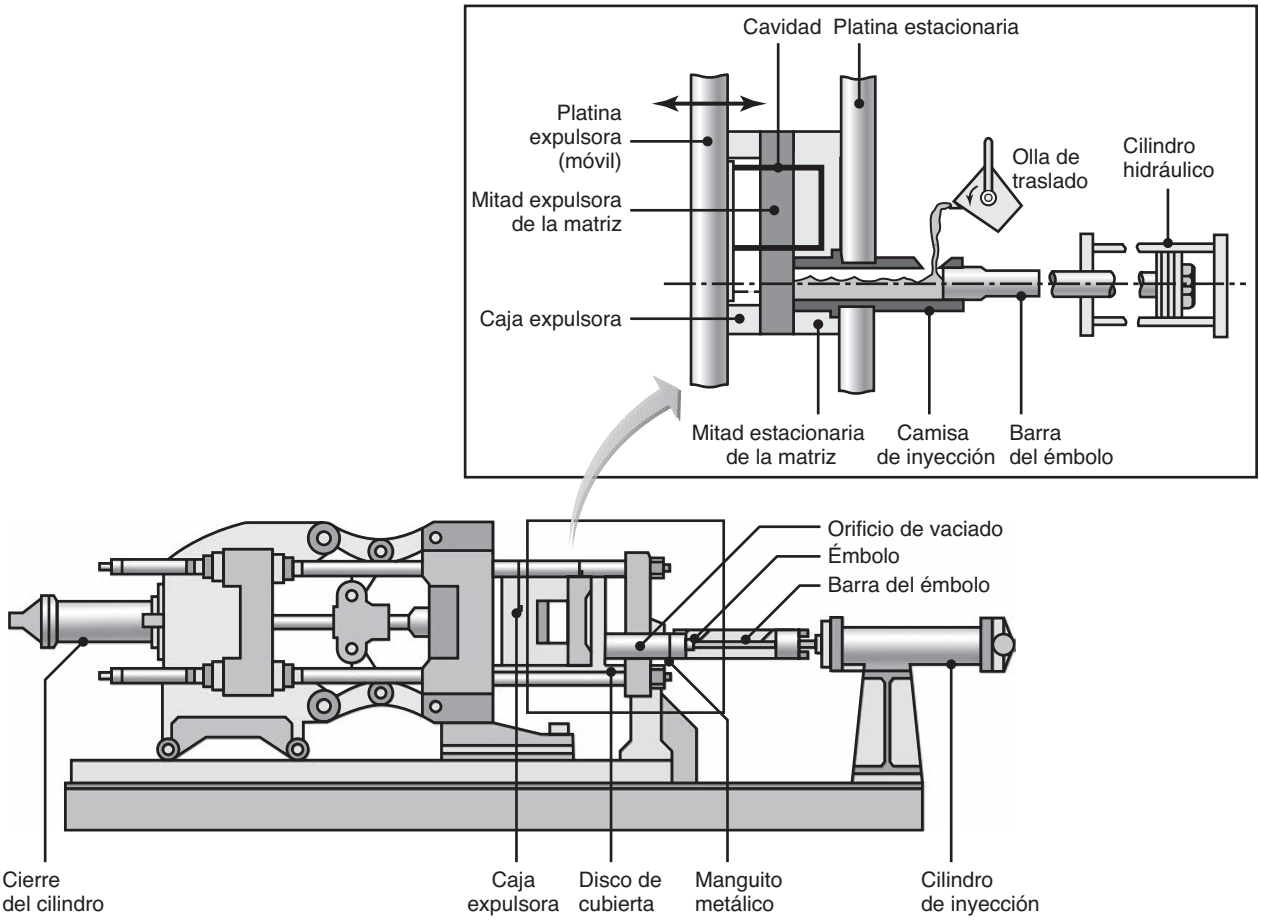


FIGURA 11.18 Esquema del proceso de fundición a presión en matriz de cámara fría. Estas máquinas son grandes en comparación con el tamaño de la fundición debido a las grandes fuerzas requeridas para mantener juntas las dos mitades de las matrices cerradas a presión.

fría. El metal se fuerza dentro de la cavidad de la matriz a presiones que generalmente van de 20 a 70 MPa (3 a 10 ksi), aunque pueden ser tan elevadas como 150 MPa (20 ksi).

Las máquinas pueden ser horizontales (como en la figura) o verticales, en cuyo caso la cámara de inyección es vertical. Normalmente, las aleaciones de alto punto de fusión de aluminio, magnesio y cobre se funden mediante este método, aunque también pueden fundirse otros metales (incluyendo los ferrosos). Las temperaturas de los metales fundidos inician en casi 600 ºC (1150 ºF) para el aluminio y algunas aleaciones de magnesio, y aumentan de modo considerable para las aleaciones de base cobre y de base hierro.

Capacidades de proceso y selección de la máquina. La fundición a presión en matriz tiene la capacidad de producir con rapidez partes fuertes de alta calidad y formas complejas, en particular con aluminio, bronce, magnesio y zinc (tabla 11.3). También proporciona una buena precisión dimensional y detalles de la superficie, por lo que las partes requieren muy pocas (o ninguna) operaciones de maquinado o terminado (formado de forma neta). Debido a las altas presiones involucradas, se producen paredes hasta de 0.38 mm (0.015 pulgadas), que son mucho más delgadas que las obtenidas por otros medios de fundición. Sin embargo, permanecen las marcas de los expulsores, al igual que pequeñas cantidades de proyecciones (material delgado comprimido entre las matrices) en la línea de partición de la matriz.

TABLA 11.3

Propiedades y aplicaciones características de algunas aleaciones comunes de fundición a presión en matriz

Aleación	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Aplicaciones
Aluminio 380 (3.5 de Cu-8.5 de Si)	320	160	2.5	Electrodomésticos, componentes automovilísticos, estructuras y cajas de motores eléctricos.
Aluminio 13 (12 de Si)	300	150	2.5	Formas complejas con paredes delgadas, partes que requieren resistencia a temperaturas elevadas.
Bronce 858 (60 de Cu)	380	200	15	Accesorios de plomería, candados, bujes, fundiciones ornamentales.
Magnesio AZ91 B (9 de Al-0.7 de Zn)	230	160	3	Herramientas eléctricas, partes automotrices, artículos deportivos.
Zinc No. 3 (4 de Al)	280	—	10	Partes automotrices, equipo de oficina, utensilios domésticos, accesorios de edificios, juguetes.
Zinc No. 5 (4 Al-1 Cu)	320	—	7	Electrodomésticos, partes automotrices, accesorios de edificios, equipo para negocios.

Fuente: American Die Casting Institute.

En la figura 11.1d se muestra una parte característica fabricada mediante fundición a presión en matriz; obsérvese lo intrincado de la forma y el fino detalle de la superficie. En la producción de ciertas partes, la fundición a presión en matriz puede competir de modo favorable con otros métodos de manufactura (como el estampado y forjado de láminas metálicas) y otros procesos de fundición. Además, debido a que el metal fundido se enfría con rapidez en las paredes de la matriz, la fundición tiene una capa superficial dura, de grano fino, con alta resistencia. En consecuencia, la relación resistencia a peso de las partes fundidas en matriz aumenta al disminuir el espesor de pared. Con un buen acabado superficial y una buena precisión dimensional, la fundición a presión en matriz puede producir superficies lisas para rodamientos que de otra manera se maquinarían normalmente.

Se pueden fundir integralmente a presión en matriz componentes como pernos, flechas y sujetadores roscados. Este proceso, denominado **moldeo con insertos**, es similar a la colocación de palitos de madera en las paletas antes de congelarlas (ver también la sección 19.3). Para que exista una buena resistencia entre las fases, las superficies de los insertos deben estar moleteadas (ver fig. 23.1f), ranuradas o estriadas. Por lo común, se utilizan insertos de acero, bronce y latón en aleaciones fundidas a presión en matriz. Al seleccionar los materiales para los insertos, debe tenerse en consideración la posibilidad de que ocurra corrosión galvánica. Para evitar este problema potencial, el inserto se puede aislar, recubrir o tratar superficialmente.

Debido a las altas presiones involucradas, las matrices para fundición a presión tienden a dividirse, a menos que se sujeten con firmeza. Por lo tanto, las máquinas para fundición a presión en matriz se clasifican según la fuerza que pueden ejercer para mantener cerradas las matrices. Las capacidades de las máquinas disponibles comercialmente varían de casi 25 a 3000 toneladas. Otros factores comprendidos en la selección de las máquinas para fundición a presión en matriz son el tamaño de esta última, la carrera del pistón, la presión de inyección y el costo.

Las matrices para fundición a presión (fig. 11.19) pueden ser de *una cavidad*, de *cavidades múltiples* (con varias cavidades idénticas), de *cavidades de combinación* (con varias cavidades diferentes) o *matrices unitarias* (matrices pequeñas y sencillas que pueden combinarse en dos o más unidades en una matriz maestra de sujeción). Por lo gene-

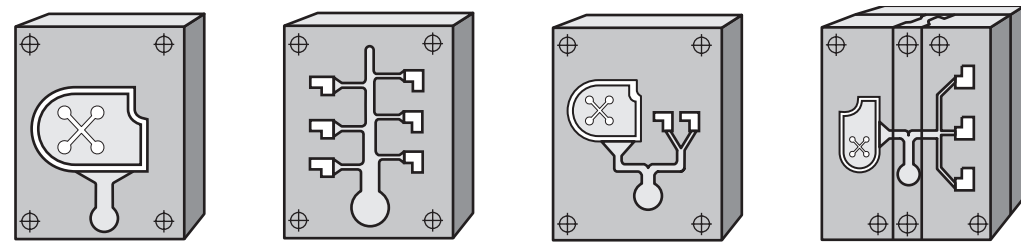


FIGURA 11.19 Diferentes tipos de cavidades en una matriz de fundición a presión. *Fuente:* Cortesía de American Die Casting Institute.

ral, la relación del peso de la matriz con respecto al peso de la pieza es de 1000 a 1, por lo que la matriz para una fundición que pese 2 kg debería pesar unos 2000 kg. Las matrices suelen fabricarse con aceros para herramentales para trabajo en caliente o aceros para moldes (ver sección 5.7). El desgaste de la matriz aumenta con la temperatura del metal fundido. El **agrietamiento por calor** de las matrices (el agrietamiento superficial originado por su calentamiento y enfriamiento repetitivo, visto en la sección 3.6) puede constituir un problema. Cuando los materiales para la matriz se seleccionan de manera apropiada y se les da mantenimiento adecuado, ésta puede durar más de medio millón de inyecciones antes de desgastarse significativamente.

El diseño de las matrices incluye una inclinación favorable (ángulo de salida) para permitir la extracción de la fundición. Los bebederos y canales de alimentación se pueden retirar en forma manual o mediante troqueles en una prensa. En la actualidad, los procesos completos de fundición a presión en matriz y de acabado están altamente automatizados. Con frecuencia se aplican lubricantes (agentes de separación) como delgados recubrimientos sobre las superficies de las matrices; éstos suelen ser lubricantes a base de agua, con grafito u otros componentes en suspensión. Debido a la alta capacidad de enfriamiento del agua, estos fluidos también son efectivos para mantener bajas las temperaturas de la matriz y así mejorar la vida de esta última.

11.3.6 Fundición centrífuga

Como su nombre lo indica, el proceso de *fundición centrífuga* utiliza las fuerzas de inercia (causadas por la rotación) para distribuir el metal fundido en las cavidades del molde —un método que fue sugerido inicialmente a principios de 1800. Existen tres tipos de fundición centrífuga: la fundición realmente centrífuga, la fundición semicentrífuga y el centrifugado.

Fundición realmente centrífuga. En la *fundición realmente centrífuga* se producen piezas cilíndricas huecas (como tubos sin costura, cañones de armas, bujes, revestimientos para cilindro de motores, pistas para rodamientos, con o sin bridas, y postes para iluminación de calles) mediante la técnica mostrada en la figura 11.20. En este proceso, el metal fundido se vacía dentro de un molde rotatorio. Por lo general, el eje de rotación es horizontal, aunque puede ser vertical en el caso de piezas de trabajo cortas. Los moldes se fabrican con acero, hierro o grafito y pueden contener un revestimiento refractario para incrementar la vida del molde. Las superficies de éste pueden tener forma para fundir tubos con diferentes diseños externos. La superficie interior de la fundición sigue siendo cilíndrica, ya que el metal fundido se distribuye de modo uniforme como resultado de las fuerzas centrífugas. Sin embargo, debido a las diferencias de densidad, los elementos más ligeros (como la espuma, impurezas y piezas del revestimiento refractario) tienden a reunirse en la superficie interior de la fundición. En consecuencia, las propiedades de la fundición pueden variar a lo largo de su espesor.

Se pueden fundir centrífugamente partes cilíndricas que varían de 13 mm (0.5 pulgadas) a 3 m (10 pies) de diámetro y de 16 m (50 pies) de largo, con paredes que van de 6 a 125 mm (0.25 a 5 pulgadas) de espesor. La presión generada por la fuerza centrífuga es elevada (hasta de 150 g); dicha presión es necesaria para fundir partes con paredes

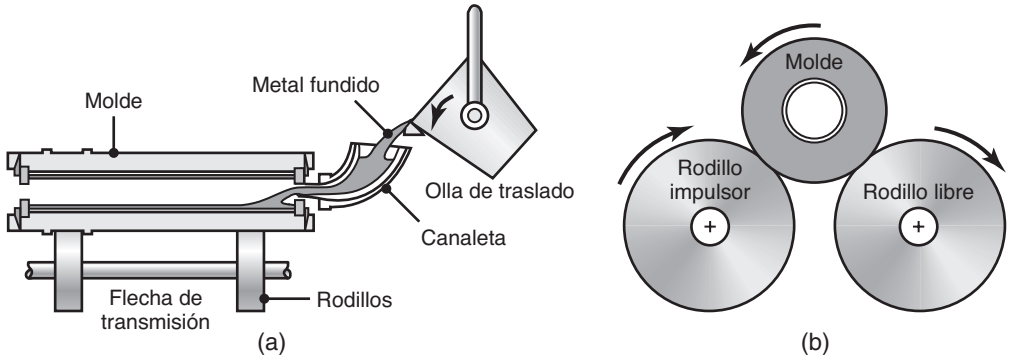


FIGURA 11.20 *(a)* Esquema del proceso de fundición centrífuga. Con este proceso se pueden fundir tubos, revestimientos cilíndricos y partes de forma similar. *(b)* Vista lateral de la máquina.

gruesas. Por medio de este proceso se producen fundiciones de buena calidad, precisión dimensional y detalle de la superficie externa. En la tabla 11.2 se presentan las capacidades de la fundición centrífuga.

Fundición semicentrífuga. En la figura 11.21a se muestra un ejemplo de *fundición semicentrífuga*. Este método se utiliza para fundir partes con simetría rotatoria, como las ruedas con rayos.

Centrifugado. En el *centrifugado* (también llamado *fundición centrífuga*), las cavidades de un molde de cualquier forma se colocan a cierta distancia del eje de rotación. El metal fundido se vacía por el centro y se fuerza dentro del molde mediante fuerzas centrífugas (fig. 11.21b). Las propiedades de las fundiciones pueden variar según la distancia que haya desde el eje de rotación, como en la fundición realmente centrífuga.

11.3.7 Fundición por dado impresor y formado de metales semisólidos

Dos procesos de fundición que fundamentalmente constituyen combinaciones de fundición y forjado (capítulo 14) son la *fundición por dado impresor* y el *formado de metales semisólidos*.

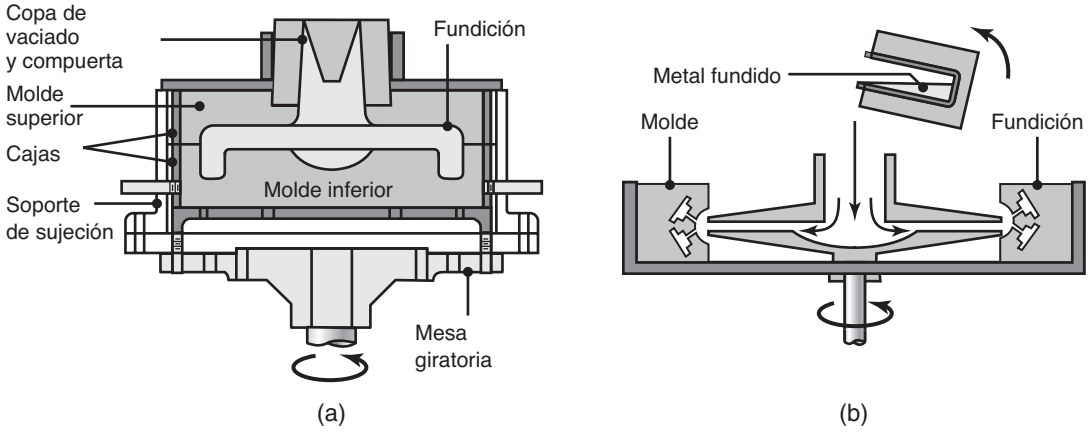


FIGURA 11.21 *(a)* Esquema del proceso de fundición semicentrífuga. Mediante este proceso se pueden fundir ruedas con rayos. *(b)* Esquema de fundición por centrifugado. Los moldes se colocan en la periferia de la máquina y el metal fundido se vierte dentro de ellos mediante fuerza centrífuga.

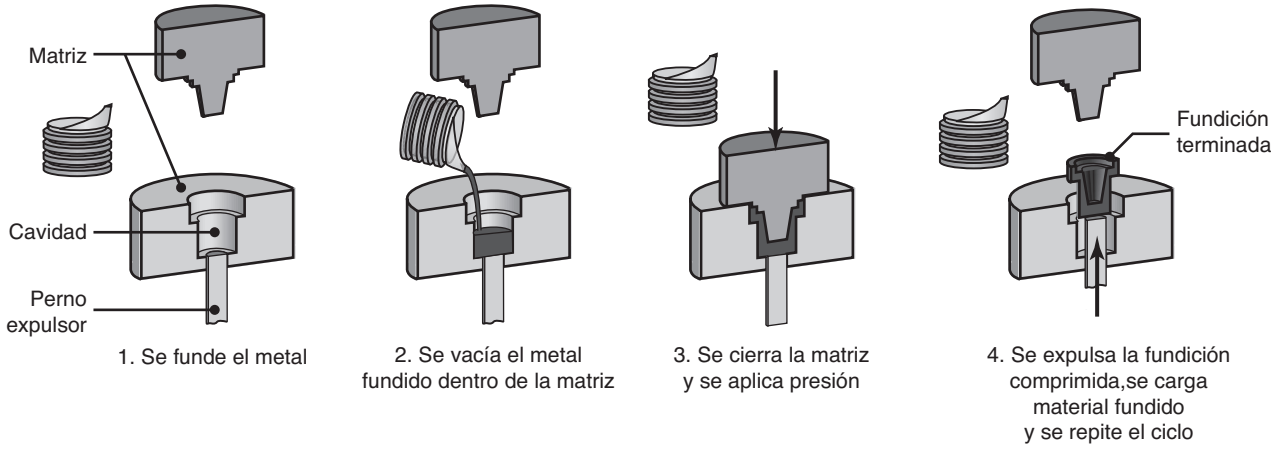


FIGURA 11.22 Secuencia de operaciones en el proceso de fundición por dado impresor. Este proceso combina las ventajas de la fundición y el forjado.

Fundición por dado impresor. El proceso de *fundición por dado impresor* (o *forjado de metal líquido*) se desarrolló en la década de 1960 y comprende la solidificación de metal fundido a alta presión (fig. 11.22). Los productos típicos producidos son los componentes automovilísticos y cuerpos de morteros (cañón de barril corto). La maquinaria incluye una matriz, un punzón y un perno expulsor. La presión aplicada por el punzón mantiene los gases atrapados en solución y el contacto a alta presión en la interfaz matriz-metal promueve una rápida transferencia de calor, lo que produce una microestructura fina con buenas propiedades mecánicas.

La aplicación de presión también supera las dificultades de alimentación que pudieran surgir al fundir metales con un largo intervalo de solidificación (sección 10.2.2). Las presiones requeridas en la fundición por dado impresor son menores que las del forjado en frío o en caliente. Se pueden hacer partes complejas con una forma cercana a la neta y un detalle fino de la superficie, tanto con aleaciones no ferrosas como con ferrosas.

Formado de metal semisólido. El formado de metal semisólido (también llamado *procesamiento en estado pastoso*, ver fig. 10.4) se desarrolló en la década de 1970 y se introdujo en la producción comercial en 1981. Cuando el metal (que consiste en líquido y componentes sólidos) entra en la matriz, se agita para triturar todas las dendritas como sólidos finos, y cuando se enfrían en la matriz, se desarrollan como una estructura de grano fino. La aleación muestra un comportamiento *tixotrópico* (de ahí que al proceso también se le llame **tixoformado**), lo que significa que su viscosidad disminuye cuando se agita. Así, por ejemplo, en reposo y por encima de su temperatura solidus, la aleación tiene la consistencia de la mantequilla, pero cuando se agita con vigor, su consistencia es similar a la del aceite para motor. El procesamiento de los metales en su estado pastoso también ha llevado a desarrollos en la *extrusión*, el *forjado* y el *laminado de estado pastoso* (de ahí el término *trabajo de metales semisólidos*). Estos procesos se utilizan para fabricar partes con aleaciones y compósitos de matriz metálica fundidos o forjados, diseñados especialmente.

El comportamiento tixotrópico se ha utilizado para desarrollar tecnologías que combinan la fundición y el forjado de partes mediante palanquillas fundidas, las cuales se forjan cuando son de 30% a 40% líquidas. Las partes automotrices de aleación de magnesio, por ejemplo, se han producido en máquinas con una característica que combina los procesos de fundición a presión en matriz y el moldeo de plásticos por inyección utilizando tornillos reciprocantes (ver sección 19.3). Las partes fabricadas incluyen bra-

zos de control, soportes y componentes de la dirección. El procesamiento de los aceros por tixoformado aún no alcanza el mismo estado que con el magnesio, debido sobre todo a las altas temperaturas involucradas, que afectan la vida de la matriz, y a la dificultad de fabricar formas complejas. Las ventajas del formado de metales semisólidos sobre la fundición de presión en matrices son: *(a)* las estructuras desarrolladas son homogéneas, con propiedades uniformes y alta resistencia, *(b)* se pueden fabricar partes delgadas y gruesas, *(c)* pueden utilizarse aleaciones fundidas y forjadas, y *(d)* a las partes se les puede dar tratamiento térmico posterior. Sin embargo, los costos tanto de los materiales como globales son mayores que los de la fundición a presión en matriz.

Reofundición. Ésta es otra técnica, que inicialmente se investigó en la década de 1960, para formar metales en estado semisólido. El metal se calienta apenas por encima de su temperatura solidus y se vierte en un recipiente para enfriarlo al estado semisólido. Después el lodo se mezcla y se vierte en el molde o matriz. Este proceso ha sido utilizado satisfactoriamente con aleaciones de aluminio y de magnesio.

11.3.8 Operaciones de fundición en molde compósito

Los *moldes compósitos* se fabrican con dos o más materiales diferentes y se utilizan en el moldeo en cáscara y en otros procesos de fundición. Por lo general se emplean para fundir formas complejas, como propulsores para turbinas. Incrementan la resistencia del molde, mejoran la precisión dimensional y el acabado superficial de las fundiciones y pueden ayudar a reducir los costos globales y el tiempo de procesamiento. Los materiales para moldeo más utilizados son cáscaras (producidas de la forma que ya se indicó), yeso, arena con aglutinante, metal y grafito. Estos moldes también pueden incluir machos o corazones y enfriadores para controlar la velocidad de solidificación en las áreas críticas de las fundiciones.

11.4 Técnicas de fundición para componentes monocristalinos

En la sección 1.2 se describieron las características de las estructuras monocristalinas y policristalinas en los metales. En esta sección se abordan las técnicas utilizadas para fundir componentes monocristalinos (como los álabes para turbinas de gas), que por lo general se fabrican con superaleaciones de base níquel y se utilizan en las etapas calientes de la máquina. Los procedimientos correspondientes también pueden usarse en otras aleaciones y componentes.

Fundición convencional de álabes para turbinas. El *proceso de fundición convencional* utiliza un molde de cerámica. El metal fundido se vacía dentro del molde y comienza a solidificarse en las paredes cerámicas. La estructura de grano desarrollada es policristalina, similar a la mostrada en la figura 10.2c. Sin embargo, la presencia de límites de los granos hace que esta estructura sea susceptible a la termofluencia y al agrietamiento a través de los límites cuando se somete a fuerzas centrífugas y a las elevadas temperaturas que suele haber en la operación de una turbina de gas.

Álabes solidificados direccionalmente. El *proceso de solidificación direccional* (fig. 11.23a) se desarrolló inicialmente en la década de 1960. El molde de cerámica se precalienta con calor radiante y se soporta en una placa de enfriamiento enfriada por agua. Una vez que se vacía el metal dentro del molde, el ensamble de dicha placa se baja lentamente. Los cristales comienzan a crecer hacia arriba en la superficie de la placa de enfriamiento, como los granos columnares mostrados en la figura 10.3. Por ello, el álabe se solidifica en forma direccional con límites de grano longitudinales, pero no transversales. En consecuencia, el álabe es más fuerte en la dirección de las fuerzas centrífugas desarrolladas en la turbina de gas.

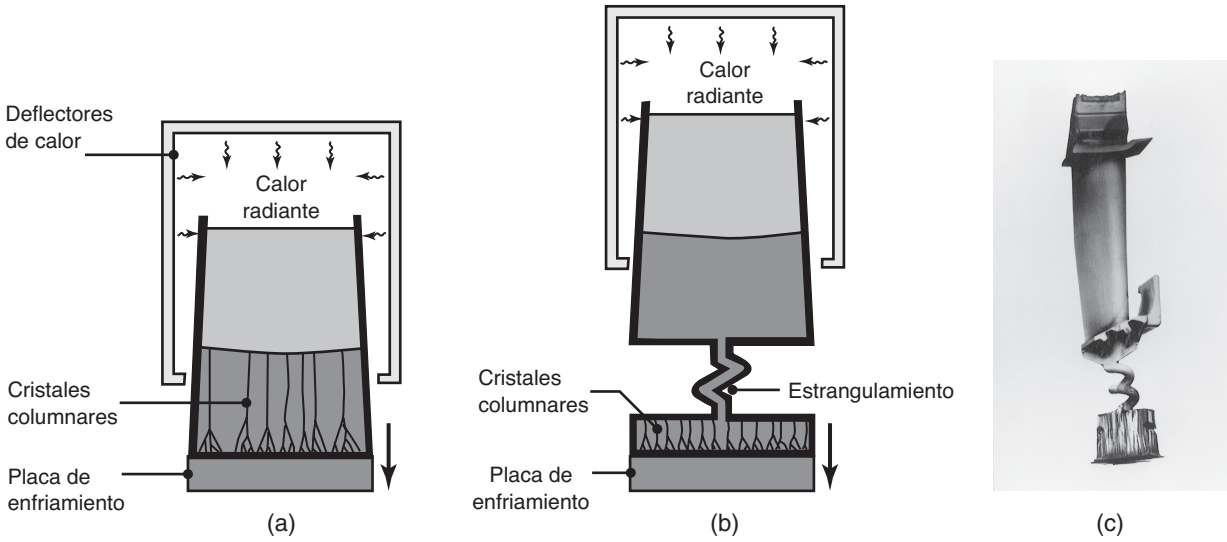


FIGURA 11.23 Métodos de fundición de álabes para turbina: *(a)* solidificación direccional; *(b)* método para producir un álabe monocristalino; y *(c)* álabe monocristalino con la porción estrangulada aún sujeta. *Fuente: (a)* y *(b)* B. H. Kear. *(c)* Cortesía de ASM International.

Álabes monocristalinos. En el *crecimiento de cristales*, desarrollado en 1967, el molde tiene un estrangulamiento en forma de sacacorchos o hélice (figs. 11.23b y c). La sección transversal es tan pequeña que sólo permite que se ajuste un cristal a través de ella. El mecanismo de crecimiento de cristales es tal que sólo los cristales orientados más favorablemente son capaces de crecer (una situación similar a la mostrada en la fig. 10.3) a lo largo de la hélice, porque las paredes del pasaje helicoidal interceptan a todos los otros cristales.

Al bajar lentamente el ensamble, crece un solo cristal hacia arriba a través del estrangulamiento y comienza a crecer en el molde. Es importante controlar de manera estricta la rapidez del movimiento. La masa solidificada en el molde es un álabe monocristalino. Aunque estos álabes son más costosos que los de otros tipos, la falta de límites de granos los hace resistentes a la termofluencia y al impacto térmico, por lo que tienen una vida de servicio más larga y confiable.

Crecimiento de monocristales. El crecimiento de monocristales es una actividad importante en la industria de los semiconductores, en la manufactura de obleas (*wafers*) de silicio para dispositivos microelectrónicos (capítulo 28). Existen dos métodos básicos de crecimiento de cristales.

- En el **método de cristalización progresiva**, también conocido como **proceso Czochralski** (CZ) (fig. 11.24a), se sumerge un cristal semilla en el metal fundido y después se extrae con lentitud (a razón de 10 μm/s aproximadamente), al tiempo que se gira. El metal líquido comienza a solidificarse en la semilla y la estructura cristalina de ésta continúa desarrollándose. Se pueden agregar *dopantes* (elementos de aleación) al metal líquido para proporcionarle propiedades eléctricas especiales. Con este proceso se hacen crecer monocristales de silicio, germanio y otros elementos. Por medio de esta técnica pueden producirse lingotes monocristalinos con dimensiones típicas de 50 mm a 150 mm (2 a 6 pulgadas) de diámetro y más de 1 m (40 pulgadas) de longitud.
- La segunda técnica para el crecimiento de cristales es el **método de la zona flotante** (fig. 11.24b). Se inicia con una barra de silicio policristalino que descansa sobre un monocristal; un devanado de inducción calienta las dos piezas mientras se mueve lentamente hacia arriba. El monocristal crece hacia arriba manteniendo su

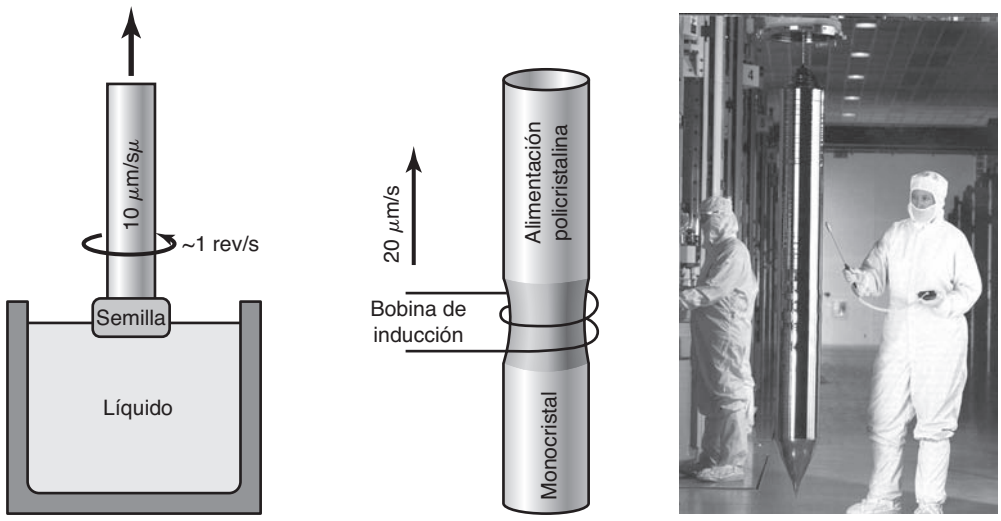


FIGURA 11.24 Dos métodos de crecimiento de cristales: *(a)* crecimiento progresivo (proceso Czochralski), y *(b)* método de la zona flotante. El crecimiento de cristales es importante, sobre todo en la industria de los semiconductores. *(c)* Lingote monocristalino producido por el proceso Czochralski. *Fuente:* Cortesía de Intel Corp.

orientación. Después se cortan obleas delgadas de la barra, se limpian y se pulen para utilizarse en la fabricación de dispositivos microelectrónicos.

11.5 Solidificación rápida

En la sección 6.14 se describen las propiedades de las *aleaciones amorfas* (también conocidas como *vidrios metálicos*). La técnica para fabricarlas (llamada *solidificación rápida*) comprende el enfriamiento del metal fundido a velocidades de hasta 10^6 K/s, a fin de que no tenga tiempo para cristalizarse (ver también fig. 1.11). La solidificación rápida produce una ampliación significativa de la solubilidad de sólido, refinamiento de grano y reducción de la microsegregación (ver sección 10.2.3), entre otros efectos.

En un método común llamado **fundido en disco rotatorio** (fig. 11.25), la aleación se funde por inducción en un crisol cerámico. Después se lanza, por medio de un gas de alta presión, a gran velocidad contra un disco giratorio de cobre (bloque de enfriamiento), que enfría rápidamente la aleación (**enfriamiento por aplastamiento**).

11.6 Inspección de las fundiciones

Para mantener una buena calidad es importante controlar todas las etapas de la fundición, desde la preparación del molde hasta la extracción de las fundiciones de los moldes o de las matrices. Se pueden utilizar varios métodos para inspeccionar fundiciones a fin de determinar su calidad y la presencia y los tipos de cualquier posible defecto. Las fundiciones pueden inspeccionarse *visual* u *ópticamente* en busca de defectos superficiales. Los defectos internos y bajo la superficie se investigan mediante diferentes técnicas *no destructivas* (sección 36.10). En las pruebas *destructivas* (sección 36.11), se extraen especímenes de prueba de distintas secciones de una fundición para hacer ensayos de resistencia, ductilidad y otras propiedades mecánicas, además de determinar la presencia, ubicación y distribución de la porosidad y cualquier otro defecto.

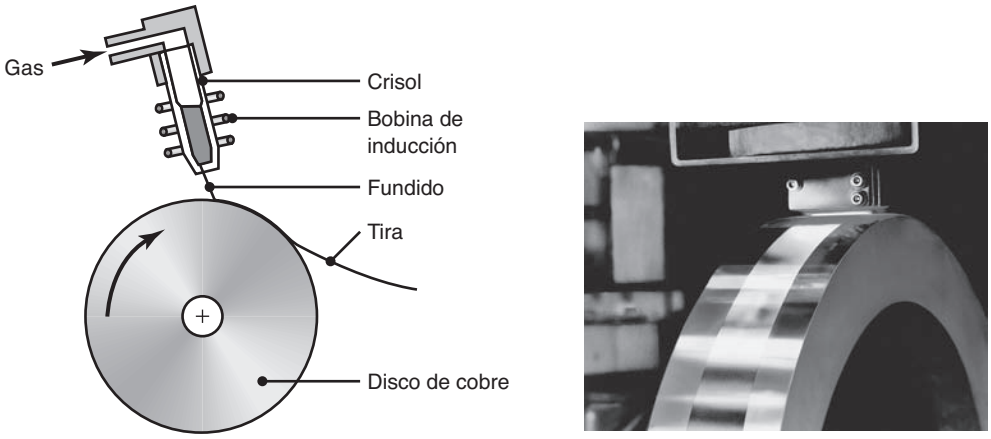


FIGURA 11.25 *(a)* Esquema del fundido en disco rotatorio para producir tiras delgadas de metal amorfo. *(b)* Fotografía de la producción de aleación de níquel mediante fundido en disco rotatorio. *Fuente:* Cortesía de Siemens AG.

La *hermeticidad a la presión* de los componentes fundidos (válvulas, bombas y tubos) se determina por lo general sellando las aberturas en la fundición y presurizándolos con agua, aceite o aire. (El aire es compresible y su uso resulta muy peligroso en dichas pruebas debido a la posibilidad de una súbita explosión por un defecto mayor en la fundición). En caso de requerir extrema hermeticidad para prevenir las fugas en aplicaciones críticas, se utiliza helio presurizado o gases especialmente aromatizados con detectores.N. del RT. Después se revisa que la fundición no tenga fugas mientras se mantiene la presión. Las fundiciones inaceptables o defectuosas se funden otra vez para reprocesarlas.

N. del RT. Muy similar a lo que se realiza con el gas doméstico (propano), el cual es inodoro, y para detectar una posible fuga se le adiciona un aromatizante de olor característico.

11.7 Prácticas y hornos para fusión

La práctica de la fusión es un aspecto importante de las operaciones de fundición, ya que tiene un impacto directo en su calidad. Los hornos se alimentan con material fundible, que consiste en metal, elementos de aleación y otros materiales (como **fundente** y constituyentes formadores de escoria). Los fundentes son compuestos inorgánicos que refinan el metal fundido eliminando los gases disueltos y diferentes impurezas. Se pueden agregar manualmente o inyectar de modo automático en el metal fundido.

Hornos de fusión. Los hornos de fusión que más se utilizan en los talleres de fundición son los hornos de arco eléctrico, de inducción, de crisol y cubilotes.

- Los hornos de **arco eléctrico**, descritos en la sección 5.2.3 e ilustrados en la figura 5.2, se utilizan ampliamente en talleres de fundición y tienen ventajas como una capacidad elevada de fusión (y, por lo tanto, gran capacidad de producción), causan mucho menos contaminación que otros tipos de hornos y son capaces de mantener el metal fundido (a temperatura constante por cierto periodo) para propósitos de aleación.
- Los hornos de **inducción** (fig. 5.2c) son útiles sobre todo en pequeños talleres de fundición y producen fusiones de composición controlada más pequeñas. Existen dos tipos básicos. El *horno de inducción sin núcleo* consta de un crisol totalmente rodeado por una bobina de cobre enfriado por agua, por la que pasa una corriente

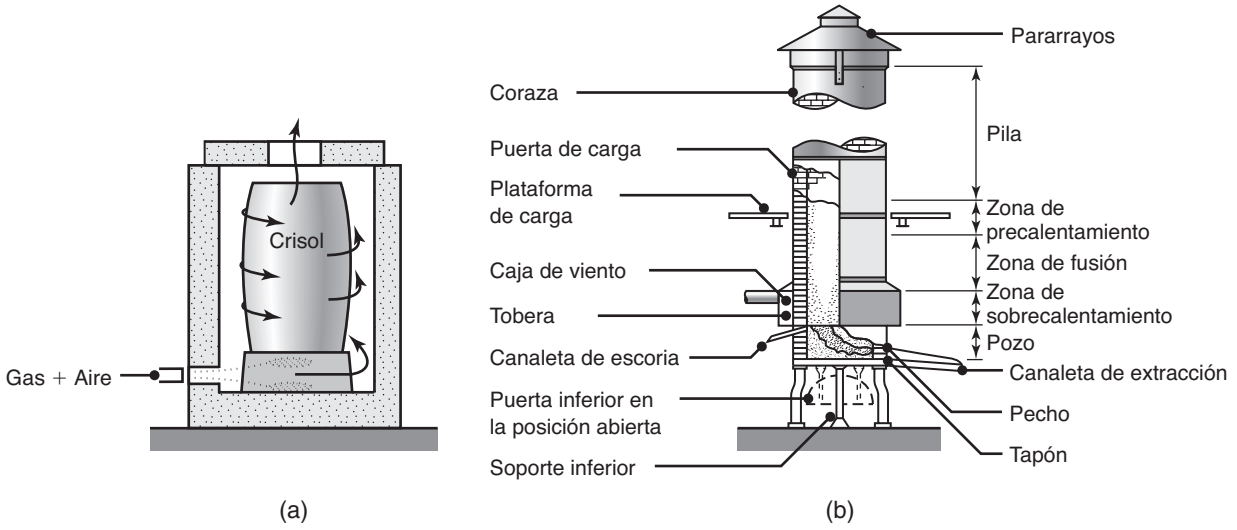


FIGURA 11.26 Dos tipos de hornos de fusión utilizados en los talleres de fundición: *(a)* de crisol, y *(b)* cubilote.

de alta frecuencia. Debido a que existe una fuerte acción de agitación electromagnética durante el calentamiento por inducción, este tipo de horno tiene excelentes características de mezclado para alear y agregar una nueva carga de metal.

El otro tipo, llamado *horno de canal* o *de núcleo*, emplea una corriente de baja frecuencia (hasta de 60 Hz) y tiene una bobina que rodea sólo una pequeña parte de la unidad. Por lo común se utiliza en talleres de fundición no ferrosa y es adecuado para: *(a)* sobrecalentamiento (es decir, calentamiento por encima de la temperatura normal de fundición para mejorar la fluidez), *(b)* sostenimiento (que lo hace adecuado para aplicaciones de fundición a presión en matriz), y *(c)* duplicación (utilizando dos hornos para, por ejemplo, fundir el metal en un horno y transferirlo a otro).

- Los **hornos de crisol** (fig. 11.26a), que se han utilizado ampliamente a lo largo de la historia, se calientan con combustibles como los gases comerciales, gasóleo y combustible fósil, además de la electricidad. Pueden ser estacionarios, basculantes o móviles.
- Los **cubilotes** son recipientes de acero verticales recubiertos con refractarios, que se alimentan con capas alternas de metal, coque y fundente (fig. 11.26b). Aunque requieren mayores inversiones y de manera creciente han sido reemplazados por los hornos de inducción, los cubilotes funcionan continuamente, tienen altas capacidades de fusión y producen grandes cantidades de metal fundido.
- La **fusión por levitación** comprende la *suspensión magnética* del metal fundido. Una bobina de inducción calienta en forma simultánea una palanquilla sólida y agita y confina la fusión, eliminando así la necesidad de un crisol (que podría ser una fuente de contaminación con inclusiones de óxidos). El metal fundido fluye hacia abajo dentro de un molde de fundición por revestimiento colocado directamente bajo la bobina. Las fundiciones por revestimiento producidas con este método no tienen inclusiones de refractarios ni porosidad por gas, y poseen una estructura uniforme de grano fino.

11.8 Talleres de fundición y su automatización

Las operaciones de fundición se realizan por lo general en *talleres de fundición* (del latín *fundere*, que significa "fusión y vaciado"). Aunque tradicionalmente han comprendido

mucha mano de obra, los talleres modernos de fundición tienen instalaciones automatizadas e integradas con computadoras en todos los aspectos de sus operaciones. Producen una amplia variedad y tamaños de fundición a altas capacidades de producción, con un buen control de la calidad y a un bajo costo.

Como se indicó en la figura 11.2, las operaciones en los talleres de fundición inicialmente comprendían dos grupos de actividades separadas. El primero es la fabricación de modelos y moldes. Ahora se utilizan el diseño y la manufactura asistidos por computadora y técnicas de producción rápida de prototipos para minimizar la prueba de ensayo y error, y, de esta manera, mejorar la eficiencia. Se utiliza maquinaria automatizada para minimizar los costos de la mano de obra, que pueden ser significativos en la producción de fundiciones. El segundo grupo de actividades es la fusión de los metales, controlando su composición e impurezas y vaciándolos en los moldes.

El resto de las operaciones, como el vaciado en moldes manejados en transportadoras, la agitación, limpieza, tratamiento térmico e inspección, también se han automatizado. Esto minimiza la mano de obra, reduce la posibilidad de error humano, aumenta la capacidad de producción e incrementa los niveles de calidad. Hoy en día se utilizan ampliamente los robots industriales (sección 37.7) en las operaciones de las fundiciones, como limpieza, corte de mazarotas, ventilación y rociado de moldes, vaciado, selección e inspección. Otras operaciones son los sistemas automáticos de almacenamiento y entrega de machos o corazones y modelos mediante vehículos guiados de manera automática (sección 37.6).

El nivel de automatización en los talleres de fundición es un factor económico importante, en particular porque muchos talleres de fundición son negocios pequeños. El grado de automatización depende del tipo de productos fabricados. Por ejemplo, una instalación para fundición a presión por matriz, o un taller de fundición que fabrica partes para la industria automotriz, pueden implicar lotes de producción de cientos de miles de unidades, por lo que es deseable un alto nivel de automatización. En cambio, un taller de fundición por pedido que produzca lotes de producción cortos puede no estar automatizado en la misma medida. Además, en el pasado, las operaciones de los talleres de fundición eran vistas como algo sucio y caliente, intensivas en el uso de la mano de obra. Hoy en día, puede ser difícil encontrar personal calificado para trabajar en dicho ambiente. En consecuencia, la automatización se ha vuelto crecientemente necesaria para compensar la declinación en la competencia de los trabajadores.

RESUMEN

- En general, los procesos de fundición se clasifican como fundición en molde desechable o en molde permanente. Los procesos de molde desechable más comunes son en arena, en cáscara, de yeso, de cerámica y fundición por revestimiento. Los de molde permanente incluyen la fundición hueca, a presión, a presión en matriz y centrífuga. En general, la fundición en molde desechable implica menores costos de moldes y equipos, pero con una menor precisión dimensional.
- Los moldes utilizados en la fundición de molde permanente están hechos de metal o de grafito y se utilizan varias veces para producir un gran número de partes. Debido a que los metales son buenos conductores de calor, aunque no permiten el escape de los gases, los moldes permanentes tienen efectos diferentes sobre la fundición que los de arena u otros materiales agregados.
- En la fundición de molde permanente, los costos de las matrices y del equipo son relativamente altos, pero los procesos resultan económicos cuando se trata de grandes lotes de producción. La pérdida por desechos es baja y la precisión dimensional elevada, con buenos detalles superficiales.

- Otros procesos de fundición incluyen la fundición por dado impresor (una combinación de fundición y forjado), formado de metales semisólidos, solidificación rápida para la producción de aleaciones amorfas y la fundición de componentes monocristalinos (como los álabes para turbinas) para las etapas calientes de los motores de propulsión.
- Los procesos de fusión y su control también son factores importantes en las operaciones de fundición. Incluyen la fusión apropiada de los metales, la preparación para la aleación, la remoción de escoria y espuma, y el vaciado del metal fundido en los moldes. También es importante la inspección de las fundiciones, a fin de buscar posibles defectos internos o externos.
- Posteriormente, las fundiciones se pueden someter a proceso adicional (como el tratamiento térmico y las operaciones de maquinado) para producir las formas finales deseadas y las características de la superficie.

TÉRMINOS CLAVE

Agente de separación
Aglutinantes
Arena verde para moldeo
Crecimiento de cristales
Formado de metales semisólidos
Fundentes
Fundición a presión
Fundición a presión en matriz
Fundición centrífuga
Fundición de modelo evaporativo
Fundición de precisión
Fundición de vacío
Fundición en molde cerámico
Fundición en molde de yeso
Fundición en molde permanente
Fundición hueca
Fundición por dado impresor
Fundición por revestimiento
Fusión por levitación
Machos o corazones
Modelo desechable
Modelos
Moldeo con insertos
Moldeo de grafito compactado
Moldeo en arena
Moldeo en cáscara
Moldes compósitos
Moldes desechables
Moldes permanentes
Plantillas de machos o corazones
Proceso a la cera perdida
Proceso a la espuma perdida
Producción rápida de prototipos
Reofundición
Solidificación rápida
Soportes de machos o corazones
Talleres de fundición
Tixotrópico

BIBLIOGRAFÍA

Allsop, D. F. y Kennedy, D., *Pressure Die Casting-Part II: The Technology of the Casting and the Die,* Pergamon, 1983.

An Introduction to Die Casting, American Die Casting Institute, 1981.

ASM Handbook, Vol. 15: *Casting*, ASM International, 1998.

Bradley, E. F., *High-Performance Castings: A Technical Guide*, Edison Welding Institute, 1989.

Campbell, J., *Castings*, 2a. ed. Butterworth-Heinemann, 2003.

Clegg, A. J., *Precision Casting Processes*, Pergamon, 1991.

Kaye, A. y Street, A. C., *Die Casting Metallurgy,* Butterworth, 1982.

Lieberman, H. H. (ed.), *Rapidly Solidified Alloys*, Marcel Dekker, 1993.

Mikelonis, P. J. (ed.), *Foundry Technology: A Source Book*, ASM International, 1982.

Product Design for Die Casting, Diecasting Development Council, 1998.

Steel Castings Handbook, 6a. ed., ASM International, 1995.

Street, A. C., *The Diecasting Book,* 2a. ed., Portcullis Press, 1986.

The Metallurgy of Die Castings, Society of Die Casting Engineers, 1986.

Young, K. P., *Semi-solid Processing,* Chapman & Hall, 1997.

PREGUNTAS DE REPASO

11.1 Describa las diferencias entre los moldes desechables y los permanentes.

11.2 Nombre los factores importantes al seleccionar arena para moldes.

11.3 ¿Cuáles son los tipos más importantes de moldes de arena? ¿Cuáles son sus características?

11.4 Liste los factores que deben tomarse en consideración al seleccionar materiales para modelos.

11.5 ¿Cuál es la función de un corazón o macho?

11.6 ¿Cuál es la diferencia entre la fundición de molde de arena y la de molde en cáscara?

11.7 ¿Cuáles son los moldes compósitos? ¿Por qué se utilizan?

11.8 Describa las características de la fundición en molde de yeso.

11.9 ¿Por qué el proceso de fundición por revestimiento es capaz de producir detalles finos en la superficie de las fundiciones?

11.10 Nombre el tipo de materiales utilizados para los procesos de fundición en molde permanente.

11.11 ¿Cuáles son las ventajas de la fundición a presión en matriz?

11.12 Liste las ventajas y limitaciones de la fundición a presión en matriz.

11.13 ¿Cuál es el propósito de una mazarota?, ¿y de un respiradero?

11.14 Dé algunas razones para usar insertos para matrices.

11.15 ¿Qué es la fundición por dado impresor? ¿Cuáles son sus ventajas?

11.16 ¿Cuáles son las ventajas del proceso de fundición a la espuma perdida?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

11.17 Si sólo necesita unas pocas unidades de una fundición particular, ¿qué proceso(s) utilizaría? ¿Por qué?

11.18 ¿Cuáles son las razones de la gran variedad de procesos de fundición que se han desarrollado a lo largo de los años? Explique con ejemplos específicos.

11.19 ¿Por qué la fundición a presión en matriz produce las partes fundidas más pequeñas?

11.20 ¿Qué diferencias (si es que existe alguna) hay entre las propiedades de las fundiciones fabricadas mediante molde permanente y por fundición en arena?

11.21 ¿Recomendaría el precalentamiento de los moldes utilizados en la fundición en molde permanente? ¿Retiraría la fundición en cuanto se solidificara? Explique sus razones.

11.22 En relación con la figura 11.3, ¿piensa que sería necesario colocar pesas o sujetar las dos mitades del molde? Explique sus razones. ¿Piensa que el tipo de metal fundido, como hierro fundido gris o aluminio, produciría alguna diferencia en la fuerza de sujeción? Explique su respuesta.

11.23 Explique por qué la fundición por dado impresor produce partes con mejores propiedades mecánicas, precisión dimensional y acabado superficial que los procesos con molde desechable.

11.24 ¿Cómo sujetaría los modelos individuales de cera en un "árbol" en la fundición por revestimiento?

11.25 Describa qué medidas tomaría para reducir el movimiento de los corazones o machos en la fundición en arena.

11.26 Ha visto que, aunque la fundición por presión en matriz produce partes delgadas, existe un límite. ¿Por qué no se pueden hacer partes más delgadas por medio de este proceso?

11.27 ¿Cómo se fabrican partes huecas con cavidades diferentes mediante fundición a presión por matriz? ¿Se utilizan corazones o machos? De ser así, ¿cómo? Explique su respuesta.

11.28 Se dice que la relación resistencia a peso de las partes fundidas en matriz aumenta al disminuir el espesor de la pared. Explique por qué.

11.29 ¿Cómo se colocan las mazarotas y los bebederos en los moldes de arena? Explique con los dibujos apropiados.

11.30 En la fundición de molde en cáscara, el proceso de curado es crítico para la calidad del molde terminado. En esta parte del proceso, el ensamble del molde en cáscara y los machos o corazones se colocan en un horno por un breve periodo para terminar el curado de la resina aglutinante. Liste las causas probables de los corazones o machos curados de manera no uniforme, o de espesores no uniformes de los mismos.

11.31 ¿Por qué la máquina de fundición a presión en matriz mostrada en la figura 11.17 tiene un mecanismo tan grande para cerrar las matrices? Explique su respuesta.

11.32 ¿Qué proceso se utiliza para fabricar los chocolates huecos?

11.33 ¿Cuáles son los beneficios y perjuicios de calentar el molde en la fundición por revestimiento antes de vaciar el metal fundido?

11.34 El estado pastoso de las aleaciones se refiere al estado entre las temperaturas solidus y liquidus, como se indica en la sección 10.2. Los metales puros no tienen tal estado pastoso. ¿Significa esto que los metales puros no pueden fundirse mediante fundición hueca? Explique su respuesta.

11.35 ¿Puede un soporte para corazones o machos ser también un enfriador? Explique su respuesta.

11.36 Clasifique los procesos de fundición descritos en este capítulo en términos de su velocidad de solidificación. (Esto es, ¿qué procesos extraen calor más rápidamente de cierto volumen de metal?).

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

11.37 Estime la fuerza de cierre para una máquina de fundición a presión en matriz en la que la fundición es rectangular con dimensiones proyectadas de 125 mm × 175 mm (5 pulgadas × 7 pulgadas). ¿Su respuesta dependería de si se trata de un proceso de cámara caliente o de cámara fría? Explique su respuesta.

11.38 La pieza en bruto para el carrete mostrado en la figura P11.38 se fundirá en arena a partir de una aleación de aluminio para fundición A-319. Dibuje un esquema del modelo de madera para esta parte e incluya todas las tolerancias necesarias para la contracción y el maquinado.

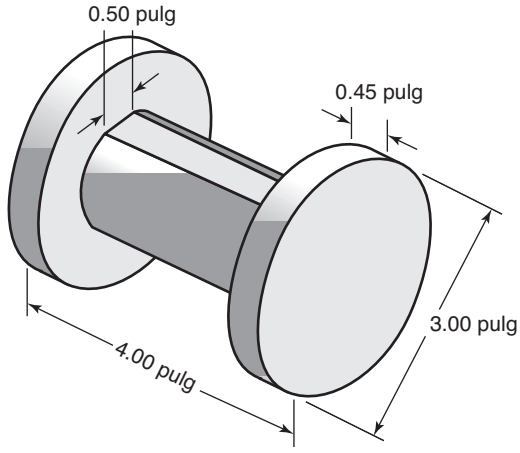


FIGURA P11.38

11.39 Repita el problema 11.38, pero suponga que el carrete de aluminio se fundirá utilizando fundición de modelo desechable. Explique las diferencias importantes entre los dos modelos.

11.40 En la fundición en arena es importante colocar pesas sobre la mitad superior del molde con suficiente fuerza para evitar que flote cuando se vacía el metal en el molde. Para la fundición mostrada en la figura P11.40, calcule la cantidad mínima de peso necesaria para evitar que el molde superior flote al vaciar el metal fundido. (*Sugerencia:* La fuerza de flotación ejercida por un metal fundido en el molde superior depende de la altura efectiva de la presión potencial del metal arriba del molde superior).

11.41 Si se necesita una aceleración de 100 g para producir una parte en una fundición realmente centrífuga y la parte tiene un diámetro interior de 10 pulgadas, un diámetro exterior de 14 pulgadas y una longitud de 25 pies, ¿qué velocidad rotacional requiere?

11.42 Un joyero desea producir 20 anillos de oro en una operación de fundición por revestimiento. Las partes de cera se sujetan a un bebedero central de cera de 0.5 pulgadas de diámetro. Las sortijas se localizan en cuatro filas, cada una a 0.5 pulgadas de la otra en el bebedero, y requieren un canal de alimentación de 0.125 pulgadas de diámetro y 0.5 pulgadas de longitud. Estime el peso del oro necesario para llenar totalmente los anillos, canales y bebederos. La gravedad específica del metal es 19.3.

11.43 Suponga que es un instructor que cubre los temas descritos en este capítulo y que está dando un cuestionario sobre los aspectos numéricos para poner a prueba el conocimiento de los estudiantes. Prepare dos problemas cuantitativos y proporcione las respuestas.

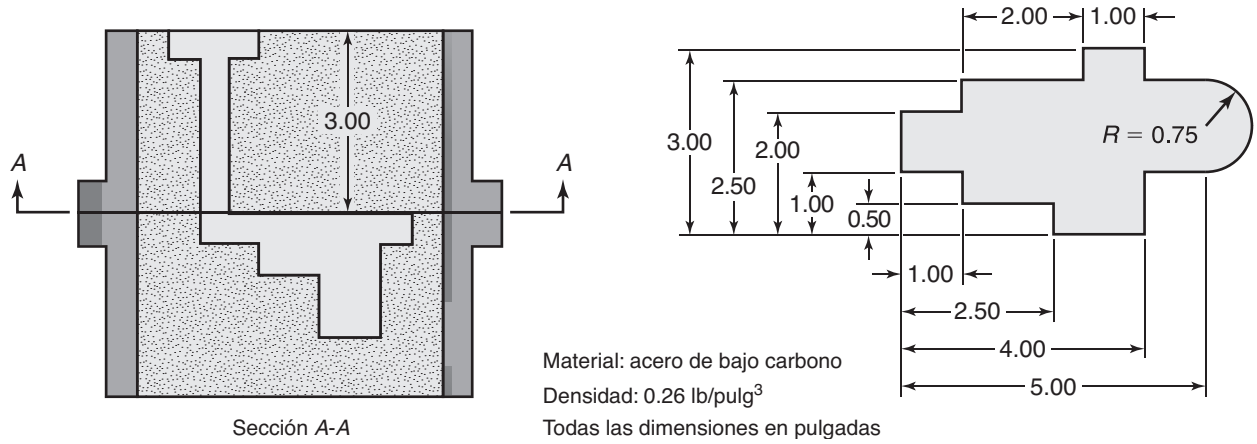


FIGURA P11.40

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

11.44 Liste los materiales para moldes y matrices utilizados en los procesos de fundición descritos en este capítulo. Debajo de cada tipo de material, liste los procesos de fundición que se emplean y explique por qué son adecuados para ese material para moldes o matrices en particular.

11.45 La forma óptima de una mazarota es esférica, para asegurar que se enfría más lentamente que la fundición que alimenta. Sin embargo, es difícil fundir mazarotas con esa forma. *(a)* Dibuje la forma de una mazarota ciega que sea fácil de moldear pero que tenga la menor relación área-volumen posible. *(b)* Compare el tiempo de solidificación de la mazarota en la parte *(a)* con el de una mazarota con forma de cilindro circular recto. Suponga que el volumen de cada mazarota es el mismo y que su altura es igual a su diámetro. (Ver ejemplo 10.1).

11.46 Dibuje una línea de fundición automatizada que consista en maquinaria, transportadores, robots, sensores, etc., y que realice automáticamente el proceso de fundición de modelo desechable.

11.47 ¿Cuál de los procesos de fundición sería más adecuado para fabricar juguetes pequeños? ¿Por qué?

11.48 Describa los procedimientos que usaría para fabricar una estatua grande de bronce. ¿Qué proceso(s) de fundición sería(n) adecuado(s)? ¿Por qué?

11.49 Escriba un breve informe sobre la permeabilidad de los moldes y las técnicas utilizadas para determinar la permeabilidad.

11.50 Comúnmente, los metales ligeros se funden en moldes de hule vulcanizado. Efectúe una investigación a partir de la bibliografía y describa la mecánica de este proceso.

11.51 Algunas veces es deseable enfriar los metales más lentamente que como se haría si los moldes se mantuvieran a temperatura ambiente. Liste los métodos y explique por qué los utilizaría para hacer más lento el proceso de enfriamiento.

11.52 La parte mostrada en la figura P11.52 es una cáscara semiesférica utilizada como copa acetabular (con for-

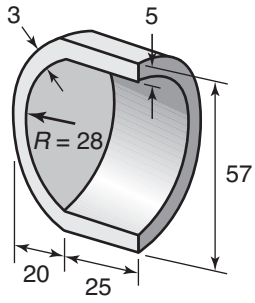


FIGURA P11.52

ma de hongo) en una prótesis de cadera. Seleccione un proceso de fundición para esta parte y dibuje todos los modelos o herramentales necesarios si se va a producir con una aleación de cobalto-cromo.

11.53 En la figura P11.53 se ilustra la porosidad desarrollada en la saliente de una fundición. Demuestre que este problema se puede eliminar simplemente reposicionando la línea de partición de esta fundición.

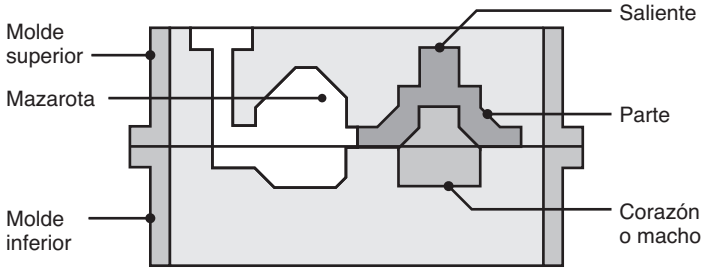
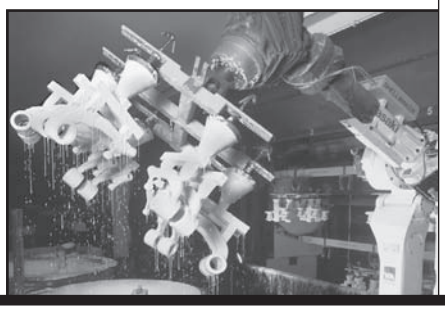


FIGURA P11.53

Fundición de metales: diseño, materiales y economía

CAPÍTULO 12



Este último capítulo sobre fundición de metales sirve como guía para importantes consideraciones respecto de las relaciones entre el diseño del producto, la selección de material y el proceso y los métodos económicos de fundición para aplicaciones específicas. Se describen de manera detallada:

- Consideraciones de diseño para la fundición en moldes desechables y permanentes.
- Lineamientos generales para una fundición exitosa.
- Características y aplicaciones de las aleaciones de fundición ferrosas y no ferrosas.
- Consideraciones económicas en la fundición de metales.

12.1 Introducción 323
12.2 Consideraciones de diseño en la fundición 323
12.3 Aleaciones para fundición 332
12.4 Economía de la fundición 337

EJEMPLO:

12.1 Ilustraciones de diseños de fundición deficientes y adecuados 330

12.1 Introducción

En los dos capítulos anteriores se observó que la práctica exitosa de la fundición requiere el control adecuado de un gran número de variables; por ejemplo, las características particulares de metales y aleaciones fundidas, el método de fundición, los materiales de moldes y matrices, el diseño del molde y diversos parámetros del proceso. Todo, el flujo del metal fundido en las cavidades del molde, los sistemas de alimentación, la velocidad de enfriamiento y los gases generados, influye en la calidad de una fundición.

En este capítulo se describen las consideraciones y los lineamientos generales de diseño de la fundición de metales y se presentan sugerencias para evitar defectos. También se definen las características de las aleaciones que más se funden, y sus aplicaciones típicas. Debido a que la economía de las operaciones de fundición es tan importante como los aspectos técnicos, en este capítulo también se tratan en forma breve los factores económicos básicos relativos a las operaciones de fundición.

12.2 Consideraciones de diseño en la fundición

Como en todas las operaciones de manufactura, con los años se han desarrollado ciertos lineamientos y principios de diseño respecto de la fundición. A pesar de que estos principios se han establecido sobre todo a través de la experiencia, también se han llegado a utilizar en gran medida los métodos analíticos, la simulación y el modelado de procesos, así como las técnicas de diseño y manufactura asistidas por computadora; de esta manera se han mejorado la productividad y la calidad de las fundiciones con ahorros significativos en los costos.

Todas las operaciones de fundición comparten ciertas características, como el cambio de fase y la contracción térmica durante el ciclo de fundición. En consecuencia, aplican por igual varias consideraciones de diseño a la fundición en arena y a la fundición a presión, por ejemplo. Sin embargo, cada proceso tiene sus propios criterios de diseño en particular; la fundición en arena requiere tomar en consideración la erosión del molde y las inclusiones correspondientes a la arena en la fundición, en tanto que en la fundición a presión no existirán dichas preocupaciones (aunque sufre sus propios problemas, como el agrietamiento por calor de las matrices, que reduce la vida de éstas).

Con mucha frecuencia, la corrección de las causas de los defectos es complicada y, por otra parte, las consideraciones que se presentan en este capítulo de ninguna manera representan una lista exhaustiva. Además, a menudo los defectos son aleatorios y difíciles de reproducir, lo que complica aún más la implantación de medidas correctivas. En la mayoría de los casos, cierto diseño de molde produce un gran porcentaje de partes adecuadas y algunas defectuosas. Es muy difícil que un molde no produzca partes defectuosas; por estas razones, se deben establecer procedimientos de control de calidad para aplicaciones críticas de las fundiciones.

12.2.1 Consideraciones generales de diseño para fundiciones

Existen dos tipos de problemas de diseño en fundición: *(a)* las características geométricas, tolerancias, etc., que deben incorporarse en la parte, y *(b)* las características que debe tener el molde para producir la fundición deseada. Por lo general, el diseño robusto de las fundiciones involucra los siguientes pasos:

1. Diseñar la parte de manera que la forma pueda fundirse con facilidad. En este capítulo se proporcionan varias consideraciones importantes que son útiles en dichos proyectos de diseño.
2. Seleccionar un proceso de fundición y un material apropiado para la parte, tamaño, propiedades mecánicas, etc. Con frecuencia, el diseño de la parte no es independiente del primer paso dado y se necesita especificar la parte, el material y el proceso de manera simultánea.
3. Localizar la línea de partición del molde en la parte.
4. Localizar y diseñar las compuertas que permitan la alimentación uniforme de la cavidad del molde con el metal fundido.
5. Seleccionar una geometría apropiada del canal de alimentación para el sistema.
6. Localizar las características del molde, como bebederos, filtros y mazarotas, como es apropiado.
7. Asegurar que estén vigentes controles adecuados y prácticas apropiadas.

A continuación examinaremos las reglas correspondientes a las condiciones generales de fundición y después trataremos las normas específicas aplicables a operaciones particulares de fundición.

Diseño de las partes fundidas. Las siguientes consideraciones son importantes para el diseño de las fundiciones, como se señala en la figura 12.1.

- **Esquinas, ángulos y espesores de sección.** Deben evitarse en lo posible las esquinas, ángulos y filetes agudos, pues actúan como concentradores de esfuerzos y pueden hacer que el metal (y las matrices) se agriete o desgarre durante la solidificación. Los radios de los filetes deben seleccionarse para reducir las concentraciones de esfuerzos y asegurar el flujo apropiado de metal líquido durante el vaciado. Por lo general, los radios de los filetes van de 3 mm a 25 mm (1/8 a 1 pulgada), aunque se pueden permitir radios menores en fundiciones pequeñas y en aplicaciones específicas. Sin embargo, si los radios de los filetes son demasiado grandes, el volumen del material en esas regiones también es grande y, por consiguiente, la velocidad de enfriamiento es inferior.

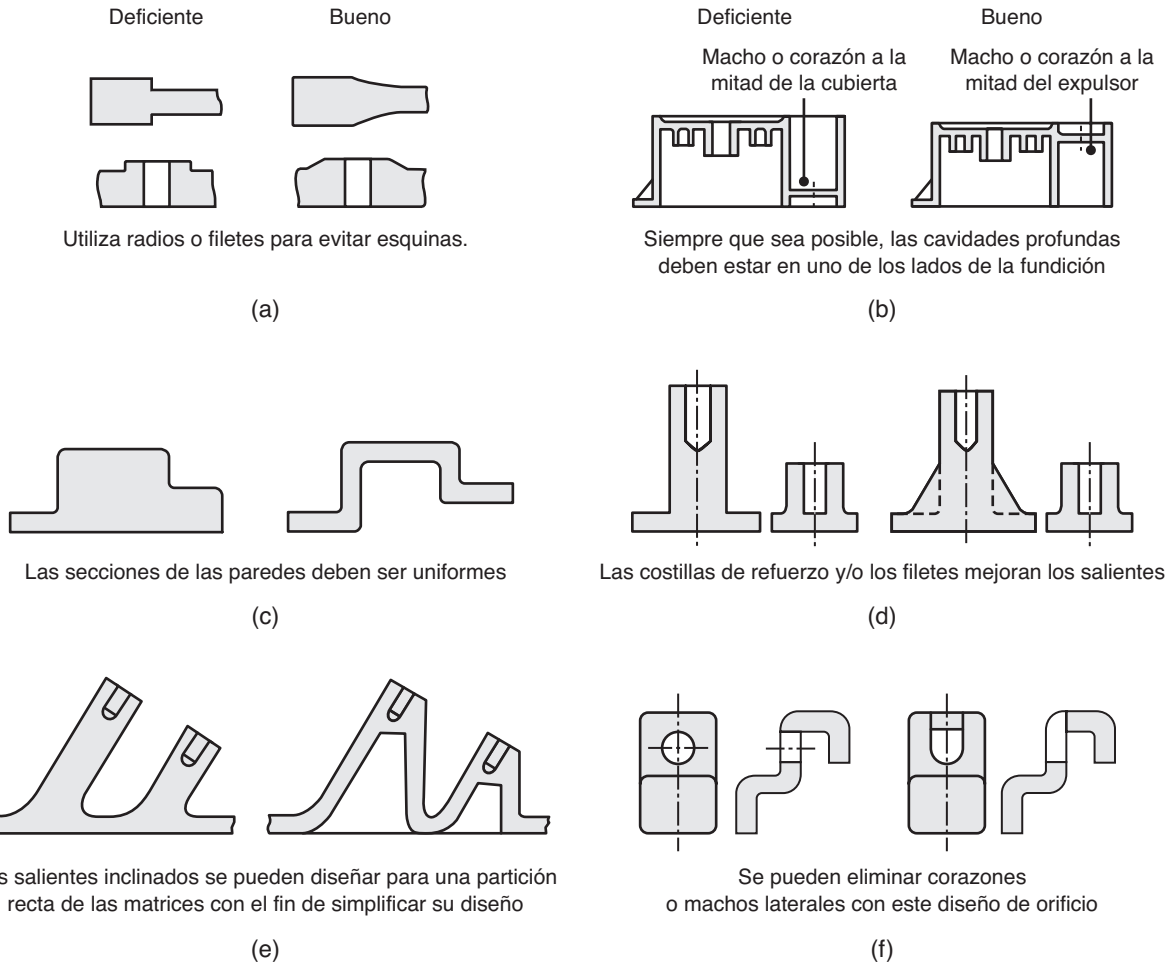


FIGURA 12.1 Modificaciones de diseño sugeridas para evitar defectos en las fundiciones. *Fuente:* Cortesía del American Die Casting Institute.

Los cambios de sección en las fundiciones deben suavizarse al pasar de una a otra. La ubicación del círculo más grande que puede inscribirse en una región particular es crítica por lo que se refiere a las cavidades por contracción (figs. 12.2a y b). Debido a que la velocidad de enfriamiento en regiones con círculo más grandes es menor, se les conoce como **puntos calientes**. Estas regiones pueden desarrollar **cavidades por contracción** y **porosidad** (figs. 12.2c y d). Las cavidades en los puntos calientes se pueden eliminar mediante corazones o machos pequeños. A pesar de que producen orificios en la fundición (fig. 12.2e), esto no afecta su resistencia de manera significativa. Es importante mantener (hasta donde sea posible) secciones transversales y espesores de pared uniformes a lo largo de toda la fundición, para evitar o minimizar las cavidades por contracción. Aunque aumentan el costo de producción, las camisas *metálicas* o los *enfriadores* en el molde pueden eliminar o minimizar los puntos calientes (ver fig. 10.14).

- **Áreas planas**. Hay que evitar las áreas planas grandes (superficies lisas), ya que pueden distorsionarse durante el enfriamiento por los gradientes de temperatura o desarrollar un acabado superficial deficiente debido a un flujo disparejo del metal durante el vaciado. Una de las técnicas comunes para resolver esto consiste en dividir las superficies planas con costillas de refuerzo y serraciones.

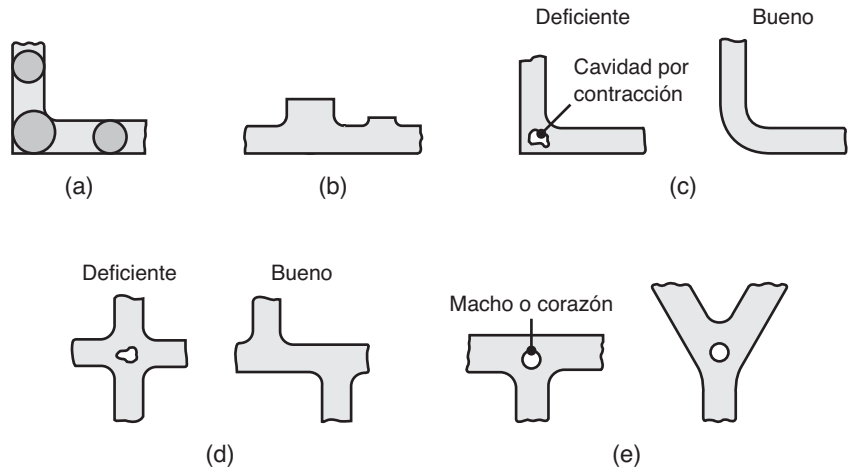


FIGURA 12.2 Ejemplos de diseños que muestran la importancia de mantener secciones transversales uniformes en las fundiciones para evitar puntos calientes y cavidades por contracción.

- **Contracción**. Para evitar el agrietamiento de la fundición durante el enfriamiento, debe haber tolerancias a la contracción durante la solidificación. En fundiciones con costillas de refuerzo que se cruzan, pueden reducirse los esfuerzos de tensión alternando las costillas o cambiando la geometría de la intersección. Las dimensiones del modelo también deben permitir la contracción del metal durante la solidificación y el enfriamiento. Las tolerancias a la contracción, conocidas como **tolerancias a la contracción de los fabricantes de modelos**, por lo general van de 10 a 20 mm/m (1/8 a 1/4 pulgada/pie). En la tabla 12.1 se presenta la tolerancia normal a la contracción para metales fundidos comúnmente en arena.
- **Ángulo de salida**. Por lo general, se da un pequeño ángulo de salida (conicidad) en los modelos para moldes de arena, que permita extraer el modelo sin dañar el molde (ver fig. 11.5). Los ángulos de salida suelen ir de 5 a 15 mm/m (1/16 a 3/16 pulgada/pie). Dependiendo de la calidad del modelo, es común que los ángulos de salida sean de 0.5° a 2°. Los ángulos en superficies internas son por lo general dos veces esta medida; tienen que ser mayores a los de las superficies exteriores porque la fundición se contrae hacia dentro, hacia el núcleo.
- **Tolerancias dimensionales**. Las tolerancias dimensionales dependen del proceso de fundición en particular, del tamaño de la fundición y del tipo de modelo utilizado. Deben ser lo más amplias que sea posible, dentro de los límites del buen desempe-

TABLA 12.1

Tolerancia normal a la contracción para algunos metales fundidos en moldes de arena

Metal	%
Hierro fundido gris	0.83–1.3
Hierro fundido blanco	2.1
Hierro fundido maleable	0.78–1.0
Aleaciones de aluminio	1.3
Aleaciones de magnesio	1.3
Latón amarillo	1.3–1.6
Bronce de fósforo	1.0–1.6
Bronce de aluminio	2.1
Acero de alto manganeso	2.6

ño de la parte; de lo contrario, el costo de la fundición aumenta. Por lo general, en la práctica comercial, las tolerancias se encuentran en el intervalo de ±0.8 mm (1/32 pulgadas) para pequeñas fundiciones y se incrementan con el tamaño de las fundiciones. Por ejemplo, las tolerancias para fundiciones grandes pueden ser hasta de ±6 mm (0.25 pulgadas).

- **Letreros y marcas.** Es una práctica común incluir alguna forma de identificación de partes (como letreros o logotipos corporativos) en las fundiciones. Esta característica se puede grabar bajo la superficie de fundición o puede sobresalir de la misma; lo más deseable dependerá del método de producción de los moldes. Por ejemplo, en la fundición en arena, una placa del modelo se produce maquinándola en una fresadora CNC y es más simple maquinar letras en la placa del modelo. En cambio, en la fundición de matrices es más simple maquinar letras dentro del molde.
- **Operaciones de acabado.** Al diseñar una fundición, es importante considerar las operaciones posteriores de maquinado y acabado que ocurren con frecuencia. Por ejemplo, si se va a perforar un orificio en una fundición, es mejor ubicarlo en una superficie plana que en una curva, para evitar que la perforación se desvíe. Un diseño aún mejor incorporaría una pequeña hendidura como punto de inicio para las operaciones de perforado. Las fundiciones deben incluir características que permitan sujetarlas fácilmente en las máquinas herramienta.

Selección del proceso de fundición. La selección del proceso de fundición no se puede separar del tema de la economía (ver la sección 12.4). Sin embargo, la tabla 11.1 indica algunas ventajas y limitaciones de dichos procesos que tienen algún impacto en el diseño de las fundiciones. A continuación se tratan las reglas específicas de diseño para operaciones con moldes desechables y permanentes.

Localización de la línea de partición. Las partes deben orientarse en los moldes de manera que la parte grande de la fundición esté relativamente abajo y se minimice su altura. La orientación de la parte también determina la distribución de la porosidad. Por ejemplo, en la fundición de aluminio, el hidrógeno es soluble en metal líquido, pero ya no lo es cuando el aluminio se solidifica (ver fig. 10.15). En consecuencia, durante la fundición del aluminio pueden formarse burbujas de hidrógeno que flotarán hacia arriba debido a su flotabilidad, de modo que habrá una mayor porosidad en las partes superiores de las fundiciones. Por lo tanto, las superficies críticas deben orientarse de manera que queden con la cara hacia abajo.

Entonces, una parte orientada de manera adecuada puede tener especificada la línea de partición. Ésta es la línea o plano que separa las mitades superior (molde superior) e inferior (molde inferior) de los moldes (ver fig. 11.4). En general, la línea de partición debe estar a lo largo de un plano recto y no de uno contorneado. Siempre que sea posible, dicha línea debe pasar por las esquinas o aristas de las fundiciones en lugar de hacerlo por las superficies planas a la mitad de la fundición, de manera que la *proyección* en la línea de partición (el material que se sale entre las dos mitades del molde) no sea visible. La localización de la línea es importante debido a que influye en el diseño del molde, la facilidad del moldeo, la cantidad y forma de los corazones o machos requeridos, el método de soporte y el sistema de compuertas.

La línea de partición debe colocarse lo más abajo posible (respecto de la fundición) para los metales menos densos (como las aleaciones de aluminio) y localizarse a casi la mitad de la altura para metales más densos (como los aceros). Sin embargo, no se debe permitir que el metal fluya verticalmente, en especial cuando no está restringido por un bebedero. La colocación de la línea tiene un gran efecto en el resto del diseño del molde. Por ejemplo, en la fundición en arena, es común que los canales de alimentación, las compuertas y el bebedero se coloquen en el molde inferior sobre la línea de partición. Además, la ubicación de dicha línea y la orientación de la parte determinan el número de machos o corazones requeridos y es preferible evitar el uso de éstos siempre que sea práctico.

Localización y diseño de compuertas. Las compuertas son las conexiones entre los canales de alimentación y la parte a fundir. Algunas de las consideraciones en el diseño de los sistemas de compuertas son:

- Con frecuencia son preferibles, y necesarias, varias compuertas para partes grandes. Este hecho ofrece las ventajas de permitir una temperatura de vaciado inferior y reducir los gradientes de temperatura en la fundición.
- Las compuertas deben alimentar las secciones gruesas de las fundiciones.
- Se debe utilizar un filete en las partes donde la compuerta topa con la fundición; esta característica produce menos turbulencia que las uniones abruptas.
- La compuerta más cercana al bebedero debe colocarse a suficiente distancia, de manera que pueda retirarse con facilidad. Esta distancia puede ser tan pequeña como unos cuantos milímetros para fundiciones pequeñas y hasta 500 mm para partes grandes.
- La longitud mínima de la compuerta debe ser de tres a cinco veces su diámetro, según el metal que se esté fundiendo. La sección transversal tiene que ser suficientemente grande para permitir el llenado de la cavidad del molde y más pequeña que la sección transversal del canal de alimentación.
- Se deben evitar las compuertas curvadas, pero cuando sean necesarias, se tiene que localizar una sección recta en la compuerta inmediatamente adyacente a la fundición.

Diseño del canal de alimentación. El canal de alimentación es una vía de distribución horizontal que acepta metal fundido del bebedero y lo conduce a las compuertas. En las partes simples se utiliza un canal, pero las fundiciones más complejas requieren sistemas de dos canales. Los canales de alimentación se utilizan para atrapar escoria (mezcla de óxido y metal que se forma en la superficie de los metales) y evitar que se introduzca en las compuertas y en la cavidad del molde. Es común colocar trampas para escoria al final de los canales; éstos se proyectan arriba de las compuertas para garantizar que el metal en las mismas se extraiga de la parte inferior de la superficie.

Diseño de otras características del molde. El objetivo principal al diseñar un *bebedero* (como se describe en la sección 10.3) es alcanzar las velocidades requeridas de flujo del metal al tiempo que se evita la aspiración o formación excesiva de escoria. Estas velocidades se determinan de manera que se evite la turbulencia, pero el molde se llena rápidamente en comparación con el tiempo requerido de solidificación. Se puede utilizar una *copa de vaciado* para asegurar que no se interrumpa el flujo del metal dentro del bebedero; además, si se mantiene el metal fundido en la copa durante el vaciado, entonces la escoria flota y no entra en la cavidad del molde. Se usan *filtros* para atrapar grandes contaminantes, disminuir la velocidad del metal y hacer que el flujo sea más laminar. Se pueden emplear *enfriadores* para acelerar la solidificación del metal en una región particular de una fundición.

Establecimiento de buenas prácticas. Mucho se ha observado que cierto diseño de molde puede producir partes tanto aceptables como defectuosas, y es poco común que produzca sólo partes adecuadas o sólo defectuosas. Para verificar fundiciones defectuosas, son necesarios procedimientos de control de calidad. A continuación se presentan algunos de los problemas comunes:

- Es fundamental empezar con un metal fundido de alta calidad para producir fundiciones superiores. Tanto la temperatura de vaciado como la química del metal, el arrastre de gas y el manejo de los procedimientos pueden afectar la calidad del metal que se vacía en un molde.
- No se debe interrumpir el vaciado del metal, ya que puede arrastrar escoria y producir turbulencia. La lúnula del metal fundido en la cavidad del molde debe experimentar un avance continuo, sin interrupciones y hacia arriba.

- Las diferentes velocidades de enfriamiento en el cuerpo de una fundición producen esfuerzos residuales, por lo que podría necesitarse el relevado de esfuerzos (sección 4.11) para evitar distorsiones de las fundiciones en aplicaciones críticas.

12.2.2 Diseño para la fundición de moldes desechables

Los procesos de moldes desechables tienen consideraciones específicas de diseño que, sobre todo, se atribuyen al material del molde, el tamaño de las partes y el método de fabricación. Es claro que una fundición en un proceso de molde desechable (como una fundición por revestimiento) tarda en enfriarse más que, digamos, en la fundición a presión en matriz, lo que tiene implicaciones importantes en la distribución de los moldes.

Algunas consideraciones importantes de diseño para fundición de moldes desechables son las siguientes:

Distribución del molde. Las características del molde deben colocarse de manera lógica y compacta, con varias compuertas según sea necesario. Uno de los objetivos más importantes en la distribución del molde es que la solidificación se inicie en un extremo del mismo y que avance en un frente uniforme a través de la fundición, solidificando las mazarotas al final. Tradicionalmente, esta distribución se ha basado en la experiencia, en las consideraciones del flujo del fluido y la transferencia de calor. En épocas más recientes se han creado programas comerciales para computadoras basados en algoritmos de diferencias finitas, que permiten la simulación del llenado del molde y la rápida evaluación de la distribución del mismo.

Diseño de las mazarotas. Un problema importante en el diseño de las fundiciones es el tamaño y la colocación de las mazarotas. Éstas son extremadamente útiles al afectar el avance del frente de solidificación a través de una fundición y son fundamentales en la distribución del molde que se indicó antes. Las mazarotas ciegas son características apropiadas de diseño y mantienen el calor por más tiempo que las abiertas. Las mazarotas se diseñan de acuerdo con seis reglas básicas:

1. La mazarota no debe solidificarse antes que la fundición. Por lo general, esto se logra evitando las mazarotas pequeñas y utilizando las cilíndricas con relaciones de aspecto pequeño (relaciones pequeñas de altura a sección transversal). Las mazarotas esféricas son las de forma más efectiva, pero es difícil trabajar con ellas.
2. El volumen de la mazarota debe ser lo suficientemente grande para que proporcione una cantidad suficiente de metal líquido y así compensar la contracción en la fundición.
3. Las uniones entre la fundición y el alimentador no deben desarrollar un punto caliente en el que se pueda producir porosidad por contracción.
4. Las mazarotas deben colocarse de manera que el metal líquido se pueda depositar en los lugares donde más se necesite.
5. Debe haber suficiente presión para conducir el metal líquido al interior de los lugares del molde donde se requiera. Por lo tanto, las mazarotas no son tan útiles para metales con densidad menor (como las aleaciones de aluminio) como lo son para aquéllos con densidad mayor (como el acero y el hierro fundido).
6. La presión potencial de la mazarota debe suprimir la formación de cavidades y estimular su llenado completo.

Tolerancias de maquinado. Debido a que la mayoría de las fundiciones de moldes desechables requieren ciertas operaciones adicionales de acabado, como maquinado y rectificación, deben considerarse tolerancias para estas operaciones en el diseño de las fundiciones. Estas tolerancias, que se incluyen en las dimensiones de los modelos, dependen del tipo de fundición y aumentan con el tamaño y espesor de la sección de las fundiciones. Por lo general, van de entre 2 y 5 mm (0.1 a 0.2 pulgada) para fundiciones pequeñas, a más de 25 mm (1 pulgada) para fundiciones grandes.

12.2.3 Diseño para fundición en moldes permanentes

En el ejemplo 12.1 se tratan lineamientos y ejemplos típicos de diseño para fundición en moldes permanentes. En el diseño de herramentales para fundición a presión hay factores especiales por considerar. No obstante que los diseños pueden modificarse con el fin de eliminar el ángulo de extracción para una mejor exactitud dimensional, por lo general se requiere un ángulo de 1/2° o incluso 1/4°; de lo contrario, se pueden producir escoriaciones (por amarrado local o por adhesión del material) entre la parte y las matrices y provocar distorsión.

Las partes fundidas a presión adquieren una forma cercana a la neta, requiriendo sólo la remoción de las compuertas y un mecanizado menor para eliminar rebabas y otros defectos menores. El acabado superficial y la exactitud dimensional de las partes fundidas a presión son muy buenas (ver tabla 11.2) y, en general, no necesitan tolerancia para maquinado.

EJEMPLO 12.1 Ilustraciones de diseños de fundición deficientes y adecuados

En la figura 12.3 se muestran varios ejemplos de diseños deficientes y adecuados para fundiciones en moldes permanentes y a presión. A continuación se describen las diferencias significativas en el diseño para cada ejemplo.

a. La parte inferior del diseño de la izquierda tiene una pared delgada sin un papel funcional aparente, por lo que este punto puede fracturarse si se somete a fuerzas elevadas o a impacto. El diseño adecuado elimina este problema y puede simplificar la fabricación de matrices y moldes.

b. Las superficies planas grandes siempre presentan dificultades al fundir metales (y materiales no metálicos), ya que tienden a combarse y a desarrollar superficies disparejas. Una práctica común para evitar esta situación consiste en dividir la superficie con costillas y serraciones del lado opuesto de la fundición. Este método reduce en gran medida la distorsión sin afectar la apariencia ni la función de la superficie plana.

c. Este ejemplo de diseños deficiente y adecuado es importante no sólo para fundiciones, sino también para partes que se maquinan o rectifican. Es difícil producir radios internos o esquinas agudas que pudieran requerirse para efectos funcionales, como los insertos que se diseñan a fin de llegar al fondo de la cavidad de la parte. Además, en el caso de cavidades lubricadas, el lubricante se puede acumular en el fondo y, al ser incompresible, evita la inserción total de una parte en la cavidad. La colocación de un radio pequeño en las esquinas o en la periferia del fondo de la parte elimina este problema.

d. La función de dicha parte puede ser, por ejemplo, la de una perilla que se sujeta y se gira; y de ahí, las características exteriores a lo largo de su periferia. Obsérvese en el diseño de la izquierda que la periferia interior de la perilla también presenta características que no son funcionales, pero que ayudan a ahorrar material. La matriz de fundición para un diseño adecuado es más fácil de fabricar.

e. Obsérvese que el diseño deficiente tiene filetes agudos en la base de las ranuras longitudinales, por lo que la matriz posee protuberancias filosas (filo de cuchillo). Debido a su filo, es posible que, con el uso prolongado de la matriz, estos bordes se astillen.

f. El diseño deficiente de la izquierda tiene roscas que alcanzan la cara derecha de la fundición, por lo cual es posible que durante la fundición parte del metal fundido penetre en esta región, formando una rebaba e interfiriendo en la función del inserto roscado, como cuando se utiliza una tuerca. El diseño adecuado usa un desplazamiento en la barra roscada para eliminar este problema. La consideración de este diseño también se aplica al moldeo por inyección de los plásticos, ejemplo que se muestra en la figura 19.9.

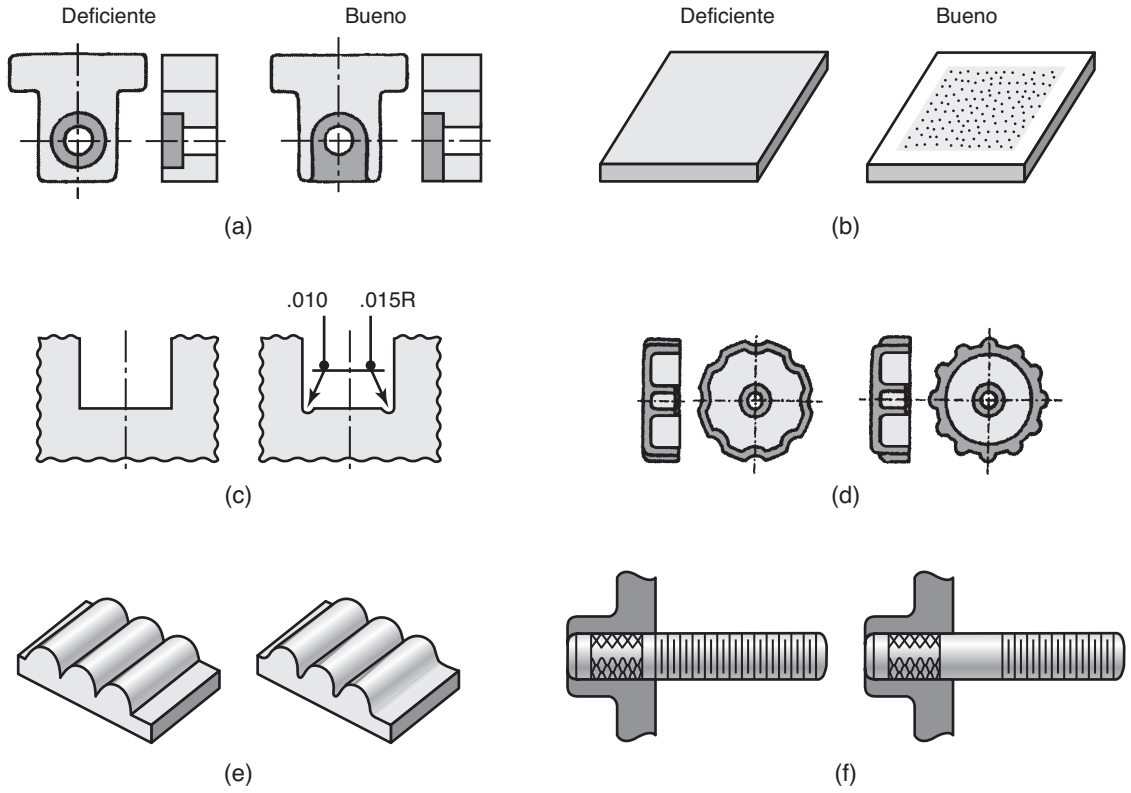


FIGURA 12.3 Ejemplos de diseños indeseables (deficientes) y deseables (buenos) de fundición. *Fuente:* Cortesía del American Die Casting Institute.

12.2.4 Modelado por computadora de procesos de fundición

Debido a que la fundición involucra acciones complejas entre variables del material y del proceso, es fundamental elaborar un estudio cuantitativo de estas interacciones para diseñar de manera apropiada las fundiciones y producir fundiciones de alta calidad. A pesar de que en el pasado estos estudios enfrentaban grandes dificultades, los rápidos avances en la computación y las técnicas de modelado han conducido a innovaciones importantes en el modelado de algunos aspectos de la fundición (como el flujo del fluido, la transferencia de calor y las microestructuras desarrolladas durante la solidificación) conforme a varias condiciones de dicho proceso.

El modelado del *flujo del fluido en el molde* se basa en las ecuaciones de Bernoulli y de continuidad (sección 10.3). Predice el comportamiento del metal durante el vaciado en el sistema de alimentación y su avance en la cavidad del molde, así como las distribuciones de velocidad y presión en el sistema. También se han logrado avances en el modelado de la *transferencia de calor* en la fundición. El software moderno puede reunir el flujo del fluido, la transferencia de calor y los efectos de las condiciones de la superficie, las propiedades térmicas de los materiales involucrados y la convección natural y forzada durante el enfriamiento. Obsérvese que las condiciones de la superficie varían durante la solidificación, conforme se desarrolla una capa de aire entre la fundición y la pared del molde debido a la contracción. Se han efectuado estudios similares sobre el modelado del desarrollo de *microestructuras* en la fundición. Estos estudios abarcan el flujo de calor, los gradientes de temperatura, la nucleación y el desarrollo de cristales, la formación de estructuras dendríticas y equiaxiales, el choque recíproco de los granos y el movimiento de la interfaz líquido-sólido durante la solidificación.

Por ejemplo, hoy en día dichos modelos tienen la capacidad de predecir el ancho de la zona pastosa (ver fig. 10.4) durante la solidificación y el tamaño del grano en las fundiciones. De manera similar, la capacidad de calcular isotermas (líneas con la misma temperatura) proporciona una introspección de los posibles puntos calientes y el desarrollo posterior de cavidades por contracción. Con la disponibilidad de software amigable para el usuario y los avances en el diseño y la fabricación asistidos por computadora, las técnicas de modelado se han vuelto más fáciles de implantar. Los beneficios son el aumento de la productividad, el mejoramiento de la calidad, mayor facilidad de planeación y estimación de costos, así como una respuesta más rápida para los cambios de diseño. En la actualidad existen diversos programas de software comercial para procesos de modelado para fundición, como Magmasoft, ProCast, Solidia y AFSsolid.

12.3 Aleaciones para fundición

En los capítulos 5 y 6 se describieron las propiedades y aplicaciones generales de los metales y aleaciones ferrosas y no ferrosas, respectivamente. En esta sección se describen las propiedades y aplicaciones de los metales y las aleaciones para fundición; sus propiedades y características de fundición y fabricación se resumen en la figura 12.4 y en las tablas 12.2 a 12.5. Además de dichas características, algunas consideraciones importantes en las aleaciones para fundición son su maquinabilidad y soldabilidad, ya que por lo general se ensamblan con otros componentes para producir la parte entera.

La aleación para fundición más utilizada (en tonelaje) es el hierro gris, seguido del hierro dúctil, aluminio, zinc, plomo, cobre, hierro maleable y magnesio. Los embarques de fundiciones en Estados Unidos son de casi 13 millones de toneladas por año.

12.3.1 Aleaciones no ferrosas para fundición

A continuación se describen las aleaciones no ferrosas comunes para fundición:

Aleaciones con base de aluminio. Las aleaciones con base de aluminio tienen una amplia gama de propiedades mecánicas, principalmente debido a varios mecanismos de endurecimiento y tratamientos térmicos que se pueden utilizar en ellas (sección 4.9). Estas aleaciones ofrecen alta conductividad eléctrica y, por lo general, buena resistencia a la corrosión atmosférica. Sin embargo, su resistencia a algunos ácidos y a todos los álcalis es deficiente y se debe tener cuidado para evitar la corrosión galvánica. No son tóxicas, su peso es ligero y tienen maquinabilidad adecuada. Excepto las aleaciones con silicio, suelen mostrar baja resistencia al desgaste y a la abrasión. Las aleaciones con base de aluminio tienen diversas aplicaciones, incluyendo los usos arquitectónico y decorativo. Una tendencia creciente es su empleo en automóviles, para componentes como monobloques de motores, cabezas de cilindros, múltiples de admisión, cajas de transmisión, componentes de suspensión, ruedas y frenos. A las partes hechas de aleaciones con base de aluminio y base de magnesio se les conoce como fundiciones de **metal ligero**.

Aleaciones con base de magnesio. La densidad más baja de todas las aleaciones para fundiciones comerciales se encuentra en el grupo con base de magnesio. Tienen buena resistencia a la corrosión y resistencia moderada, según el tratamiento térmico específico utilizado. Se aplican en ruedas automotrices, cubiertas y monobloques de motores enfriados por aire.

Aleaciones con base de cobre. Aunque son costosas, las aleaciones con base de cobre tienen buena conductividad eléctrica y térmica, resistencia a la corrosión y nula toxicidad, así como propiedades de desgaste adecuadas para materiales de soporte. Existe una gran variedad de aleaciones con base de cobre, incluyendo latones y bronces de aluminio, de fósforo y de estaño.

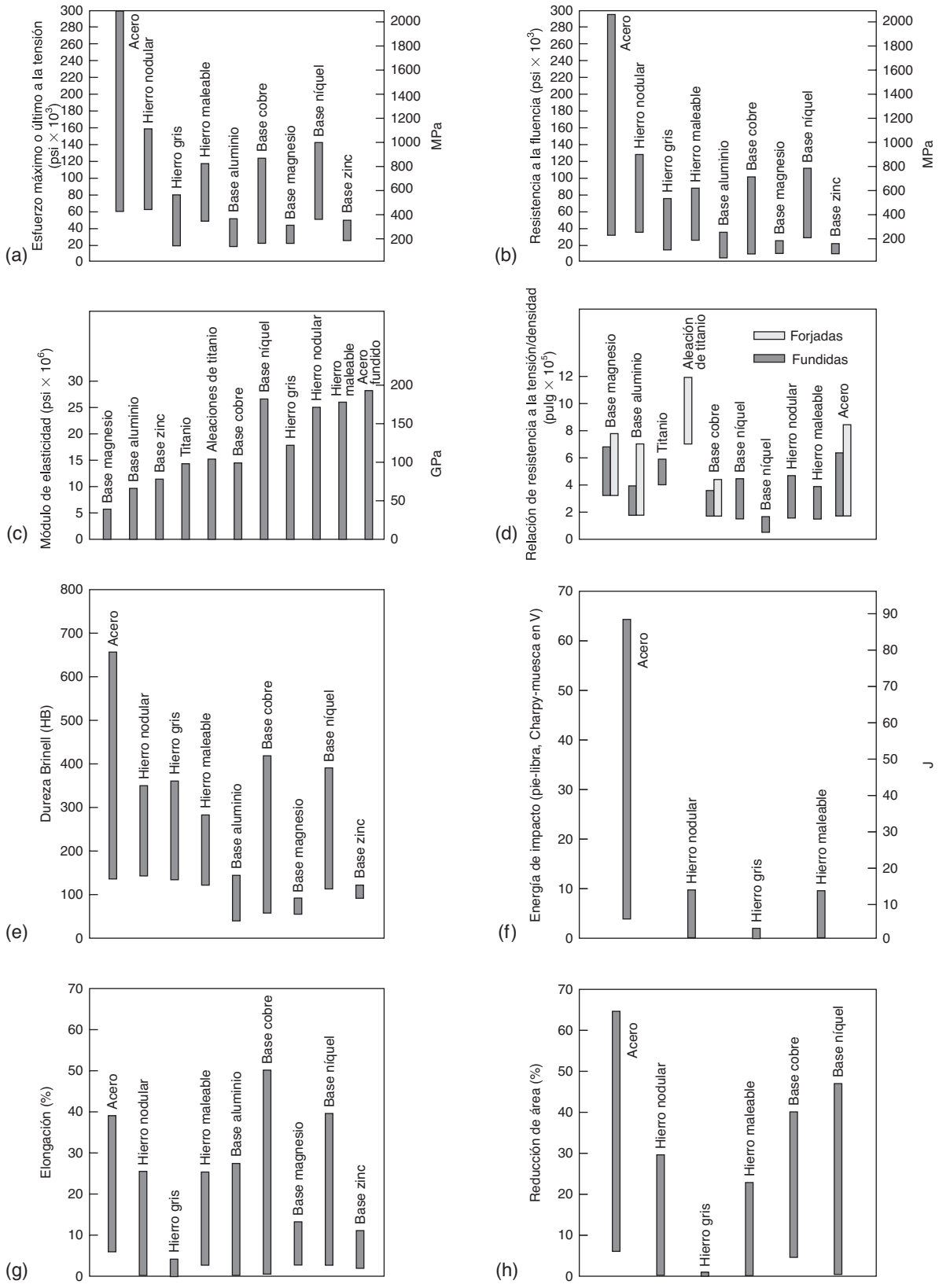


FIGURA 12.4 Propiedades mecánicas para diferentes grupos de aleaciones fundidas. Obsérvese que incluso dentro del mismo grupo las propiedades varían en una amplia gama, en especial para los aceros fundidos. *Fuente:* Cortesía de Steel Founder's Society of America.

TABLA 12.2

Aplicaciones comunes de las fundiciones y características de fundición

Tipo de aleación	Aplicaciones comunes	Capacidad de fundición*	Soldabilidad*	Maquinabilidad*
Aluminio	Pistones, cajas de embragues, múltiples de admisión	E	R	A–E
Cobre	Bombas, válvulas, engranes, propulsores marinos	R–A	R	R–A
Hierro dúctil	Cigüeñales, engranes de uso pesado	A	D	A
Hierro gris	Monobloques de motores, engranes, discos y tambores de frenos, bastidores de máquinas	E	D	A
Magnesio	Cárter de cigüeñales, cajas de transmisión	A–E	A	E
Hierro maleable	Maquinaria agrícola y de construcción, rodamientos de uso pesado, material rodante para ferrocarriles	A	D	A
Níquel	Álabes para turbinas de gas, componentes de bombas y válvulas para plantas químicas	R	R	R
Acero (al carbono y de baja aleación)	Bloques de matrices, piezas brutas de engranes de uso pesado, elementos de trenes de aterrizaje de aviones, ruedas de ferrocarril	R	E	R
Acero (de alta aleación)	Cajas de turbinas de gas, componentes de bombas y válvulas, mandíbulas de trituradoras de piedra	R	E	R
Hierro blanco	Molinos, boquillas para granallado, zapatas de freno de ferrocarril, trituradoras y pulverizadoras	A	MD	MD
Zinc	Manijas de puertas, parrillas de radiadores	E	D	E

*E = Excelente; A = adecuado; R = regular; MD = muy deficiente; D = difícil

TABLA 12.3

Propiedades y aplicaciones comunes de los hierros fundidos

Hierro fundido	Tipo	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Aplicaciones típicas
Gris	Ferrítico	170	140	0.4	Tubería, drenaje sanitario
	Perlítico	275	240	0.4	Monobloques para motores, máquinas herramienta
	Martensítico	550	550	0	Superficies de desgaste
Dúctil (Nodular)	Ferrítico	415	275	18	Tubería, servicio general
	Perlítico	550	380	6	Cigüeñales, partes sujetas a fuertes tensiones
	Martensita revenida	825	620	2	Partes de máquinas con alta resistencia, partes resistentes a desgaste
Maleable	Ferrítico	365	240	18	Herrajes, accesorios de tubería, servicio general de ingeniería
	Perlítico	450	310	10	Equipo ferroviario, acoplamientos
	Martensita revenida	700	550	2	Equipo ferroviario, engranes, bielas
Blanco	Perlítico	275	275	0	Partes resistentes al desgaste, rodillos para laminado

TABLA 12.4

Propiedades mecánicas de los hierros fundidos grises

Clase ASTM	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la compresión (MPa)	Módulo elástico (GPa)	Dureza (HB)
20	152	572	66–97	156
25	179	669	79–102	174
30	214	752	90–113	210
35	252	855	100–119	212
40	293	965	110–138	235
50	362	1130	130–157	262
60	431	1293	141–162	302

TABLA 12.5

Propiedades y aplicaciones comunes de las aleaciones no ferrosas fundidas

Aleaciones (UNS)	Condición	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Aplicaciones comunes
Aleaciones de aluminio					
195 (AO1950)	Con tratamiento térmico	220–280	110–220	8.5–2	Fundiciones en arena
319 (AO3190)	Con tratamiento térmico	185–250	125–180	2–1.5	Fundiciones en arena
356 (AO3560)	Con tratamiento térmico	260	185	5	Fundiciones en molde permanente
Aleaciones de cobre					
Latón rojo (C83600)	Recocido	235	115	25	Accesorios de tubería, engranes
Latón amarillo (C86400)	Recocido	275	95	25	Herrajes, ornamental
Bronce de manganeso (C86100)	Recocido	480	195	30	Cubos de propulsores, álabes
Bronce de estaño plomado (C92500)	Recocido	260	105	35	Engranes, rodamientos, válvulas
Bronce de cañón (C90500)	Recocido	275	105	30	Partes para bombas, accesorios
Plata níquel (C97600)	Recocido	275	175	15	Partes marinas, válvulas
Aleaciones de magnesio					
AZ91A	F	230	150	3	Fundiciones a presión
AZ63A	T4	275	95	12	Fundiciones en arena y en molde permanente
AZ91C	T6	275	130	5	Partes de alta resistencia
EZ33A	T5	160	110	3	Partes de temperatura elevada
HK31A	T6	210	105	8	Partes de temperatura elevada
QE22A	T6	275	205	4	Partes de máxima resistencia

Aleaciones con base de zinc. Las aleaciones con base de zinc son un grupo de aleaciones con bajo punto de fusión que tienen excelente resistencia a la corrosión, buena fluidez y suficiente resistencia para aplicaciones estructurales. Por lo común se utilizan en la fundición a presión, sobre todo para partes con paredes delgadas y formas intrincadas.

Aleaciones con base de estaño. Aunque de baja resistencia, estas aleaciones tienen buena resistencia a la corrosión y, por lo general, se utilizan para superficies de cojinetes.

Aleaciones con base de plomo. Estas aleaciones tienen aplicaciones similares a las de las aleaciones con base de estaño, pero la toxicidad del plomo es una desventaja que impide su mayor aplicación.

Aleaciones de alta temperatura. Las aleaciones de alta temperatura tienen una amplia gama de propiedades y por lo general requieren temperaturas de hasta 1650 °C (3000 °F) para fundir titanio y superaleaciones, y más elevadas en el caso de aleaciones refractarias (Mo, Nb, W y Ta). Se utilizan técnicas especiales para fundir estas aleaciones para boquillas y varios componentes de motores de reacción y cohetes. Algunas de estas aleaciones son más adecuadas y económicas para fundición que para formado mediante otros métodos de fabricación, como el forjado.

12.3.2 Aleaciones ferrosas para fundiciones

Las aleaciones ferrosas fundidas más comunes son las siguientes:

Hierros fundidos. Los hierros fundidos son los metales fundidos más numerosos y se pueden fundir con facilidad en formas intrincadas. Por lo general poseen diversas propiedades deseables, como resistencia al desgaste, dureza y buena maquinabilidad. El término *hierro fundido* se refiere a una familia de aleaciones y, como se describe en la sección 4.6, se clasifican en hierros fundidos gris, dúctil (nodular o esferoidal), blanco, maleable y de grafito compactado. En las tablas 12.3 y 12.4 se describen sus propiedades generales y aplicaciones comunes.

a. **Hierro fundido gris**. Las fundiciones de hierro fundido gris tienen relativamente pocas cavidades por contracción y poca porosidad. Diferentes formas de esta aleación son el *ferrítico, el perlítico* y el *martensítico*. Debido a las diferencias en sus estructuras, cada tipo tiene distintas propiedades. En la tabla 12.4 se proporcionan las propiedades mecánicas de diversas clases de hierro fundido gris. Se utilizan comúnmente en los monobloques de motores, alojamientos de motores eléctricos, tubos y superficies de desgaste para máquinas. Además, su capacidad de amortiguamiento lo ha convertido en un material común para bancadas de máquinas herramienta. Los hierros fundidos grises se especifican mediante una designación de ASTM de dos dígitos. Por ejemplo, la clase 20 indica que el material debe tener una resistencia mínima a la tensión de 20 ksi (140 MPa).
b. **Hierro dúctil (nodular).** Generalmente utilizados para partes de máquinas, carcasas, engranes, tubos, rodillos para laminadores y cigüeñales de automóviles, los hierros dúctiles se especifican mediante un conjunto de números de dos dígitos. Por ejemplo, la clase o grado 80-55-06 indica que el material tiene una resistencia mínima a la tensión de 80 ksi (550 MPa), una resistencia mínima a la fluencia de 55 ksi (380 MPa) y 6% de elongación en 2 pulgadas (50 mm).
c. **Hierro fundido blanco.** Debido a su extrema dureza y resistencia al desgaste, el hierro fundido blanco se utiliza principalmente en rodillos para laminadores, zapatas para frenos de carros de ferrocarril y revestimientos en maquinaria para procesar materiales abrasivos.
d. **Hierro maleable.** El hierro maleable se usa principalmente en equipo ferroviario y varios tipos de herrajes, accesorios y componentes para aplicaciones eléctricas. Los hierros maleables se especifican mediante una designación de cinco dígitos. Por ejemplo, 35018 indica que la resistencia a la fluencia del material es de 35 ksi (240 MPa) y su elongación es de 18% en 2 pulgadas.
e. **Hierro de grafito compactado.** Producido comercialmente por primera vez en 1976, el hierro de grafito compactado (CGI) tiene propiedades que se encuentran entre las de los hierros grises y dúctiles: los primeros tienen buen amortiguamiento y conductividad térmica, aunque baja ductilidad, en tanto que los segundos poseen amortiguamiento y conductividad térmica deficientes, pero alta resistencia a la tensión y resistencia a la fatiga. El hierro de grafito compactado ofrece amortiguamiento y propiedades térmicas similares a las del hierro gris, y resistencia y rigidez comparables a las del hierro dúctil. Debido a su resistencia, las partes hechas de

CGI pueden ser más pequeñas y, por lo tanto, más ligeras. Es fácil de fundir, tiene propiedades consistentes durante la fundición y su maquinabilidad es mejor que la del hierro dúctil (lo que es importante, ya que se utiliza en monobloques de motores automovilísticos y cabezas de cilindros). Se están desarrollando nuevas técnicas de fundición para mejorar la maquinabilidad del CGI.

Aceros fundidos. Debido a las altas temperaturas necesarias para fundir aceros (hasta de 1650 °C, 3000 °F), este proceso requiere experiencia considerable. Las altas temperaturas implican dificultades en la selección de los materiales para los moldes, en particular por la alta reactividad de los aceros con el oxígeno durante la fundición y el vaciado del metal. Las fundiciones de acero poseen propiedades que son más uniformes (isotrópicas) que las fabricadas mediante procesos de trabajo mecánico (parte III). Los aceros fundidos se pueden soldar; sin embargo, la soldadura altera la microestructura de la fundición en la zona afectada por el calor (ver fig. 30.17), afectando de esta manera la resistencia, ductilidad y tenacidad del metal base. Es necesario realizar un tratamiento térmico posterior a fin de restaurar las propiedades mecánicas de la fundición. Las piezas fundidas soldadas han ganado importancia en el ensamble de máquinas y estructuras grandes, cuyas configuraciones complejas o el tamaño de la fundición pueden hacer que la fundición de la parte para una sola ubicación no sea económica. Los aceros fundidos tienen importantes aplicaciones en equipo para vías férreas, minería, plantas químicas, campos petroleros y construcción pesada.

Aceros inoxidables fundidos. La fundición de aceros inoxidables involucra consideraciones similares a las de los aceros. Por lo general, tienen intervalos de solidificación largos y altas temperaturas de fusión. Pueden desarrollar diversas estructuras, según su composición y los parámetros de su procesamiento. Existen aceros inoxidables fundidos con diversas composiciones que se pueden tratar térmicamente y soldar. Estos productos poseen alta resistencia al calor y a la corrosión, en especial en las industrias química y alimentaria. Las aleaciones con base de níquel para fundición se utilizan en ambientes severamente corrosivos y para servicio de alta temperatura.

12.4 Economía de la fundición

Como en todos los procesos de fabricación, el costo de cada parte fundida (**costo unitario**) depende de diversos factores, incluyendo materiales, equipo y mano de obra. Al revisar los diversos procesos de fundición en el capítulo 11, se puede observar que unos requieren más mano de obra que otros; algunos necesitan costosas matrices y maquinaria, en tanto que otros requieren una gran cantidad de tiempo para producir las fundicio-

TABLA 12.6

Características generales de los costos de los procesos de fundición

Proceso de fundición	Costo*			Capacidad de producción (piezas/hora)
	Matriz	Equipo	Mano de obra	
En arena	B	B	B–M	<20
Molde en cáscara	B–M	M–A	B–M	<50
Yeso	B–M	M	M–A	<10
Por revestimiento	M–A	B–M	A	<1000
En molde permanente	M	M	B–M	<60
A presión en matriz	A	A	B–M	<200
Centrífuga	M	A	B–M	<50

*B = bajo; M = medio; A = alto.

nes (tabla 12.6). Cada uno de estos factores individuales afecta (en grados variables) el costo general de una operación de fundición. Como se describe con mayores detalles en la sección 40.7, el costo de un producto incluye los costos de materiales, mano de obra, herramental y equipo. La preparación para la fundición de un artículo incluye la producción de moldes y matrices que requieren materias primas, tiempo y esfuerzo, todo lo cual también afecta el costo de los productos.

Como se puede observar en la tabla 12.6, los moldes para fundición en arena implican un costo relativamente pequeño. En cambio, los moldes para diversos procesos y las matrices para fundición a presión requieren materiales costosos y mucha preparación. También existen costos importantes implícitos en la elaboración de modelos para fundición, aunque (como se señala en la sección 11.2.1) hay un gran avance en el uso de técnicas de elaboración rápida de prototipos para reducir costos y tiempo.

La fusión y el vaciado del metal fundido en moldes, así como el tratamiento térmico, la limpieza y la inspección de las fundiciones, también implican costos. El tratamiento térmico es una parte importante de la producción de muchos grupos de aleaciones (en especial de las fundiciones ferrosas) y puede ser necesario para producir propiedades mecánicas mejoradas. Sin embargo, también introduce otro conjunto de problemas de producción (como la formación de escamas en las superficies de fundición y alabeo de la parte) que pueden ser importantes en los costos. La mano de obra y las habilidades requeridas para estas operaciones pueden variar de modo considerable, dependiendo del proceso particular y el nivel de automatización en el taller de fundición. Por ejemplo, la fundición por revestimiento exige mucha mano de obra debido a los diversos pasos involucrados en la operación, aunque es posible cierta automatización, como el uso de robots (fig. 12.5). En cambio, operaciones como los procesos altamente automatizados de fundición a presión en matriz pueden mantener altas tasas de producción con poca mano de obra.



FIGURA 12.5 Un robot genera una cáscara de cerámica en modelos (árboles) de cera para fundición por revestimiento. El robot se programa para sumergir los árboles y después colocarlos en un sistema de secado automatizado. Con muchas capas, se forma una cáscara gruesa de cerámica apropiada para la fundición por revestimiento. *Fuente*: Cortesía de Wisconsin Precision Casting Corporation.

También debe hacerse notar que el costo por cada fundición disminuye conforme aumenta el número de partes fundidas. Por lo tanto, el sostenimiento de altas tasas de producción puede justificar el alto costo de matrices y maquinaria. Sin embargo, si la demanda es relativamente pequeña, el costo por cada fundición aumenta con rapidez. Así que se vuelve más económico fabricar las partes mediante fundición en arena u otros procesos de fundición que se describen en este capítulo, o mediante otros procesos de fabricación que se describen en las partes III y IV.

RESUMEN

- Se han establecido lineamientos generales para ayudar a los diseñadores a producir fundiciones sin defectos y cumplir con las tolerancias dimensionales, los requisitos de servicio y diversas especificaciones y estándares. Estos principios tienen que ver con la forma de la fundición y con diversas técnicas para minimizar los puntos calientes que pueden causar cavidades por contracción. Debido al gran número de variables involucradas, es fundamental el control riguroso de todos los parámetros, en particular de los relacionados con la naturaleza del flujo del metal líquido al interior de los moldes y matrices y con la velocidad de enfriamiento en diferentes regiones del molde.
- Existen diversas aleaciones ferrosas y no ferrosas para fundición con una amplia gama de propiedades, características de fundición y aplicaciones. Puesto que muchas fundiciones se diseñan y producen para ensamblarse con otros componentes y estructuras mecánicas (subensambles), también son importantes muchas otras consideraciones (como la soldabilidad, maquinabilidad y características superficiales).
- Entre los límites del buen rendimiento, los aspectos económicos de la fundición son tan importantes como las consideraciones técnicas. Los factores que afectan el costo general son el costo de materiales, moldes, matrices, equipo y mano de obra, cada uno de los cuales varía con las operaciones específicas. Un parámetro importante es el costo por cada fundición, que puede justificar grandes gastos para grandes lotes de producción utilizando maquinaria automatizada y controles por computadora.

TÉRMINOS CLAVE

Cavidades por contracción
Costo unitario
Hierro de grafito compactado
Hierro fundido
Línea de partición
Molde inferior
Porosidad
Principios de diseño
Puntos calientes
Tolerancia a la contracción de los fabricantes de modelos
Tolerancia de maquinado

BIBLIOGRAFÍA

Abrasion-Resistant Cast Iron Handbook, American Foundry Society, 2000.

Alexiades, V., *Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes*, Hemisphere, 1993.

Allsop, D. F. y Kennedy, D., *Pressure Die Casting-Part II: The Technology of the Casting and the Die*, Pergamon, 1983.

An Introduction to Die Casting, American Die Casting Institute, 1981.

Analysis of Casting Defects, American Foundrymen's Society, 1974.

ASM Handbook, Vol. 15: *Casting*, ASM International, 1988.

ASM Specialty Handbook: *Cast Irons*, ASM International, 1996.

Bradley, E. F., *High-Performance Castings: A Technical Guide*, Edison Welding Institute, 1989.

Campbell, J., *Castings*, 2a. ed., Butterworth-Heinemann, 2003.

Casting Defects Handbook, American Foundrymen's Society, 1972.

Clegg, A. J., *Precision Casting Processes*, Pergamon, 1991.

Davis, J. R. (ed.), *Cast Irons*, ASM International, 1996.

Elliott, R., *Cast Iron Technology*, Butterworth, 1988.

Heine, R. W., Loper, C. R., Jr. y Rosenthal, C., *Principles of Metal Casting*, 2a. ed., McGraw-Hill, 1967.

Investment Casting Handbook, Investment Casting Institute, 1997.

Johns, R., *Casting Design*, American Foundrymen's Society, 1987.
Karlsson, L. (ed.), *Modeling in Welding. Hot Powder Forming and Casting*, ASM International, 1997.
Kaye, A. y Street, A. C., *Die Casting Metallurgy*, Butterworth, 1982.
Krauss, G., *Steels: Heat Treatment and Processing Principles*, ASM International, 1990.
Kurz, W. y Fisher, D. J., *Fundamentals of Solidification*, Trans Tech Pub., 1994.
Liebermann, H. H. (ed.), *Rapidly Solidified Alloys*, Marcel Dekker, 1993.
The Metallurgy of Die Castings, Society of Die Casting Engineers, 1986.
Powell, G. W., Cheng, S.-H. y Mobley, C. E., Jr., *A Fractography Atlas of Casting Alloys*, Battelle Press, 1992.
Rowley, M. T. (ed.), *International Atlas of Casting Defects*, American Foundrymen's Society, 1974.
Steel Castings Handbook, 6a. ed., ASM International, 1995.
Walton, C. F. y Opar, T. J. (eds.), *Iron Castings Handbook*, 3a. ed., Iron Castings Society, 1981.

PREGUNTAS DE REPASO

12.1 Describa las consideraciones generales de diseño en la fundición de metales.
12.2 ¿Qué son los puntos calientes? ¿Cuál es su significado en la fundición de metales?
12.3 ¿Qué es la tolerancia por contracción? ¿Qué es la tolerancia de maquinado?
12.4 ¿Son necesarios los ángulos de salida en todos los moldes?
12.5 ¿Cuáles son las fundiciones de metal ligero? ¿Dónde se utilizan generalmente?
12.6 Nombre los tipos de hierros fundidos disponibles y liste sus principales características y aplicaciones.
12.7 ¿Por qué los aceros son más difíciles de fundir que los hierros fundidos? ¿Cuál es la consecuencia de esto?
12.8 Describa los factores importantes involucrados en la economía de las operaciones de fundición.
12.9 ¿Cuál es la diferencia entre un canal de alimentación y una compuerta?
12.10 ¿Cuál es la diferencia entre la tolerancia de maquinado y la tolerancia dimensional?
12.11 Liste las reglas para localizar líneas de partición en fundición.

PROBLEMAS CUALITATIVOS

12.12 Describa el procedimiento que seguiría para determinar si un defecto en una fundición es una cavidad por contracción o una porosidad provocada por gases.

12.13 Explique cómo haría para evitar el desgarramiento por calor.

12.14 Describa su observación respecto de los cambios de diseño mostrados en la figura 12.1.

12.15 Si sólo necesita unas cuantas fundiciones del mismo diseño, ¿cuál de los tres procesos sería el más costoso por fundición de pieza?

12.16 En lo general, ¿está de acuerdo con los valores de los costos de la tabla 12.6? Si es así, ¿por qué?

12.17 Agregue más ejemplos a los mostrados en la figura 12.2.
12.18 Explique de qué manera son útiles las costillas y serraciones en la fundición de superficies planas que de lo contrario se podrían distorsionar. Proporcione una ilustración específica.

12.19 Describa la naturaleza de los cambios de diseño realizados en la figura 12.3. ¿Qué principios generales observa en esta ilustración?

12.20 En la figura 12.4, observe que la ductilidad de algunas aleaciones para fundición es muy baja. ¿Cree que esto debe ser una preocupación importante en aplicaciones de ingeniería de fundiciones? Explique su respuesta.

12.21 ¿Cree que habrá menos defectos en una fundición realizada mediante vaciado por gravedad que en una efectuada por vaciado a presión? Explique su respuesta.

12.22 Explique la diferencia en la importancia de los ángulos de salida en la fundición en arena verde respecto de la fundición en molde permanente.
12.23 ¿Qué tipo de hierro fundido sería apropiado para bastidor de máquinas pesadas, como imprentas y máquinas herramientas? ¿Por qué?
12.24 Explique las ventajas y limitaciones de los filetes agudos y redondeados, respectivamente, en el diseño de una fundición.
12.25 Explique por qué varía tanto el módulo elástico (E) del hierro fundido gris, como se muestra en la tabla 12.4.
12.26 ¿Por qué las mazarotas no son tan útiles en la fundición a presión en matriz como en la fundición en arena?

12.27 Describa las desventajas de tener una mazarota *(a)* muy grande o *(b)* muy pequeña.
12.28 ¿Por qué las mazarotas ciegas pueden ser más pequeñas que las mazarotas abiertas?
12.29 Si fuera a incorporar letras o números en una parte fundida en arena, ¿las resaltaría sobre la superficie o las inscribiría dentro de ella? ¿Qué pasa si la parte se produjera mediante fundición por revestimiento? Explique su respuesta.
12.30 Las recomendaciones generales de diseño para un pozo en una fundición en arena (ver fig. 11.3) son: *(a)* que su diámetro sea por lo menos dos veces el diámetro de salida del bebedero, y *(b)* que su profundidad sea casi dos veces la profundidad del canal de alimentación. Explique las consecuencias de no apegarse a estos lineamientos.
12.31 Comúnmente, las regiones pesadas de las partes se colocan en el molde inferior de la fundición en arena y no en el molde superior. Explique las razones.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

12.32 Al diseñar modelos para fundición, los fabricantes utilizan reglas especiales que incorporan automáticamente tolerancias para la contracción de los sólidos en sus diseños. Por ejemplo, la regla de 12 pulgadas de un fabricante de modelos es mayor a un pie. ¿Cuán larga debe ser la regla de un fabricante a fin de hacer modelos para *(a)* fundiciones de aluminio, y *(b)* acero con alto contenido de manganeso?
12.33 Utilizando los datos proporcionados en la tabla 12.2, grafique diagramas aproximados de (a) capacidad de fundición contra soldabilidad, y (b) capacidad de fundición contra maquinabilidad para al menos cinco de los materiales incluidos en la tabla.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

12.34 Liste los procesos de fundición que son apropiados para fabricar partes huecas con: *(a)* características externas complejas, *(b)* características internas complejas, y *(c)* características internas y externas complejas. Explique sus elecciones.
12.35 Con frecuencia quedan cantidades pequeñas de escoria y desechos después de desnatar y se introducen en el flujo de metal fundido en la fundición. Si se reconoce que la escoria y los desechos son menos densos que el metal fundido, diseñe las características del molde que eliminen pequeñas cantidades de escoria antes que el metal llegue a la cavidad del molde.
12.36 Para la rueda de metal fundido ilustrada en la figura P12.36, muestre cómo pueden utilizarse *(a)* la colocación de la mazarota, *(b)* la colocación del macho o corazón, *(c)* las camisas metálicas, y *(d)* los enfriadores para ayudar a alimentar el metal fundido y eliminar la porosidad en la saliente del mamelón de la maza.

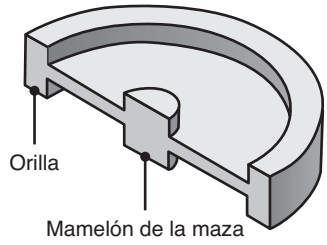


FIGURA P12.36

12.37 Suponga que falta la introducción de este capítulo. Escriba un breve texto para resaltar la importancia de los temas abarcados en ella.

12.38 En la figura P12.38, el diseño original de la fundición mostrado en *(a)* se modificó con el diseño mostrado en *(b)*. La fundición es redonda y tiene un eje vertical de simetría. Como parte funcional, ¿qué ventajas cree que tiene el nuevo diseño respecto del anterior?

12.39 En la figura P12.39 se muestra un diseño incorrecto y uno correcto para una fundición. Revise los cambios realizados y comente sus ventajas.

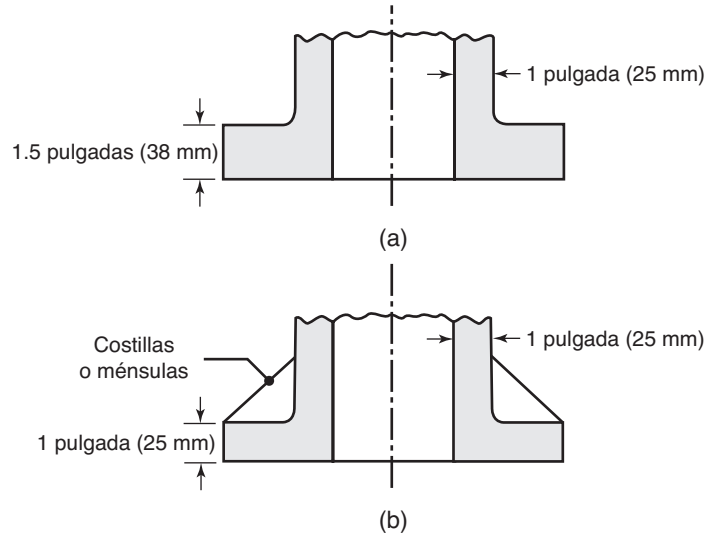


FIGURA P12.38

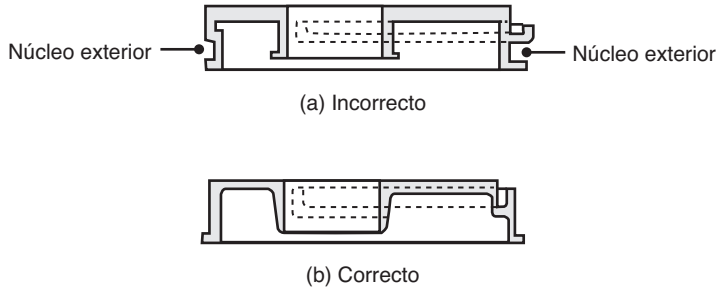


FIGURA P12.39

12.40 En la figura P12.40 se muestran tres grupos de diseños para fundición a presión en matriz. Observe los cambios realizados al diseño 1 de la matriz y comente las razones.

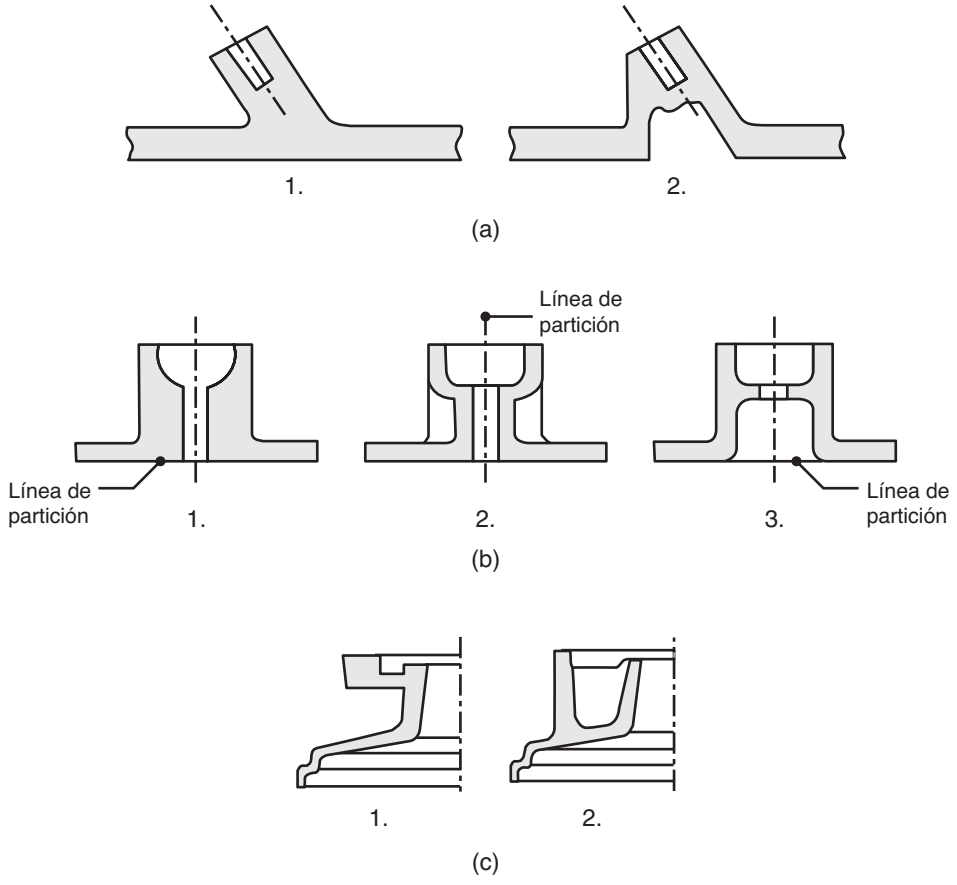


FIGURA P12.40

PARTE III

Procesos y equipo de formado y moldeado

Por lo general, tendemos a dar por sentados muchos de los productos que utilizamos en la actualidad y los materiales y componentes de los que están hechos. Sin embargo, cuando los inspeccionamos, pronto advertimos que se han utilizado una gran variedad de materiales y procesos en su fabricación (fig. III.1). Obsérvese también que algunos productos sólo constan de unas cuantas partes (lápices mecánicos, accesorios para iluminación), mientras que otros están constituidos por miles (automóviles, computadoras) o incluso millones de ellas (aviones, transbordadores espaciales). Hay productos que tienen formas simples con curvaturas lisas (rodamientos de bolas, manubrios de bicicletas), en tanto que otros poseen configuraciones complejas (monobloques de motores, bombas) y superficies de características detalladas (monedas, platería). Algunos artículos se utilizan en aplicaciones críticas (cables de elevadores, álabes para turbinas) y otros en aplicaciones cotidianas (sujetadores para papel, tenedores, cuchillos). Algunos objetos son muy delgados (papel aluminio, películas de plástico), mientras que otros son muy gruesos (cascos de barcos, placas de calderas).

Obsérvese que en el título de esta sección se utilizan las palabras *formado* y *moldeado*. Aunque no siempre hay claras distinciones entre ambas, por lo general el formado indica "*cambiar*" la forma de un cuerpo sólido existente. Por lo tanto, en los **procesos**

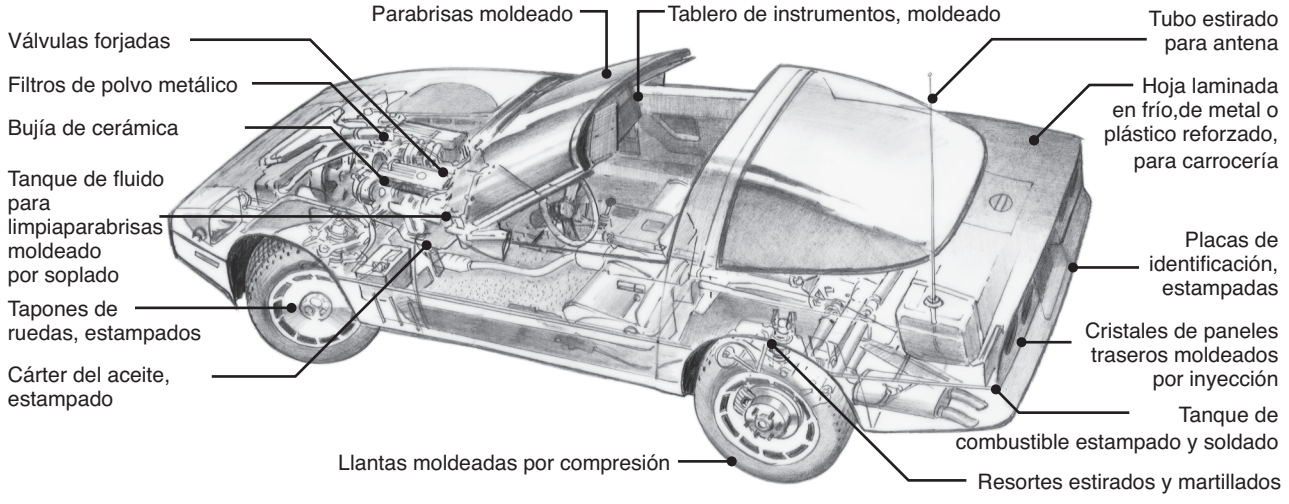


FIGURA III.1 Partes formadas y moldeadas en un automóvil común.

de formado el material inicial (conocido como pieza de trabajo, tocho o pieza bruta) puede tener la forma de una placa, lámina, barra, varilla, alambre o tubo de diferentes secciones transversales. Por ejemplo, si se desea fabricar un gancho de alambre ordinario para colgar ropa, se da forma a una pieza recta de alambre doblándolo y torciéndolo. También es común fabricar la carrocería metálica de un automóvil con lámina de acero plano rolada, a la que después se le dan diferentes formas (tapa del motor, techo, cajuela, tableros de puertas) mediante un par de matrices grandes.

Por lo general, los **procesos de moldeado** incluyen el moldeo y la fundición de materiales blandos o fundidos, y el producto terminado casi adquiere la forma deseada. Quizá requiera pocas, o ninguna, operaciones de acabado. Por ejemplo, un gancho de plástico para colgar ropa se fabrica confinando plástico fundido en un molde de dos placas con una cavidad con forma de gancho. Los receptores telefónicos, los revestimientos de las puertas para refrigeradores, los gabinetes de las computadoras y otros innumerables productos de plástico se forman de igual manera, forzando el polímero fundido en un molde y dejando que se solidifique. Como otro ejemplo, el aislante de cerámico blanco de una bujía para automóvil se fabrica moldeando arcilla en un molde, dejándola secar después y coccionándola en un horno.

Algunas operaciones de formado y moldeado sirven para elaborar *productos continuos* largos, como placas, láminas, tubería, cable y barras de diferentes secciones transversales. Los procesos de laminado, extrusión y estirado (capítulos 13 y 15) tienen la capacidad de fabricar dichos productos, que después se cortan a las longitudes deseadas. Por otro lado, en general, procesos como el forjado (capítulo 14), formado de láminas metálicas (capítulo 16), metalurgia de polvos (capítulo 17), moldeado de cerámicos y vidrios (capítulo 18) y plásticos y plásticos reforzados (capítulo 19) dan como resultado *productos discretos*.

El material inicial que se utiliza en el formado y moldeado de metales suele ser el metal fundido, el cual se *funde* en *lingotes* individuales, o *de manera continua* a planchones, redondos o tubos. Las estructuras fundidas se convierten en *estructuras maleables* mediante los procesos de deformación plástica descritos en diversos capítulos. La materia prima usada también puede consistir en *polvos metálicos*, que después se prensan y sinterizan (se calientan sin fundirse) como productos individuales. En el caso de los plásticos, por lo común los materiales iniciales son las partículas (“pellets”), hojuelas o polvo, y en el caso de los cerámicos, son las arcillas y óxidos obtenidos de minerales o producidos sintéticamente.

En la parte III se describen factores importantes que participan en cada proceso de formado y moldeado, junto con la manera en que las propiedades y los procesos de los materiales afectan la calidad de los productos (tabla III.1). También se explica por qué algunos materiales pueden procesarse sólo mediante ciertos métodos de manufactura y por qué partes con formas particulares pueden trabajarse sólo mediante ciertas técnicas y no con otras. Las características de la maquinaria y el equipo utilizado en estos procesos también afectan de modo significativo la calidad de los productos, la velocidad de producción y la economía de una operación de manufactura en particular.

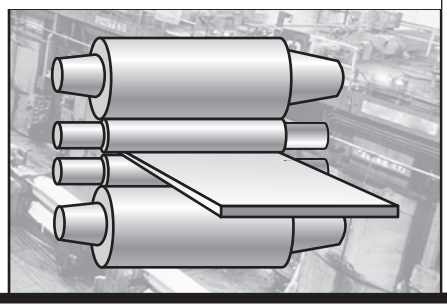
TABLA III.1

Características generales de los procesos de formado y moldeado

Proceso	Características
Laminado	
Plano	Producción de placas planas, hojas y hojas delgadas a altas velocidades; buen acabado superficial, en especial el laminado en frío; inversión de capital muy elevada; costo de mano de obra baja a moderada.
De forma	Producción de varias formas estructurales (como vigas I y rieles) a altas velocidades; incluye laminado de roscas; requiere rodillos de forma y equipos costosos; costo de mano de obra bajo a moderado; habilidad moderada del operador.
Forjado	Producción de partes discretas con un juego de matrices; generalmente se requieren algunas operaciones de acabado; por lo común, se realizan a temperaturas elevadas, pero también en frío para partes más pequeñas, los costos de matrices y equipos son elevados; costo de mano de obra de moderado a elevado; habilidad moderada a alta del operador.
Extrusión	Producción de tramos largos de formas sólidas o huecas con sección transversal constante; después se corta el producto a las longitudes deseadas, por lo general se realiza a temperaturas elevadas; la extrusión en frío tiene similitudes con el forjado y se utiliza para hacer productos discretos; costo de matrices y equipo de moderado a elevado; costo de mano de obra de bajo a moderado; habilidad baja a moderada del operador.
Estirado	Producción de barra y alambre largos con diferentes secciones transversales; buen acabado superficial; costos de matrices, equipo y mano de obra de bajo a moderado; habilidad baja a moderada del operador.
Formado de hojas metálicas	Producción de una gran variedad de formas con paredes delgadas y con geometrías simples y complejas; por lo general, costos de matrices, equipo y mano de obra de bajos a moderados; habilidad baja a moderada del operador.
Metalurgia de polvos	Producción de formas simples o complejas mediante compactado y sinterizado de polvos metálicos; costo moderado de matrices y equipo; costo bajo de mano de obra y baja habilidad del operador.
Procesamiento de plásticos y materiales compósitos	Producción de una amplia variedad de productos continuos o discretos mediante los procesos de extrusión, moldeado, fundición y fabricación; costos moderados por matrices y equipo; alta habilidad del operador en el procesamiento de materiales compósitos.
Formado y moldeado de cerámicos	Producción de productos discretos mediante diferentes procesos de moldeado, secado y cocción; costo de matrices y equipo de bajo a moderado; habilidad moderada a alta del operador.

Laminación de metales

CAPÍTULO 13



En este primer capítulo de la parte III sobre el formado y moldeado de materiales metálicos y no metálicos se describe la laminación de metales, un proceso primario importante. Específicamente, se estudiarán:

- Fundamentos de los procesos de laminación plana y de formas, así como de sus capacidades.
- Parámetros comprendidos en la determinación de cantidades, como fuerzas, torque y potencia.
- Tipos de defectos que se pueden desarrollar y cómo evitarlos o minimizarlos.
- Características de los molinos de laminación y la manera en que se pueden arreglar los rodillos en varias configuraciones para propósitos específicos.

Productos comunes fabricados mediante diferentes procesos de laminación: placas para barcos, puentes, estructuras y máquinas; láminas metálicas para carrocerías de automóviles, fuselajes para aviones, aparatos eléctricos y contenedores; hojas delgadas para empaques; vigas I, rieles de vías férreas, canales, anillos, tubos y tubería sin costura; tornillos, pernos y componentes roscados.

Procesos alternativos: colada continua, extrusión, estirado o trefilado y maquinado de componentes roscados.

13.1 Introducción 347
13.2 Proceso de laminación plana 349
13.3 Práctica de laminación plana 354
13.4 Molinos de laminación 358
13.5 Diversos procesos y molinos de laminación 360

EJEMPLO:

13.1 Cálculo de la fuerza y el torque de laminado en laminación plana 351

ESTUDIO DE CASO:

13.1 Manufactura de segmentos de cubierta de un motor cohete de combustible sólido para un transbordador espacial 366

13.1 Introducción

La **laminación** es el proceso que consiste en reducir el espesor o cambiar la sección transversal de una pieza de trabajo larga mediante fuerzas de compresión aplicadas con un conjunto de **rodillos** (fig. 13.1). Es similar al laminado de la masa para pan, en el que se emplea un rodillo para reducir su espesor. La laminación, que incluye a casi 90% de todos los metales producidos mediante procesos de conformado, se desarrolló por primera vez a finales del siglo XVI. Por lo general, las prácticas modernas tanto de aceración como de fabricación de diversos metales y aleaciones ferrosas y no ferrosas combinan los procesos de colada continua con los de laminación, lo que mejora en gran medida la productividad y disminuye los costos de producción, como se describe en la sección 5.4. Los materiales no metálicos también se laminan para reducir su espesor y mejorar sus propiedades. Se aplican por lo común en el laminado de plásticos, polvos metálicos, lodo de cerámico y vidrio caliente, según se describe de manera detallada en las secciones correspondientes de este libro.

Primero se efectúa la laminación a temperaturas elevadas (laminación en caliente). Durante esta fase, la estructura de grano grueso, quebradiza y porosa del lingote (o de

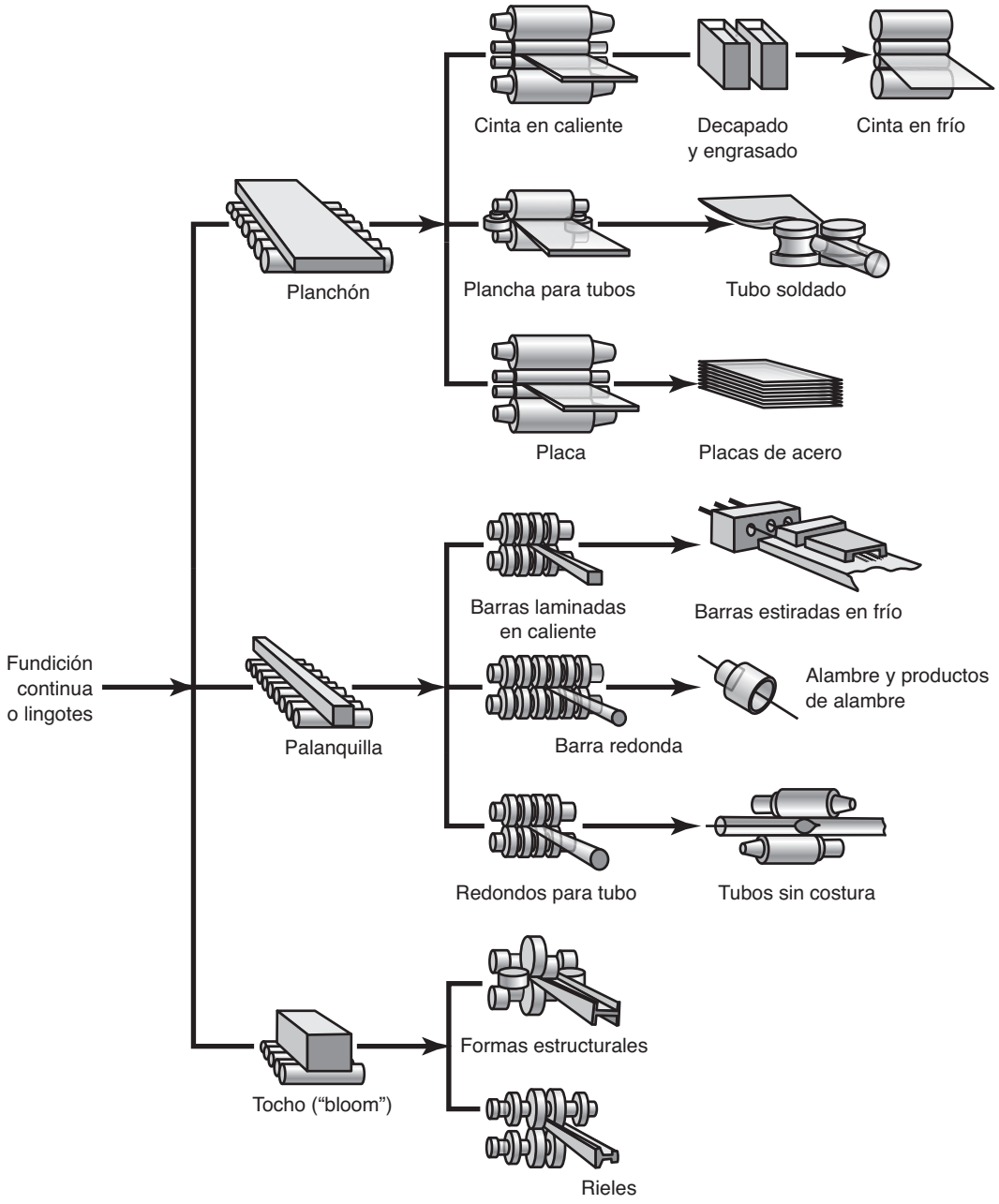


FIGURA 13.1 Esquema de diversos procesos de laminación plana y laminación de forma. *Fuente:* American Iron and Steel Institute.

colada continua), se rompe en una *estructura maleable* que tiene un tamaño de grano más fino y propiedades mejoradas, como resistencia y dureza. Posteriormente, se acostumbra realizar la laminación a temperatura ambiente (laminación en frío), en la que el producto laminado adquiere más resistencia y dureza y mejor acabado superficial. Sin embargo, requiere mayor energía (debido al incremento de la resistencia del material a temperatura ambiente) y da como resultado un producto con propiedades anisotrópicas (por la orientación preferida o fibrilado mecánico, ver la sección 1.5).

En general, las **placas** tienen un espesor de más de 6 mm (1/4 pulgada) y se utilizan en aplicaciones estructurales, como cascos de barcos, calderas, puentes, maquinaria y re-

cipientes nucleares. Las placas pueden tener espesores de hasta 300 mm (12 pulgadas) para soportes estructurales grandes, 150 mm (6 pulgadas) para recipientes de reactores y de 100 a 125 mm (4 a 5 pulgadas) para buques y tanques de guerra.

Por lo general, las **láminas** tienen un espesor de menos de 6 mm y es común que se entreguen en forma de rollos a las compañías manufactureras, con pesos de hasta 30,000 kg (33 toneladas cortas[N. del RT.]), o como hojalata para su posterior procesamiento en diversos productos. Las láminas suelen utilizarse para carrocerías de automóviles y aviones, aparatos eléctricos, contenedores de alimentos y bebidas, así como en equipo de cocina y oficina. Los fuselajes de aviones comerciales y las carrocerías de los tractocamiones se fabrican con láminas de aleación de aluminio cuyo espesor es de al menos 1 mm (0.04 pulgada). Por ejemplo, la superficie del fuselaje de un Boeing 747 tiene un espesor de 1.8 mm (0.07 pulgada) y el de un Lockheed L1011 es de 1.9 mm (0.075 pulgada). Las láminas de acero utilizadas en carrocerías de automóviles y aparatos eléctricos tienen un espesor de cerca de 0.7 mm (0.03 pulgada). Las latas de aluminio para bebidas se fabrican con lámina de 0.28 mm (0.01 pulgada) de espesor; después de producirse como base de la lata, el cuerpo cilíndrico se forma con un espesor de pared de 0.1 mm (0.004 pulgada). El **papel** aluminio (generalmente utilizado como envoltura y para dulces y goma de mascar) tiene un espesor de 0.008 mm (0.0003 pulgada), aunque también se pueden producir hojas más delgadas, hasta de 0.003 mm (0.0001 pulgada) para diversos metales.

N. del RT. Considérese que una tonelada métrica (TM) equivale a 1.10231 toneladas cortas (TC) y 1 TC equivale a 2000 lb.

En este capítulo se describen los fundamentos de las operaciones de **laminación plana** y diversas operaciones de **laminación de formas**, la producción de tubería y tubos sin costura, y se tratan factores importantes implícitos en las prácticas de la laminación.

13.2 Proceso de laminación plana

En la figura 13.2a se muestra un esquema del proceso de *laminación plana*. Una cinta metálica de espesor h_0 entra en el **espacio de laminación** y un par de rodillos giratorios la reduce a un espesor h_f, cada uno impulsado de manera individual por motores eléctricos. La velocidad de la superficie de los rodillos es V_r. La velocidad de la cinta aumenta desde su valor de entrada V_o conforme se mueve a través del espacio de laminación, de la misma manera en que un fluido incompresible debe fluir más rápidamente cuando pasa a través de un canal convergente. La velocidad de la cinta es mayor a la salida del espacio de laminación y se denota como V_f.

Puesto que la velocidad de la superficie del rodillo rígido es constante, existe un *deslizamiento relativo* entre el rodillo y la cinta a lo largo del arco de contacto en el espacio de laminación, L. En un punto a lo largo de la longitud de contacto (conocido co-

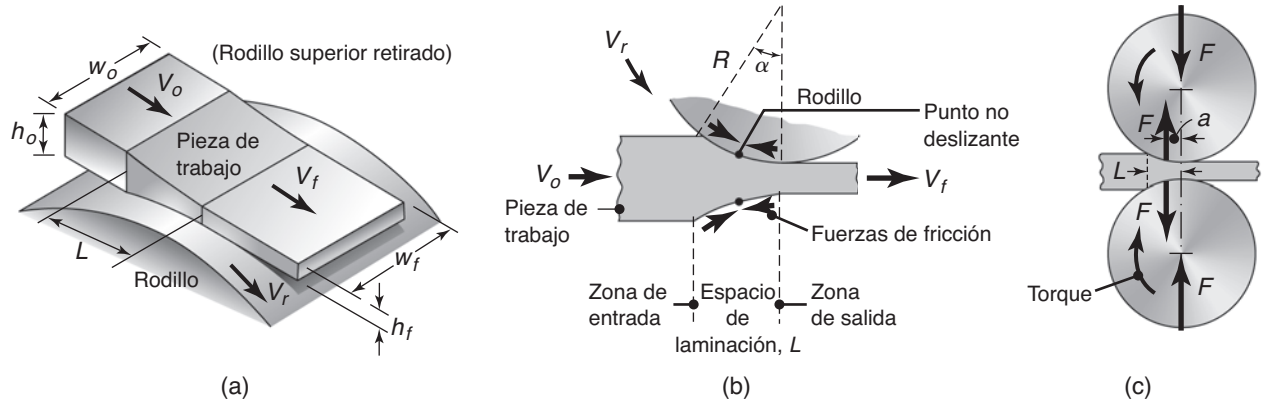


FIGURA 13.2 *(a)* Esquema del proceso de laminación plana. *(b)* Fuerzas de fricción que actúan sobre las superficies de la cinta. *(c)* La fuerza de laminado (F) y el torque (T) que actúan sobre los rodillos. Por lo general, el ancho de la cinta (w) aumenta durante la laminación, como se muestra en la figura 13.5.

mo **punto neutral** o **punto no deslizante**), la velocidad de la cinta es la misma que la del rodillo. A la izquierda de este punto, el rodillo se mueve más rápido que la cinta; a la derecha, la cinta se mueve más rápido que el rodillo. Por consiguiente, las fuerzas de fricción, que se oponen al movimiento entre los dos cuerpos deslizantes, actúan sobre la cinta como se muestra en la figura 13.2b.

Los rodillos jalan el material hacia el espacio de laminación por medio de una *fuerza de fricción neta*, por lo que ésta debe estar a la derecha en la figura 13.2b. Esto también significa que la fuerza de fricción que se ubica a la izquierda del punto neutral debe ser superior a la de la derecha. Aunque la fricción es necesaria para laminar los materiales (como sucede al conducir un automóvil en una carretera), la energía se disipa al vencer la fricción. Por lo tanto, cuando aumenta la fricción también aumentan las fuerzas de laminado y la demanda de energía. Más aún, una fricción elevada puede dañar la superficie del producto laminado (o provocar su adhesión, como ocurre al laminar masa para pan). Por ello, en la práctica se adopta una solución media (que induce coeficientes de fricción bajos mediante lubricantes eficaces).

La **reducción** máxima posible se define como la diferencia entre los espesores inicial y final de la cinta ($h_o - h_f$). Se puede demostrar que es una función del coeficiente de fricción (μ) entre la cinta y el rodillo y el radio del rodillo (R) mediante la siguiente relación:

$$h_o - h_f = \mu^2 R \tag{13.1}$$

Como se esperaba, cuanto más alta sea la fricción y más grande el radio del rodillo, mayor será la reducción máxima posible. Obsérvese que esta situación es similar al uso de neumáticos grandes (R elevado) y marcas profundas (μ elevado) en los tractores agrícolas y en el equipo todo terreno para su movimiento en tierra, lo que permite que los vehículos avancen sobre caminos accidentados sin patinarse.

13.2.1 Fuerza, torque y requerimientos de potencia del laminado

Los rodillos aplican presión sobre la cinta plana para reducir su espesor, lo que produce una *fuerza de laminado* (F) como se muestra en la figura 13.2c. Obsérvese que esta fuerza es perpendicular al plano de la cinta y no a un ángulo. Esto se debe a que el arco de contacto es muy pequeño en comparación con el radio del rodillo, por lo que puede asumirse que la fuerza de laminado es perpendicular al lugar de trabajo sin provocar un error significativo en los cálculos. La fuerza de laminado en la laminación plana se puede obtener a partir de la fórmula

$$F = Lw Y_{\text{prom}} \tag{13.2}$$

en donde L es la longitud de contacto entre el rodillo y la cinta, w la anchura de la cinta y Y_{prom} el esfuerzo real promedio (ver sección 2.2) de la cinta en el espacio de laminación. La ecuación 13.2 es para una situación *sin fricción*; sin embargo, puede obtenerse un estimado de la *fuerza real de laminado* si se aumenta esta fuerza alrededor de 20% para considerar el efecto de la fricción.

El *torque* en la laminación es el producto de F y a. La potencia requerida por rodillo se puede estimar suponiendo que F actúa a la mitad del arco de contacto, por lo que en la figura 13.2c, $a = L/2$. Por lo tanto, la *potencia total* (para los dos rodillos) en unidades del S.I. es

$$\text{Potencia} = \frac{2\pi FLN}{60{,}000 \text{ kW}} \tag{13.3}$$

en donde F está en newtons, L está en metros y N son las revoluciones por minuto del rodillo. En unidades inglesas tradicionales, la potencia total se puede expresar como

$$\text{Potencia} = \frac{2\pi FLN}{33{,}000 \text{ hp}} \tag{13.4}$$

en donde F está en libras y L está en pies.

EJEMPLO 13.1 Cálculo de la fuerza y el torque de laminado en laminación plana

Una cinta de cobre recocido con una anchura de 9 pulgadas (228 mm) y un espesor de 1.00 pulgada (25 mm), se lamina hasta un espesor de 0.80 pulgada (20 mm) en un pase. El radio del rodillo es de 12 pulgadas (30 mm) y los rodillos giran a 100 rpm. Calcúlese la fuerza de laminado y la potencia requerida en esta operación.

Solución La fuerza de laminado se determina a partir de la ecuación 13.2, en la que L es la longitud de contacto entre el rodillo y la cinta. Se puede demostrar mediante la geometría simple que esta longitud se obtiene aproximadamente por

$$L = \sqrt{R(h_o - h_f)} = \sqrt{12(1.00 - 0.80)} = 1.55 \text{ pulgadas}$$

El esfuerzo real promedio (Y_{prom}) para cobre recocido se determina de la siguiente manera. Primero, considérese que el valor absoluto de la deformación real que sufre la cinta en esta operación es

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{1.00}{0.80}\right) = 0.223$$

En relación con la figura 2.6, nótese que el cobre recocido sin deformación tiene un esfuerzo real de alrededor de 12,000 psi, y a una deformación real de 0.223, dicho esfuerzo es de 40,000 psi, por lo que el esfuerzo real promedio es de (12,000 + 40,000)/2 = 26,000 psi. Ahora ya podemos definir la fuerza de laminado como

$$F = Lw Y_{\text{prom}} = (1.55)(9)(26{,}000) = 363{,}000 \text{ lb} = 1.6 \text{ MN}$$

La potencia total se calcula a partir de la ecuación 13.4, considerando que $N = 100$ rpm. Por lo tanto,

$$\text{Potencia} = \frac{2\pi FLN}{33{,}000} = \frac{2\pi(363{,}000)(1.55/12)(100)}{33{,}000}$$
$$= 898 \text{ hp} = 670 \text{ kW}$$

Es difícil calcular con exactitud los requisitos de fuerza y potencia en la laminación debido a las incertidumbres comprendidas en *(a)* la determinación de la geometría exacta de contacto entre el rodillo y la cinta y *(b)* la estimación precisa tanto del coeficiente de fricción como de la resistencia del material en el espacio de laminación, en particular para la laminación en caliente, por la sensibilidad de la resistencia del material a la velocidad de deformación (ver sección 2.2.7).

Reducción de la fuerza de laminado. Las fuerzas de laminado pueden provocar deflexión significativa y aplanamiento de los rodillos (como sucede en los neumáticos de hule). A su vez, dichos cambios afectan la operación de laminado. Además, las columnas del **castillo de laminación** (incluyendo el bastidor, el calzo y los rodamientos, como se muestra en la fig. 13.3) se pueden flexionar debido a las altas fuerzas de laminado, de modo que el espacio de laminación puede ampliarse de manera significativa. Por lo tanto, los rodillos se tienen que instalar más cerca de lo calculado originalmente para compensar esta deflexión y obtener el espesor final deseado.

Las fuerzas de laminado se pueden reducir de la siguiente manera:

- Reduciendo la fricción en la interfaz del rodillo y la pieza de trabajo.
- Utilizando rodillos de diámetro más pequeño para reducir el área de contacto.
- Aplicando reducciones menores por pase para reducir el área de contacto.
- Laminando a temperaturas elevadas para reducir la resistencia del material.
- Aplicando tensiones a la cinta.

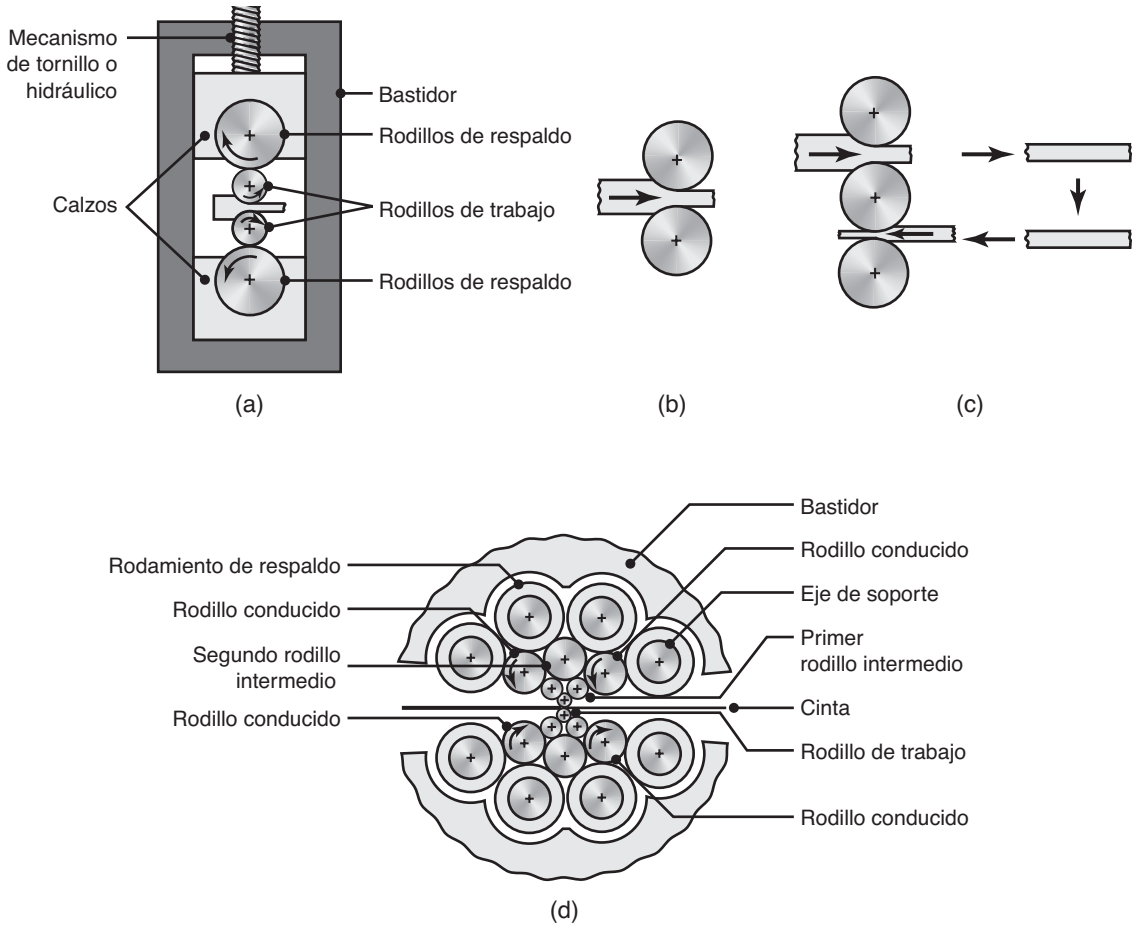


FIGURA 13.3 Esquema de diversos arreglos de rodillos: *(a)* molino de laminación de cuatro rodillos que muestra diversas características. La rigidez del bastidor, los rodillos y los rodamientos son importantes para controlar y mantener el espesor de la cinta laminada; *(b)* molino de dos rodillos; *(c)* molino de tres rodillos, y *(d)* molino de laminación de conjunto (o Sendzimir).

Otro método efectivo para reducir las fuerzas de laminado consiste en aplicar **tensión** longitudinal a la cinta durante el laminado (cuya consecuencia es que los esfuerzos de compresión requeridos para deformar plásticamente el material sean más pequeños). Las tensiones son importantes porque se requieren grandes fuerzas de laminado para laminar metales de alta resistencia. Se pueden aplicar a la cinta en la zona de entrada (**tensión trasera**), en la zona de salida (**tensión delantera**), o en ambas. La tensión trasera se aplica a la lámina mediante el frenado del carrete que la alimenta dentro del espacio de laminación (*carrete de alimentación*) por algún medio adecuado. Se aplica tensión delantera si se aumenta la velocidad de rotación del *carrete de salida*. A pesar de que tiene aplicaciones limitadas y especializadas, la laminación también se puede efectuar aplicando únicamente tensión delantera, sin suministro de potencia a los rodillos; este proceso se conoce como **laminado Steckel**.

13.2.2 Consideraciones geométricas

Los rodillos sufren cambios de forma durante la laminación debido a las fuerzas que actúan sobre ellos. Como sucede con una viga recta que se flexiona con carga transversal, las fuerzas de laminado tienden a doblar los rodillos *elásticamente* durante la laminación (fig. 13.4a). Como era de esperarse, cuanto mayor sea el módulo elástico del material del rodillo, menor será su deflexión.

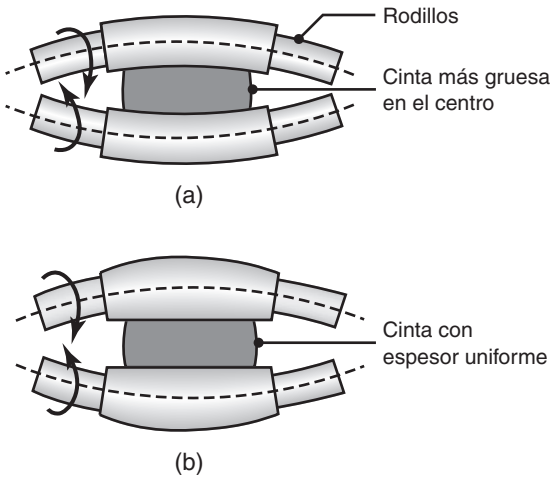


FIGURA 13.4 *(a)* Doblado de los rodillos cilíndricos rectos a causa de las fuerzas de laminado. *(b)* Doblado de los rodillos rectificados con la comba, que producen una cinta con espesor uniforme a todo el ancho de la cinta. Para efectos de claridad se exageraron las deflexiones.

Debido al doblado de los rodillos, la cinta laminada tiende a ser más gruesa en el centro que en los extremos (**corona**). El método usual para evitar este problema consiste en rectificar los rodillos de manera que el diámetro en su centro sea un poco más grande que en sus extremos (**comba**). Entonces, cuando el rodillo se dobla, la cinta que se está laminando tiene un espesor constante a lo largo de su anchura (fig. 13.4b). En el caso de las láminas metálicas, el radio del punto máximo de la comba es por lo general 0.25 mm (0.01 pulgada) mayor que en los extremos del rodillo. Sin embargo, como era de esperarse, una comba en particular es correcta sólo para cierta carga y anchura de cinta. Si se quiere reducir los efectos de la deflexión, los rodillos también pueden someterse a doblado externo aplicando momentos en sus rodamientos (técnica que se demuestra de manera simple si se dobla una vara de madera en sus extremos, manipulación que simula la comba).

Los rodillos pueden adquirir una ligera forma de barril (**comba térmica**) debido al calor que genera la deformación plástica durante la laminación. A menos que se compense por algún medio, esta condición puede producir cintas más delgadas en el centro que en los extremos. Por consiguiente, la comba total (o final) puede controlarse ajustando la ubicación y la velocidad de flujo del líquido refrigerante a lo largo de los rodillos durante la laminación en caliente.

Las fuerzas de laminado también tienden a *aplanar* elásticamente los rodillos, produciendo un efecto muy similar al aplanamiento que sufren los neumáticos de los automóviles bajo alguna carga. El aplanamiento de los rodillos es poco deseable, ya que produce, en efecto, un mayor radio de laminado. A su vez, esto significa un área de contacto más grande para la misma distancia entre rodillos, y la fuerza de laminado aumenta debido a la entonces mayor área de contacto.

Ensanchado. En la laminación de placas y láminas con altas relaciones de anchura a espesor, la anchura de la cinta permanece efectivamente constante durante la laminación. Sin embargo, con relaciones más pequeñas (como una cinta con una sección transversal cuadrada), la anchura aumenta de manera significativa conforme pasa a través de los rodillos (efecto que se observa comúnmente al laminar masa para pan con un rodillo). A este incremento en la anchura se le conoce como *ensanchado* (fig. 13.5). Al calcular la fuerza de laminación, la anchura w en la ecuación 13.2 se toma como una anchura promedio.

Se puede demostrar que el ensanchado aumenta con *(a)* la disminución de la relación anchura a espesor de la cinta de entrada (debido a la reducción en la restricción de

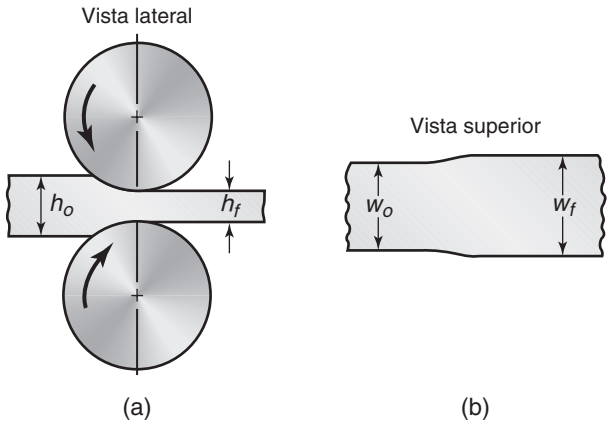


FIGURA 13.5 Aumento de la anchura de la cinta (ensanchado) en el laminado plano. Note que se puede observar un ensanchado similar a cuando la masa para pan se lamina con un rodillo.

la anchura), *(b)* el aumento de la fricción, y *(c)* la disminución de la relación del radio del rodillo al espesor de la cinta. Los últimos dos efectos se deben al aumento de restricción longitudinal del flujo de material en el espacio de laminación. También puede evitarse el ensanchado mediante rodillos adicionales (con ejes verticales) en contacto con los extremos del producto laminado en el espacio de laminación (*molinos de rebordeado*), aportando así una restricción física al ensanchado.

13.2.3 Vibración y traqueteo

La *vibración* y el *traqueteo* pueden tener efectos significativos en la calidad de los productos y la productividad de las operaciones de trabajo de los metales. El traqueteo, que por lo general se define como *vibración autoexcitada,* puede presentarse en la laminación y en las operaciones de extrusión, estirado, maquinado y rectificado. En la laminación causa variaciones periódicas en el espesor de la hoja laminada y en su acabado superficial y, por lo tanto, puede provocar desperdicios excesivos (ver tabla 40.6). En la laminación, se ha encontrado que el traqueteo ocurre predominantemente en los *molinos compuestos*; es muy perjudicial para la productividad, y se ha estimado que si no fuera por él los molinos modernos de laminación podrían operar a velocidades hasta 50% más elevadas.

El traqueteo es un fenómeno muy complejo (ver también sección 25.4) y se produce debido a interacciones de la dinámica estructural del soporte del molino y la dinámica de la operación del rodillo. La velocidad de laminación y la lubricación son sus dos parámetros más importantes. Aunque la implantación respectiva no siempre es práctica, también se ha sugerido que el traqueteo puede reducirse si aumenta la distancia entre los soportes del molino de laminación (ver fig. 13.11), se incrementa la anchura de la cinta, disminuye la reducción por pase (espacio de laminación), aumentan tanto el radio del rodillo como la fricción entre la cinta y el rodillo, y se incorporan amortiguadores en los soportes de los rodillos.

13.3 Práctica de laminación plana

Por lo general, la **laminación en caliente** realiza los pasos iniciales de laminado (*rompimiento de estructura de colada*) del material por encima de la temperatura de recristalización del metal (sección 1.6). Como se describe en la sección 10.2 y se ilustra en la figura 10.2, una **estructura fundida** suele ser dendrítica e incluye granos gruesos y no uniformes; por lo común, esta estructura es quebradiza y puede ser porosa. La lamina-

ción en caliente convierte la estructura fundida en una **estructura maleable** (fig. 13.6) con granos más finos y ductilidad mejorada, que son producto de la ruptura de límites frágiles de granos y el cierre de los defectos internos (en especial la porosidad). Los intervalos característicos de temperatura para la laminación en caliente son de casi 450 °C (850 °F) para aleaciones de aluminio, hasta 1250 °C (2300 °F) para aceros aleados y hasta 1650 °C (3000 °F) para aleaciones refractarias (ver también tabla 14.3).

Al producto de la primera operación de laminación en caliente se le conoce como **tocho** (*bloom*) o **planchón** (*slab*) (ver fig. 13.1). Por lo común, un tocho tiene una sección transversal cuadrada de al menos 150 mm (6 pulgadas) de lado; el planchón generalmente es de sección transversal rectangular. Los tochos se procesan luego mediante el *laminado de forma*, en donde adquieren perfiles estructurales, como vigas I y rieles para vías férreas (sección 13.5). Los planchones se laminan como placas y láminas. Por lo regular, las **palanquillas** son cuadradas (con un área de sección transversal más pequeña que la de los planchones) y después se laminan adquiriendo diversas formas, como barras redondas y de diferentes secciones, mediante rodillos con perfiles. Las barras redondas laminadas en caliente (**alambrón**) se utilizan como materia prima para operaciones de estirado de varillas y alambres (capítulo 15).

Por lo general, en la laminación en caliente de tochos, palanquillas y planchones, la superficie del material se **acondiciona** (se prepara para una operación posterior) antes de laminarlo mediante el uso de un soplete, a fin de eliminar la cascarilla (*descascarado*) o el esmerilado grueso para alisar las superficies. Antes de la laminación en frío, se puede eliminar la cascarilla desarrollada durante la laminación en caliente por inmersión en *baños* con ácidos (ataque con ácidos), por medios mecánicos como el chorro de agua o también por esmerilado para eliminar otros defectos.

La **laminación en frío** se realiza a temperatura ambiente y, en comparación con la laminación en caliente, produce láminas y cintas con mucho mejor acabado superficial (por la ausencia de cascarilla), tolerancias dimensionales y propiedades mecánicas (debido al endurecimiento por deformación).

El **laminado en conjunto** es una operación de laminado plano en la que se laminan dos o más capas de metal al mismo tiempo, mejorando así la productividad. Por ejemplo, el *papel aluminio* se lamina en conjunto en dos capas, de manera que sólo las capas exteriores superior e inferior tocan los rodillos. Obsérvese que un lado de la hoja de aluminio es mate, mientras que el otro es brillante. El lado que se encuentra entre las hojas tiene un acabado mate y satinado, pero el lado entre la hoja y el rodillo es brillante y lustroso, porque ha estado bajo esfuerzos elevados de contacto con los rodillos pulidos durante el laminado.

El acero dulce laminado se estira durante las operaciones de formado de lámina y sufre una *elongación al punto de fluencia* (sección 16.3), fenómeno que provoca irregularidades en la superficie conocidas como *deformaciones de estiramiento* o *bandas de*

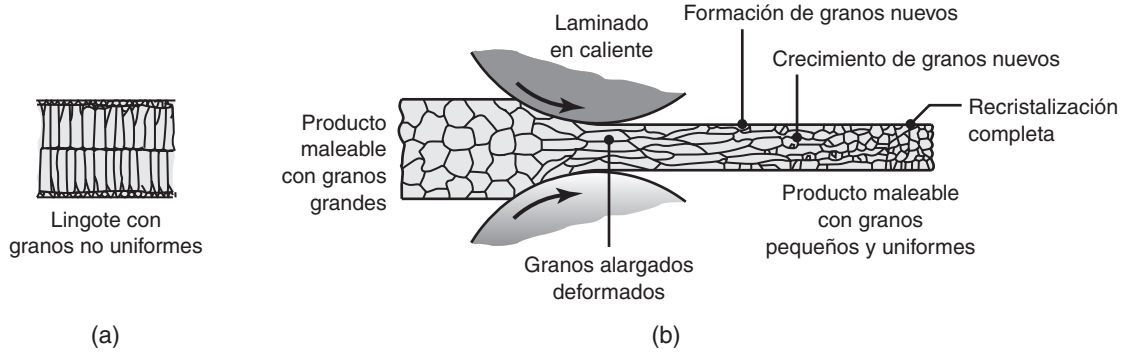


FIGURA 13.6 Cambios en la estructura de los granos de metales fundidos o maleables de granos grandes durante el laminado en caliente. Este proceso es una manera efectiva de reducir el tamaño de los granos en los metales para mejorar la resistencia y la ductilidad. Las estructuras fundidas de los lingotes o las fundiciones continuas se transforman en una estructura maleable por medio del trabajo en caliente.

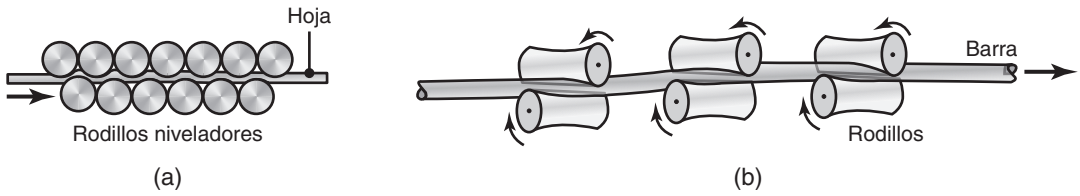


FIGURA 13.7 *(a)* Método de nivelación de rodillos para aplanar hojas laminadas. *(b)* Nivelación de rodillos para enderezar barras estiradas.

Lüders. Para corregir esta situación, la lámina metálica se somete a un leve pase final de 0.5 a 1.5% de reducción, conocida como **laminación de relevado** o **paso de superficie**.

Quizá una hoja laminada no esté lo suficientemente plana al abandonar el espacio de laminación, debido a variaciones en el material de entrada o en los parámetros de procesamiento durante el laminado. Para mejorar la planicidad, por lo general la cinta laminada pasa por una serie de **rodillos niveladores**. Se utilizan varios arreglos de rodillos, como se muestra en la figura 13.7. La pieza de trabajo se flexiona en direcciones opuestas conforme pasa a través de una serie de rodillos, cada uno de los cuales suele accionarse por separado mediante un motor eléctrico individual.

13.3.1 Defectos en placas y hojas laminadas

Es posible que haya defectos en las superficies de las placas y hojas laminadas o defectos estructurales internos. Los defectos son indeseables no sólo porque degradan la apariencia de la superficie, sino también porque pueden dañar la resistencia, formabilidad y otras características de fabricación. Se han identificado diversos defectos de superficie (como cascarilla, oxidación, raspaduras, estrías, picaduras y grietas) en las láminas metálicas. Pueden tener como origen las inclusiones e impurezas en el material fundido original, o muchas otras condiciones relacionadas con la preparación del material y la operación de laminado.

Los **bordes ondulados** en las láminas (fig. 13.8a) son el resultado de la flexión del rodillo. La cinta es más delgada a lo largo de su borde que en su centro (ver fig. 13.4a), por lo que los bordes se estiran más que el centro. En consecuencia, los bordes se ensanchan debido a que la región central les restringe su libre expansión en la dirección longitudinal (de laminado). Por lo general, las **grietas** mostradas en las figuras 13.8b y c obedecen a la deficiente ductilidad de un material a la temperatura de laminación. Puesto que la calidad de los bordes de la hoja puede afectar las operaciones de formado de las láminas metálicas, con frecuencia se eliminan los defectos de los extremos en las hojas laminadas mediante operaciones de cizallado y recortado (sección 16.2). El **acocodrilado**

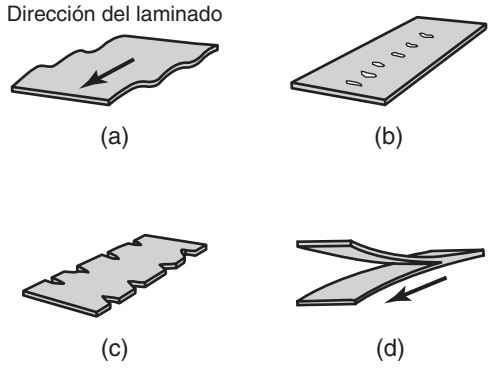


FIGURA 13.8 Esquema de defectos típicos en laminación plana: *(a)* bordes ondulados; *(b)* grietas en forma de cremallera en el centro de la cinta; *(c)* grietas de los bordes y *(d)* acocodrilado.

(fig. 13.8d) es un fenómeno complejo y por lo general se debe a la deformación volumétrica no uniforme de la palanquilla durante el laminado, o a la presencia de defectos en el material original fundido.

13.3.2 Otras características de los metales laminados

Esfuerzos residuales. La deformación no uniforme del material en el espacio de laminación puede ocasionar que se desarrollen esfuerzos residuales en placas y hojas laminadas, en especial durante el laminado en frío. Los rodillos de diámetro pequeño o las reducciones por pase de pequeño espesor tienden a deformar plásticamente el metal más en la superficie que en el centro (fig. 13.9a). Esta situación provoca esfuerzos residuales de compresión en las superficies y esfuerzos de tensión en el centro. Por el contrario, los rodillos de diámetro grande, o las altas reducciones por pase, tienden a deformar el centro más que la superficie (fig. 13.9b). Esto se debe a una restricción más elevada de la fricción en las superficies a lo largo del arco de contacto, lo que produce distribuciones de esfuerzos residuales que se oponen a las de los rodillos de diámetro pequeño.

Tolerancias dimensionales. Por lo general, las tolerancias de espesor para las hojas laminadas en frío van de ±0.1 a 0.35 mm (±0.004 a 0.014 pulgada), lo que depende del espesor. Las tolerancias son mucho más grandes para las placas laminadas en caliente debido a los efectos térmicos. Es común que las *tolerancias de planicidad* se encuentren dentro de ±15 mm/m (±3/16 pulgada/pie) para laminado en frío y ±55 mm/m (5/8 pulgada/pie) para laminado en caliente.

Rugosidad de la superficie. En la figura 23.13 se dan los intervalos de rugosidad superficial para laminados en frío y en caliente; con fines de comparación, se incluyen intervalos para otros procesos de manufactura. Obsérvese que el laminado en frío puede producir un acabado superficial muy fino, por lo que es posible que los productos fabricados con hojas laminadas en frío no requieran operaciones adicionales de acabado, dependiendo de la aplicación. Nótese también que el laminado en caliente y la fundición en arena producen los mismos niveles de rugosidad superficial.

Números de calibre. Por lo general, el espesor de una hoja se identifica por medio de un *número de calibre*: cuanto más pequeño es el número, más gruesa es la hoja. En la in-

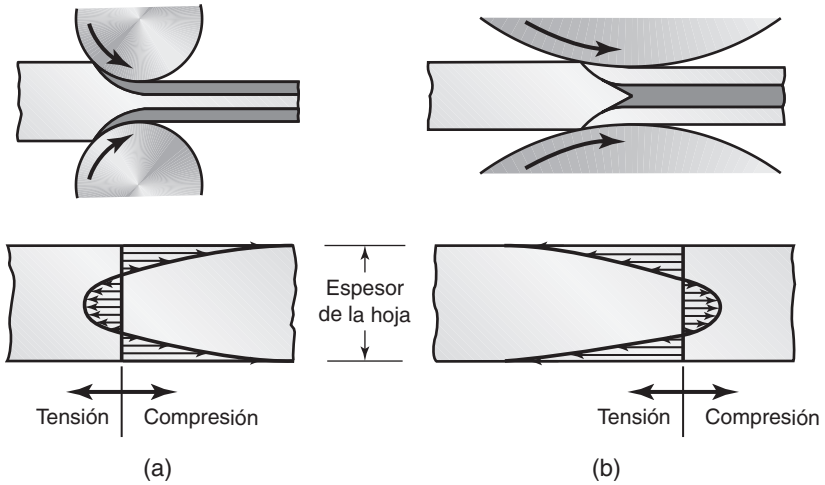


FIGURA 13.9 *(a)* Esfuerzos residuales desarrollados en el laminado con rodillos de diámetro pequeño, o en reducciones pequeñas de espesor por pase. *(b)* Esfuerzos residuales desarrollados en el laminado con rodillos de diámetro grande, o a altas reducciones por pase. Observe la inversión de los patrones de los esfuerzos residuales.

dustria se utilizan diversos sistemas de numeración, lo que depende del tipo de hoja metálica que se esté clasificando. Las hojas laminadas de cobre y de latón también se identifican por los cambios de espesor durante el laminado, por ejemplo, 1/4 de dureza, 1/2 dureza y así sucesivamente.

13.4 Molinos de laminación

Existen varios tipos de *molinos de laminación* y equipo con distintos arreglos de rodillos. A pesar de que el equipo para laminado en caliente es básicamente el mismo que para laminado en frío, existen importantes diferencias en materiales de los rodillos, parámetros de los procesos, lubricantes y sistemas de enfriamiento. El diseño, la construcción y la operación de los molinos de laminación (fig. 13.10) requieren grandes inversiones. Los molinos altamente automatizados producen placas y láminas de excelente calidad, con tolerancias cerradas, a altas velocidades de producción y con un bajo costo por unidad de masa, en particular cuando se integran con fundición continua. Las velocidades de laminado pueden llegar hasta 40 m/s (130 pies/s). El ancho de los productos laminados puede ser hasta de 5 m (200 pulgadas).

Se utilizan **molinos de laminación dúo** (fig. 13.3b) para laminación en caliente en los pases iniciales de ruptura (*desbaste primario* o **molinos de desbaste**) en lingotes fundidos o en fundición continua, con diámetros de rodillos que van de 0.6 a 1.4 m (24 a 55 pulgadas). En el **molino de tres rodillos** (*molino inverso*, fig. 13.3c), la dirección del movimiento del material se invierte después de cada pase mediante mecanismos elevadores y diversos manipuladores. La placa que se está laminando, que puede pesar hasta 160 toneladas, se eleva repetidamente al espacio de laminación superior y se lamina; después se baja al espacio de laminación inferior y se lamina, y así sucesivamente.

Los **molinos de cuatro rodillos** (fig. 13.3a) y los **molinos de conjunto o racimo** (**Sendzimir** o **molino Z**, fig. 13.3d) se basan en el principio de que los rodillos de diámetro pequeño reducen las fuerzas de laminado (debido a la menor área de contacto entre

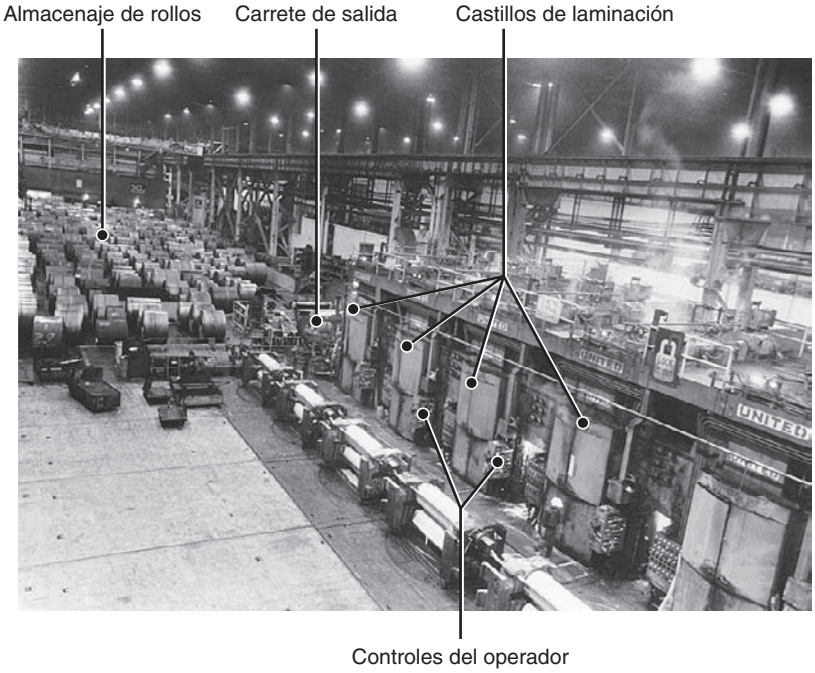


FIGURA 13.10 Vista general de un molino de laminado. *Fuente:* Cortesía de Ispat Inland.

la cinta y el rodillo) y los requisitos de potencia y reducen el ensanchado de la lámina. Además, cuando se desgastan o rompen, los rodillos pequeños se pueden reemplazar con un costo inferior al de los grandes. Por otro lado, los rodillos pequeños se doblan más que los grandes debido a las fuerzas de laminado y tienen que apoyarse en rodillos de diámetro mayor, como se hace en los molinos de cuatro rodillos y en los de conjunto. Aunque el costo de una instalación de molino Sendzimir puede ser muy alto, es particularmente apropiado para el laminado en frío de hojas delgadas de metales de alta resistencia. Las anchuras comunes laminadas en este molino son de 0.66 m (26 pulgadas), con un máximo de 1.5 m (60 pulgadas).

En el **laminado compuesto**, o en tándem, la cinta se lamina de manera continua a través de varios **castillos,** obteniendo calibres más delgados con cada pase (fig. 13.11). Cada castillo consta de un juego de rodillos con su propio bastidor y controles; a un grupo de castillos se le conoce como *tren*. El control del espesor de la cinta y la velocidad a la que viaja a través de cada espacio de laminación son críticos. Se utilizan gran cantidad de controles electrónicos y de computadora en estas operaciones, en especial en el laminado de precisión.

Materiales de los rodillos. Los requisitos básicos de los materiales para los rodillos son la resistencia y la resistencia al desgaste. Los materiales más comunes son el hierro fundido, acero fundido y acero forjado, aunque también se utilizan carburos de tungsteno para rodillos de diámetro pequeño, como el rodillo de trabajo en un molino de conjunto (fig. 13.3d). Los rodillos de acero forjado son más costosos que los rodillos fundidos, pero tienen mayor resistencia, rigidez y tenacidad que los rodillos de hierro fundido. Los rodillos para laminado en frío se rectifican para un acabado fino. También se pulen para aplicaciones especiales. Los rodillos fabricados para laminado en frío no deben utilizarse para laminado en caliente, ya que se pueden agrietar por los ciclos térmicos (*agrietamiento por calor*) y *astillado* (agrietamiento o escamado de las capas de la superficie). También debe recordarse que el módulo elástico del rodillo influye en la deflexión y el aplanado de los rodillos.

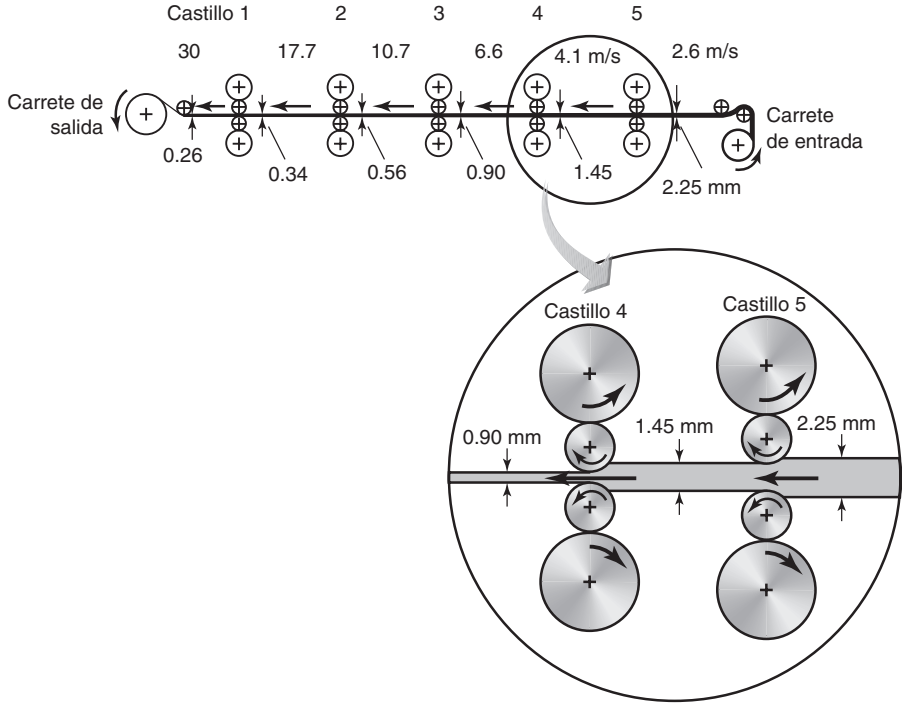


FIGURA 13.11 Ejemplo de operación de laminado compuesto o en tándem.

Por ejemplo, obsérvese que la superficie inferior de una lata de refresco hecha de aluminio tiene lo que parecen ser rayaduras longitudinales en la misma. Esto se debe a que la superficie es una réplica del acabado superficial del rodillo, que se produce mediante rectificado (ver fig. 26.2a). De esta manera, también se puede determinar con facilidad la dirección del laminado de la hoja original de aluminio.

Lubricantes. Por lo general, la laminación en caliente de aleaciones ferrosas se realiza sin lubricantes, aunque se puede utilizar grafito. Se usan soluciones a base de agua para enfriar los rodillos y romper la cascarilla en el material laminado. Las aleaciones no ferrosas se laminan en caliente con varios aceites compuestos, emulsiones y ácidos grasos. El laminado en frío se efectúa con aceites solubles en agua o lubricantes de baja viscosidad, como los aceites minerales, las emulsiones, queroseno y aceites grasos. El medio de calentamiento también puede actuar como lubricante, por ejemplo, el que se empleó al dar tratamiento térmico a palanquillas y planchones,. Las sales residuales de los baños de sales fundidas (sección 4.12) ofrecen asimismo lubricación eficaz durante el laminado.

13.5 Diversos procesos y molinos de laminación

Se han desarrollado varios procesos y molinos de laminación para producir una familia específica de formas de productos.

Laminado de formas. Las formas estructurales rectas y largas (como canales, vigas I, rieles de vías férreas y barras sólidas) se forman a temperaturas elevadas mediante *laminado de formas* (*laminado de perfiles*), en el que los materiales pasan a través de una serie de rodillos diseñados especialmente (figs. 13.12 y 13.1). El *laminado de formas en frío* también puede realizarse con materiales iniciales en forma de alambre de diferentes secciones transversales. Puesto que la sección transversal del material se reduce sin uniformidad, el diseño de una serie de rodillos (**diseño de pases en rodillos**) requiere considerable experiencia para evitar defectos externos e internos, mantener tolerancias dimensionales y reducir el desgaste de los rodillos.

Forjado laminar. En esta operación (también conocida como *laminado cruzado*), la sección transversal de una barra redonda se forma pasándola a través de un par de rodillos con estrías perfiladas (fig. 13.13). Es común utilizar el forjado laminar para producir ejes cónicos y resortes de muelles, cuchillos de mesa y herramientas manuales; también se puede usar como operación preliminar de formado, seguida de otros procesos de forjado.

Laminado oblicuo. Un proceso similar al forjado laminar es el *forjado oblicuo*, que se utiliza generalmente para hacer rodamientos de bolas (fig. 13.14a). El alambrón o la barra redonda se introducen en el espacio de laminación y se forman de manera continua piezas brutas casi esféricas por la acción de los rodillos giratorios. Otro método de formar dichas piezas para rodamientos de bolas consiste en cizallar piezas a partir de una barra redonda y después recalcarlas en cabezales (ver también fig. 14.10) entre dos matrices con cavidades hemisféricas (fig. 13.14b). Después se rectifican las bolas y se pulen en máquinas especiales (ver fig. 26.15).

Laminado de anillos. En el *laminado de anillos*, un anillo grueso se expande en uno más delgado, aunque de diámetro mayor, y se coloca entre dos rodillos, uno de los cuales se acciona mientras el otro permanece inactivo (fig. 13.15a). Su espesor se reduce al juntar los rodillos conforme van girando. Puesto que el volumen del material del anillo permanece constante durante la deformación plástica (volumen constante), la reducción de su espesor se compensa con un aumento de su diámetro. Dependiendo de su tamaño,

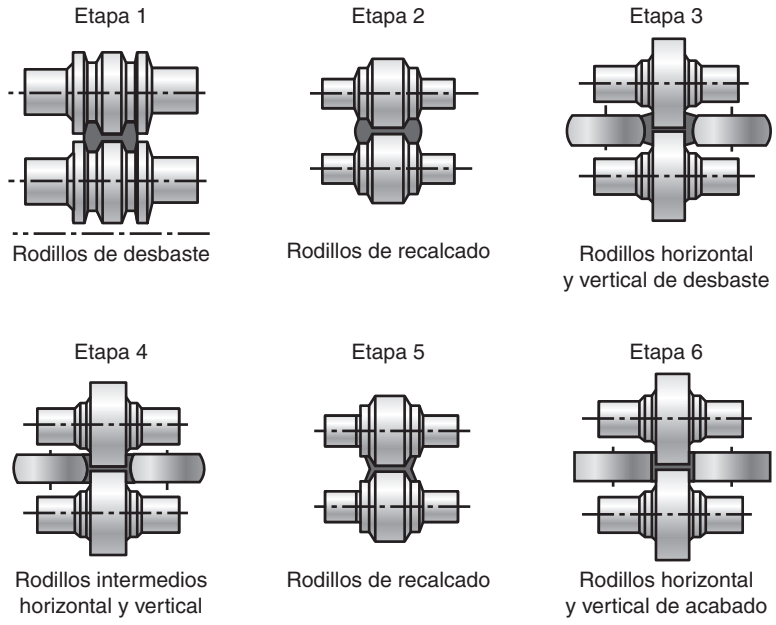


FIGURA 13.12 Pasos en la laminación de formas de una parte de una viga I. También se laminan muchas otras secciones estructurales, como canales y rieles, por medio de este tipo de proceso.

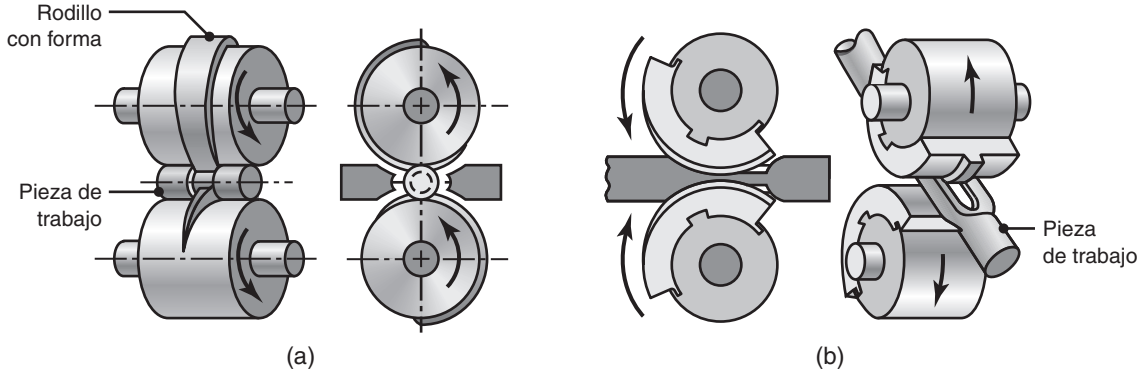


FIGURA 13.13 Dos ejemplos de operación de forjado laminar, conocida como *laminado cruzado*. Por medio de este proceso, se pueden hacer cuchillos y resortes de hoja cónica. *Fuente*: J. Holub.

la pieza bruta en forma de anillo se puede producir por medios como el corte de una placa, el perforado o el corte de un tubo de pared delgada. Mediante el laminado de anillos se pueden laminar diversas formas utilizando rodillos con forma específica (fig. 13.15). El espesor de los anillos también puede reducirse por medio de un proceso de forjado de matriz abierta, como se ilustra en la figura 14.4c; sin embargo, el control dimensional y el acabado superficial no serán tan adecuados como en el laminado de anillos.

El laminado de anillos se aplica en los anillos grandes para cohetes y turbinas, cubiertas de motores a reacción, bordes de ruedas dentadas, pistas para rodamientos de bolas y rodamientos de rodillos, bridas y anillos de refuerzo para tubos. El proceso se

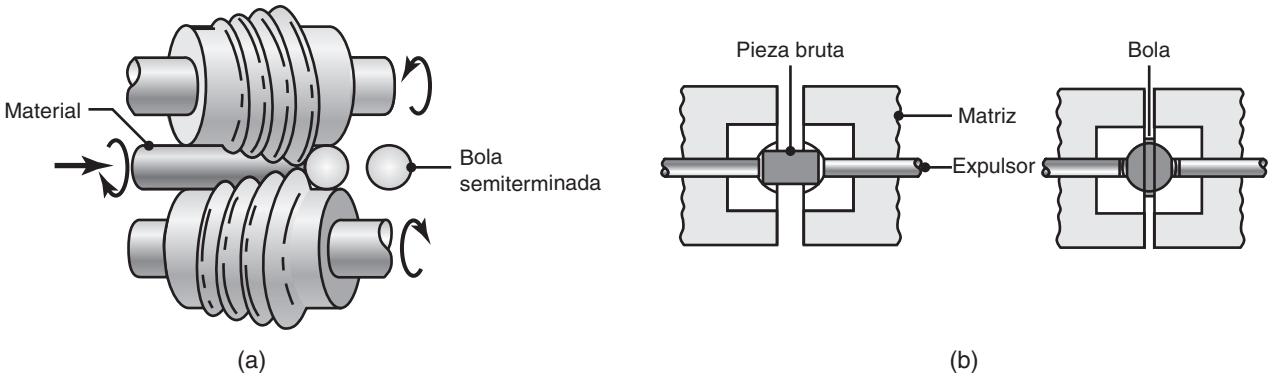


FIGURA 13.14 *(a)* Producción de bolas de acero por medio del proceso de laminado oblicuo. *(b)* Producción de bolas de acero recalcando una pieza bruta cilíndrica. Observe la formación de rebabas. Posteriormente, las bolas fabricadas mediante estos procesos se rectifican y pulen para su uso en rodamientos de bolas.

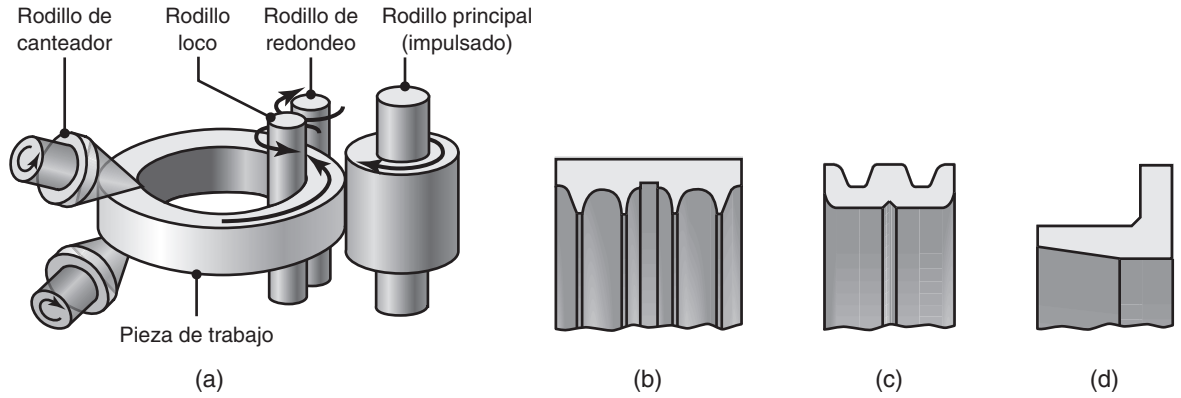


FIGURA 13.15 *(a)* Esquema de una operación de laminado de anillos. La reducción del espesor produce un aumento en el diámetro de la parte. *(b)* a *(d)* Ejemplos de secciones transversales que se pueden formar por medio de laminado de anillos.

puede efectuar a temperatura ambiente o a una temperatura elevada, lo que depende del tamaño (que puede ser hasta de 10 pies, o 3 m, de diámetro), la resistencia y ductilidad del material de la pieza de trabajo. En comparación con otros procesos de manufactura capaces de producir la misma parte, las ventajas del laminado de anillos consisten en tiempos de producción cortos, ahorros de material, cerradas tolerancias dimensionales y flujo favorable de granos en el producto, mejorando así su resistencia en la dirección deseada. El diseño de los rodillos de perfiles requiere gran experiencia. Se han desarrollado técnicas analíticas para no depender tanto de la práctica establecida y ayudar a minimizar los defectos en los productos laminados.

Laminación de roscas. La *laminación de roscas* es un proceso de formado en frío por medio del cual se forman roscas rectas o cónicas en barra redonda o alambrón, al pasarlas entre matrices. Las roscas se forman en la barra o alambrón con cada paso por un par de matrices planas reciprocantes (fig. 13.16a). En otro método, las roscas se forman con *matrices rotativas* (fig. 13.16c), a velocidades de producción que llegan a 80 piezas por segundo. Los productos típicos son tornillos, pernos y partes roscadas similares. Según el diseño de la matriz, el diámetro principal de una rosca laminada puede ser o no mayor al de una rosca maquinada (fig. 13.17a); es decir, igual que el diámetro de la

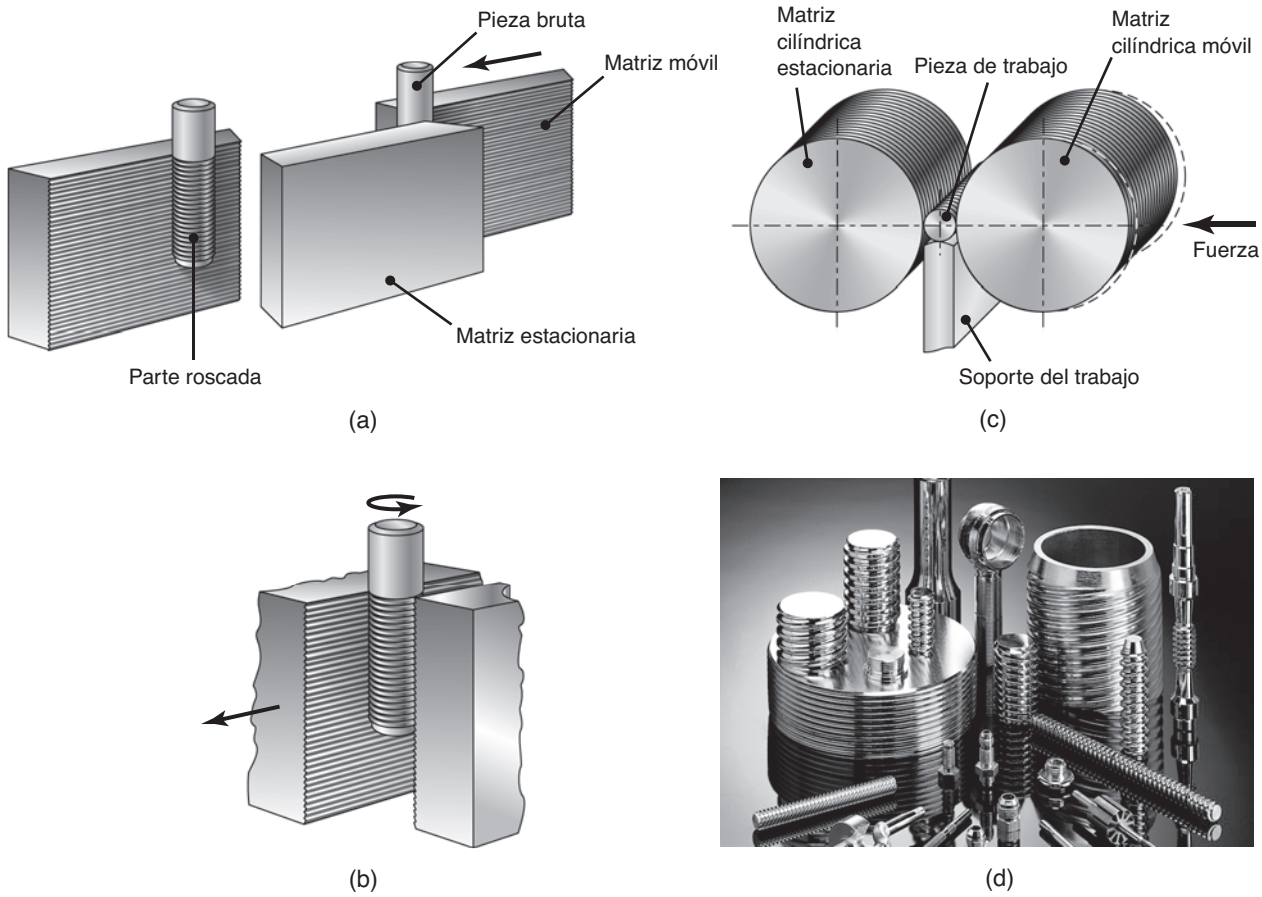


FIGURA 13.16 Procesos de laminado de roscas: *(a)* y *(b)* matrices planas reciprocantes; *(c)* matrices de doble rodillo; *(d)* colección de partes con roscas laminadas fabricadas de manera económica a altas velocidades de producción. *Fuente:* Cortesía de Tesker Manufacturing Corp.

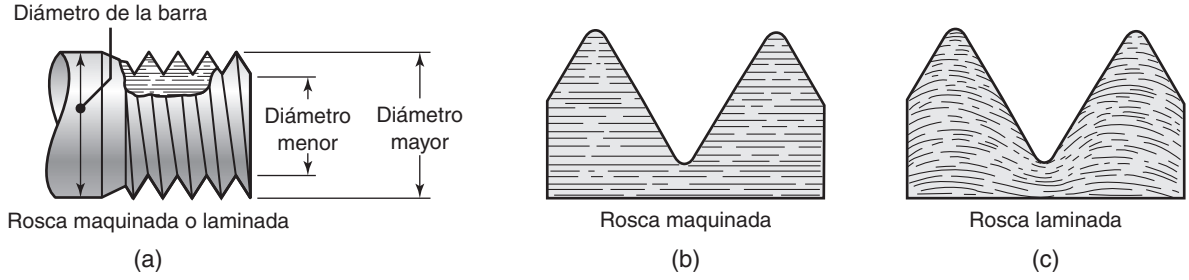


FIGURA 13.17 *(a)* Características de una rosca maquinada o laminada. Flujo de los granos en roscas *(b)* maquinadas, y *(c)* laminadas. A diferencia del maquinado, que corta a través de los granos del metal, el laminado de roscas proporciona mejor resistencia debido al trabajo en frío y al flujo favorable de los granos.

pieza bruta. El proceso de laminación de roscas también tiene la capacidad de generar otras formas, como estrías y diversos engranes, y se utiliza en la producción de casi todos los sujetadores roscados a altas velocidades de producción.

El proceso de laminación de roscas tiene la ventaja de generar roscas con buena resistencia (debido al trabajo en frío) y sin ninguna pérdida de material (desperdicio). El

acabado superficial producido es muy liso y el proceso induce a esfuerzos residuales compresivos en las superficies de la pieza de trabajo, mejorando así su resistencia a la fatiga. La laminación de roscas es superior a otros métodos de manufactura de roscas porque produce un patrón de flujo de grano que mejora la resistencia de la rosca (fig. 13.17), mientras que con el maquinado de las roscas se corta a través de las líneas del flujo de los granos del material.

Se pueden producir engranes rectos y helicoidales por medio de procesos de laminado en frío similares al laminado de roscas (ver también la sección 24.7). El proceso puede realizarse en piezas brutas cilíndricas sólidas o en engranes precortados. El laminado en frío de los engranes tiene diversas aplicaciones en transmisiones automáticas y en herramientas eléctricas. La **laminación de roscas internas** se puede efectuar con un **macho de roscado** (o machuelo) sin acanaladura. Esta operación es similar a la laminación de roscas externas y produce roscas internas exactas, con buena resistencia.

La lubricación es importante en las operaciones de laminación de roscas para obtener un buen acabado e integridad de la superficie y para minimizar los defectos. Afecta la manera en que el material se deforma durante la deformación plástica; esto debe tomarse en consideración, por la posibilidad de que se desarrollen defectos internos (por ejemplo, ver fig. 14.16). Generalmente hechas de acero endurecido, las matrices de laminación son costosas debido a su forma compleja. Por lo común, no pueden volver a rectificarse una vez que se desgastan. Sin embargo, con los materiales y la preparación apropiados, la vida de la matriz puede prolongarse por millones de piezas.

Perforado rotativo de tubo. También conocido como **proceso Mannesmann**, es una operación de trabajo en caliente para hacer *tubería y tubos sin costura* largos y de pared delgada (fig. 13.18). Desarrollado en la década de 1880, este proceso se basa en el principio de que cuando una barra redonda se somete a fuerzas radiales de compresión, se desarrollan esfuerzos de tensión en su centro (ver fig. 2.9). Cuando se somete de manera continua a estos esfuerzos cíclicos de compresión (ver fig. 13.18b), la barra empieza a desarrollar una pequeña cavidad en el centro que comienza a crecer. (Este fenómeno se puede demostrar con una pieza corta y redonda de goma para borrar, si se rueda adelante y atrás sobre una superficie dura plana, como se muestra en la fig. 13.18b).
El perforado rotativo de tubo se realiza mediante un arreglo de rodillos giratorios (fig. 13.18c). Los ejes de los rodillos se *inclinan* para jalar la barra redonda a través de ellos por medio del componente axial del movimiento giratorio. Un mandril interno promueve la operación ampliando el orificio y dimensionando el diámetro interior del tubo; se puede mantener en su lugar con una barra larga, o puede ser un mandril flotante sin soporte. La severa deformación que sufre la barra obliga a que el material sea de alta cali-

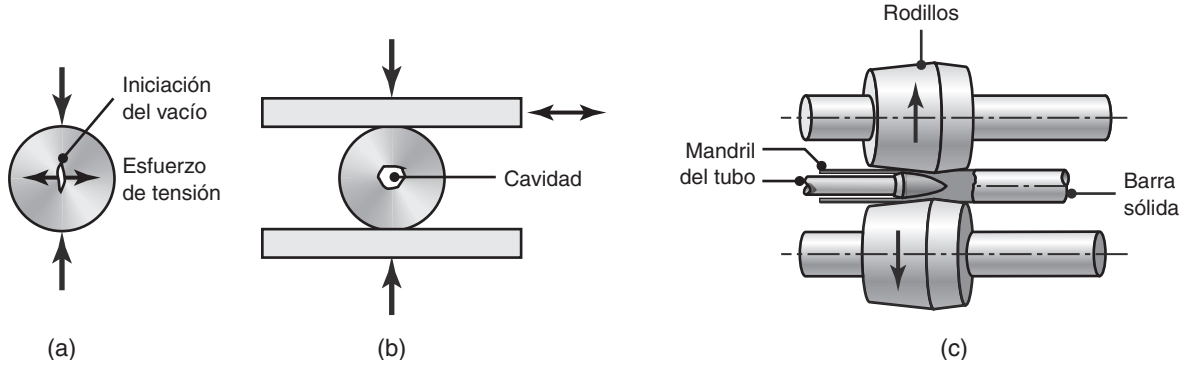


FIGURA 13.18 Formación de una cavidad en una barra redonda sólida y su utilización en el proceso de perforado rotativo de tubo para hacer tubos y tubería sin costura. (Ver también fig. 2.9).

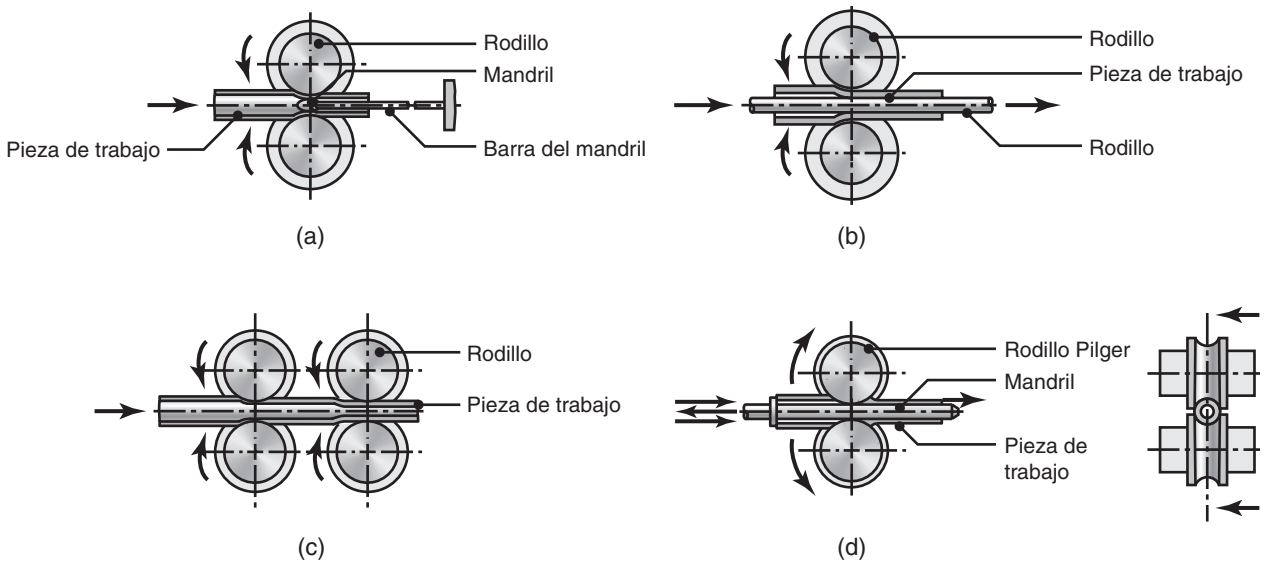


FIGURA 13.19 Esquema de diferentes procesos de laminado de tubos: *(a)* con mandril fijo; *(b)* con mandril flotante; *(c)* sin mandril, y *(d)* laminado Pilger con un mandril y un par de rodillos de forma. También se pueden cambiar los diámetros y espesores de los tubos mediante otros procesos, como estirado, extrusión y torcido.

dad y no tenga defectos (ya que se pueden propagar con rapidez y provocar fallas prematuras de la parte durante el formado).

Laminado de tubos. El diámetro y espesor de los tubos y la tubería se puede reducir mediante el *laminado de tubos*, que utiliza rodillos con forma (fig. 13.19). Algunas de estas operaciones pueden realizarse con mandril interno o sin él. En el *molino de laminación Pilger*, el tubo y el mandril interno se someten a un movimiento reciprocante; a los rodillos se les da una forma específica y se giran de manera continua. Durante el ciclo de espaciamiento de los rodillos, el tubo avanza y gira, iniciando otro ciclo de reducción. Como consecuencia, sufre una reducción de diámetro y de espesor de pared. La tubería de acero de 265 mm (10.5 pulgadas) de diámetro se produce mediante este proceso. En el capítulo 15 se describen otras operaciones para la manufactura de tubos.

13.5.1 Diferentes molinos

Molinos integrados. Estos molinos son instalaciones grandes que comprenden la integración total de las actividades: desde la producción del metal caliente en un alto horno hasta la fundición y el laminado de los productos terminados, listos para enviarse al cliente.

Minilaminadores. La competencia en la industria del acero ha llevado al desarrollo de los *minilaminadores*, en los que el desperdicio de metal *(a)* se funde en hornos de arco eléctrico, *(b)* se funde de manera continua, y *(c)* se lamina de modo directo como líneas específicas de productos. Cada minilaminador produce un tipo de producto laminado (varilla, barra o secciones estructurales como el ángulo de hierro) básicamente de un tipo de metal o aleación. En general, el desperdicio de metal, que se obtiene a nivel local (para reducir los costos de transporte), consiste en maquinaria, automóviles y equi-

po agrícola viejos. Los minilaminadores tienen ventajas económicas como las operaciones óptimas con baja inversión para cada tipo de metal y línea de productos y los bajos costos de mano de obra y energía. Por lo común, los productos se orientan a mercados en el área geográfica específica del molino.

ESTUDIO DE CASO 13.1 Manufactura de segmentos de cubierta de un motor cohete de combustible sólido para un transbordador espacial

Los transbordadores espaciales de Estados Unidos son naves muy complejas que requieren una extensa ingeniería en diseño y manufactura. Sus componentes son altamente especializados y se someten a condiciones extremas durante el vuelo. Para elevar el orbitador al espacio, un transbordador espacial emplea dos grandes cohetes impulsores cilíndricos de combustible sólido, atados, como se observa en la figura 13.20, que también muestra el lanzamiento del transbordador espacial *U.S.S. Atlantis*. Cada impulsor proporciona una fuerza de empuje de 3.3 millones de libras para el despegue y ascenso. Los cohetes impulsores constan de segmentos de cubierta de acero que contienen el propulsor de combustible sólido del cohete y actúan como recipientes a presión muy elevada durante el lanzamiento.

La manufactura de los segmentos de la cubierta de acero es muy desafiante y requiere una serie de procesos y equipo especiales (fig. 13.21). Dichos segmentos tienen un diámetro de unos 3 m (120 pulgadas), 3 m (120 pulgadas) de largo y menos de 13 mm (0.5 pulgada) de espesor. La tolerancia dimensional en el espesor es de 0.25 mm (0.010 pulgada). Para esta aplicación de recipiente a presión se necesita una sección de pared muy delgada y controlada de manera estricta. Sin embargo, los segmentos de la cubierta son tan grandes que el peso final del componente se aproxima mucho al límite de peso de las instalaciones para la fusión y fundición de acero con grado especial en lingotes que se utilizan como material inicial (pieza bruta). Por lo tanto, es indispensable que se desperdicie o descarte muy poco material durante el proceso de manufactura.



FIGURA 13.20 Lanzamiento del transbordador espacial *U.S.S. Atlantis* por medio de dos cohetes impulsores de combustible sólido amarrados. *Fuente:* Cortesía de la NASA.

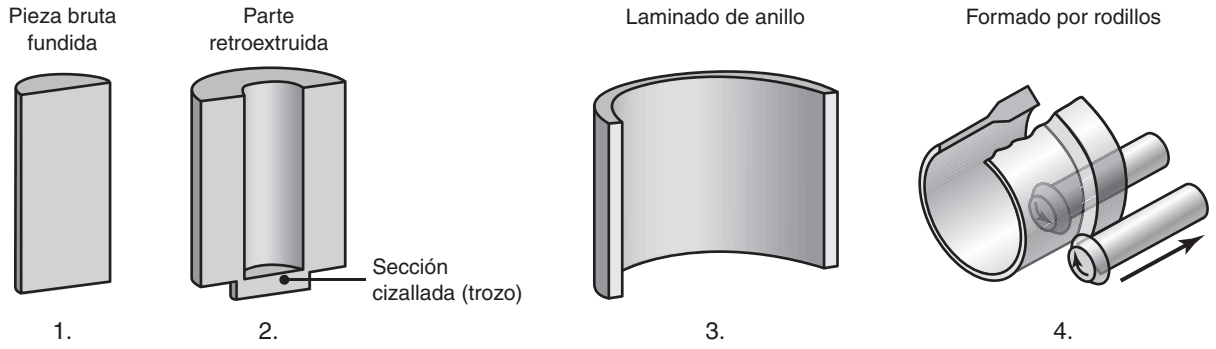


FIGURA 13.21 Procesos de formado comprendidos en la manufactura de cubiertas para cohetes de combustible sólido para los transbordadores espaciales.

Los requisitos de las propiedades mecánicas para estos componentes indican que se debe utilizar acero extremadamente limpio para eliminar los defectos propios de los materiales fundidos. Primero se funde acero Ladish D6AC, con una resistencia máxima a la tensión de 1500-1700 MPa (220-250 ksi), en lingotes grandes, de máxima calidad y fundidos al vacío. Debido a la necesidad de ahorrar material, el tamaño de los lingotes de acero es muy cercano al peso de los componentes terminados, por lo que tienen que incorporarse pasos de manufactura de uso eficiente del material. Para transformar el lingote fundido en sus componentes finales cilíndricos, se aplican varios de estos pasos: *(a)* recalcado, *(b)* extrusión, *(c)* laminado de anillos, *(d)* formado por laminación, *(e)* maquinado y *(f)* tratamiento térmico.

Primero se utiliza la extrusión indirecta (retroextruida o invertida) (ver fig. 15.3), a fin de producir una forma casi cilíndrica para los segmentos de la cubierta a partir del lingote fundido. En este proceso se recalca el lingote (ver fig. 14.3) y después se introduce, mediante una prensa, un troquel central grande en la pieza bruta de acero recalcada. Conforme se prensa el troquel en el centro del metal calentado, éste se extruye hacia atrás, entre el troquel móvil y el contenedor. Se retira el cilindro inicial, se extrae del contenedor y se retira el trozo delgado de material que queda debajo del troquel, al final de la operación, mediante cizallado en caliente (ver fig. 16.2).

El cilindro caliente se coloca después en una máquina grande de laminado de anillos, en la que se lamina el anillo (ver fig. 13.15) para obtener la forma adecuada. Este proceso reduce el espesor de pared del cilindro al tiempo que aumenta su diámetro. La longitud del cilindro se mantiene constante por medio de rodillos de contención o rodillos de apriete sobre las caras frontales, con el propósito de evitar que el material fluya en esa dirección. El cilindro laminado tiene un contorno que incluye las bridas frontales y el recipiente a presión central. Después de terminar esta operación, se maquina el cilindro para eliminar todas las escamas (del trabajo en caliente) y producir un acabado liso, uniforme y brillante. El diseño de este paso busca eliminar una cantidad mínima de material y producir una forma que esté lista para la operación de formado final.

El cilindro maquinado se procesa luego mediante el formado por laminación (también conocido como formado por flujo o rechazado, ver sección 16.9) para producir las paredes finales de los recipientes a presión. Este proceso se realiza a temperatura ambiente por medio de dos rodillos opuestos, con lo que la sección de la pared se reduce, el diámetro del cilindro permanece constante y su longitud aumenta. Así, la pared del cilindro se reduce en frío a su espesor neto final. Después se le da tratamiento térmico mediante normalizado, austenitizado, temple y revenido. Sólo las bridas en los extremos de los segmentos de la cubierta requieren algún maquinado final para ensamblarlas en el cohete.

Los pasos de manufactura descritos se han optimizado respecto de los requisitos y restricciones particulares para esta aplicación. Éstos incluyen *(a)* un material limpio, de alta resistencia a la tensión, *(b)* una geometría de los componentes sin defectos y que se pueda inspeccionar, *(c)* una pérdida mínima de material original, y *(d)* un proceso de manufactura estable, robusto y reproducible.
Fuente: Cortesía de D. Furrer, Ladish Co., Inc.

RESUMEN

- El laminado es el proceso de reducción del espesor —o cambio de la sección transversal— de una cinta larga mediante fuerzas de compresión aplicadas con una serie de rodillos. Además del laminado plano, se utiliza el laminado de formas para fabricar productos con diversas secciones transversales. Los productos fabricados por laminado incluyen *(a)* placa, lámina, hoja delgada, barra, tubo sin costura y tubería; *(b)* productos por laminado de forma, como vigas I y perfiles estructurales, y *(c)* barras de diversas secciones transversales. Otras operaciones de laminado incluyen la laminación de anillos y el laminado de roscas.
- El laminado se puede efectuar a temperatura ambiente (laminado en frío) o a temperaturas elevadas (laminado en caliente). El proceso comprende numerosas variables de materiales y procesos, incluyendo el diámetro de los rodillos (en relación con el espesor del material), la reducción por pase, la velocidad, la lubricación y la temperatura. El ensanchado, el doblado y el aplanado son aspectos que deben considerarse para controlar la precisión dimensional del material laminado.
- Los molinos de laminación tienen varias configuraciones, como laminación dúo, de tres rodillos, de cuatro rodillos y de conjunto (Sendzimir), además del laminado compuesto o de tándem. Se puede aplicar tensión frontal o posterior al material para reducir las fuerzas de laminado.
- La fundición y el laminado continuos de metales ferrosos y no ferrosos en productos semiterminados se han convertido en una práctica común debido a sus beneficios económicos.
- Los molinos integrados son instalaciones grandes que comprenden la secuencia completa de las actividades, desde la producción del metal caliente en un alto horno hasta la fundición y el laminado de productos terminados, listos para su envío al cliente. En una escala mucho menor, los minilaminadores utilizan desperdicio de metal que se funde en hornos de arco eléctrico, se cuela y se lamina de manera continua en líneas específicas de producción.

TÉRMINOS CLAVE

Acocodrilado
Castillo
Comba
Corona
Ensanchado
Estructura fundida
Estructura maleable
Forjado laminar
Hoja delgada
Lámina
Laminación de relevado
Laminación de roscas
Laminación en caliente
Laminación plana
Laminado
Laminado compuesto o de tándem
Laminado de anillos
Laminado de forma
Laminado de tubos
Laminado en caliente
Laminado en conjunto
Laminado en frío
Laminado oblicuo
Laminado Steckel
Minilaminador
Molino de desbaste
Molino de laminación
Molino de laminación Pilger
Molino Sendzimir
Número de calibre

Palanquilla
Perforado rotativo de tubo
Placa
Planchón
Proceso Mannesmann
Punto neutral
Reducción
Rodillo
Soporte de rodillo
Tensión delantera
Tensión trasera
Tocho (“bloom”)

BIBLIOGRAFÍA

Blazynski, T. Z., *Plasticity and Modern Metal-forming Technology*, Elsevier, 1989.

Ginzburg, V. B., *High-Quality Steel Rolling: Theory and Practice*, Marcel Dekker, 1993.

_____, *Steel-Rolling Technology: Theory and Practice*, Marcel Dekker, 1989.

Hosford, W. F. y Caddell, R. M., *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*, 2ª. ed., Prentice Hall, 1993.

Lange, K. (ed.), *Handbook of Metal Forming*, McGraw-Hill, 1985.

Roberts, W. L., *Cold Rolling of Steel*, Marcel Dekker, 1978.

_____, *Hot Rolling of Steel*, Marcel Dekker, 1983.

PREGUNTAS DE REPASO

13.1 ¿Cuál es la diferencia entre una placa y una lámina?

13.2 Defina: (a) espacio de laminación, (b) punto neutro, y (c) reducción.

13.3 ¿Qué factores contribuyen al ensanchado en el laminado plano?

13.4 Explique los tipos de deflexión a los que se someten los rodillos.

13.5 Describa la diferencia entre un tocho o “bloom”, un planchón y una palanquilla.

13.6 ¿Por qué es necesario nivelar los rodillos?

13.7 Liste los defectos comúnmente observados en el laminado plano.

13.8 ¿Cuáles son las ventajas del laminado compuesto? ¿Y las del laminado en conjunto?

13.9 Liste algunas partes que se puedan fabricar mediante (a) laminado de forma, y (b) laminado de roscas.

13.10 ¿Cómo se producen los tubos sin costura?

13.11 ¿Por qué el acabado superficial de un producto laminado es mejor en laminado en frío que en laminado en caliente?

13.12 ¿Cuál es el molino Sendzimir? ¿Cuáles son sus características importantes?

13.13 ¿Qué se hace comúnmente para asegurar que el producto en laminado plano no tenga coronas?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

3.14 Explique por qué se inventó y desarrolló el proceso de laminado.

13.15 El laminado plano reduce el espesor de placas y láminas. Por otro lado, también es posible reducir el espesor simplemente estirando el material. ¿Sería éste un proceso factible? Explique su respuesta.

13.16 Explique cómo se invierten los patrones de esfuerzos residuales mostrados en la figura 13.9 cuando se cambia el radio del rodillo o la reducción por pase.

13.17 Explique si sería práctico aplicar la técnica de nivelación de rodillos mostrada en la figura 13.7 a placas gruesas.

13.18 Describa los factores que influyen en la magnitud de la fuerza de laminado (F) en la figura 13.2c.

13.19 Explique cómo aplicaría las tensiones delantera y trasera a hojas metálicas durante el laminado. ¿Cómo haría para controlar estas tensiones?

13.20 Hicimos notar que los rodillos tienden a aplanarse bajo las fuerzas de laminado. Describa los métodos por los cuales se puede reducir el aplanamiento. ¿Qué propiedad o propiedades del material del rodillo se pueden aumentar para reducir el aplanamiento?

13.21 Se indicó que el ensanchado en el laminado plano aumenta con *(a)* la reducción de la relación anchura a espesor del material de entrada, *(b)* la reducción de la fricción, y *(c)* la reducción de la relación de radio del rodillo a espesor de la cinta. Explique por qué.

13.22 Como se indicó en este capítulo, el laminado plano se puede efectuar sólo mediante tensión delantera, utilizando rodillos inactivos (laminado Steckel). Puesto que el torque en los rodillos es cero ahora, ¿entonces de dónde proviene la energía para suministrar el trabajo de deformación en el laminado?

13.23 ¿Cuál es la consecuencia de aplicar una tensión posterior demasiado alta en el laminado?

13.24 En la figura 13.3d, observe que los rodillos impulsados (rodillos motorizados) son el tercer conjunto del rodillo de trabajo. ¿Por qué no se aplica potencia por medio de este último rodillo? ¿Es posible? Explique su respuesta.

13.25 Describa la importancia de controlar las velocidades de los rodillos, los espacios de laminación, la temperatura y otras variables del proceso en una operación de laminado compuesto o de tándem, como se muestra en la figura 13.11. Explique cómo determinaría la distancia entre las estaciones.

13.26 En la figura 13.9a, si retira la capa superior a compresión mediante, digamos, rectificado, ¿la cinta permanecerá plana? Si no es así, ¿de qué manera se curvaría y por qué?

13.27 Nombre varios productos que se puedan fabricar por medio de cada una de las operaciones mostradas en la figura 13.1.

13.28 Liste las posibles consecuencias de laminar *(a)* a una velocidad demasiado alta, y *(b)* a una velocidad demasiado baja.

13.29 Describa sus observaciones en relación con la figura 13.12.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

13.30 Utilizando relaciones geométricas simples y el principio de plano inclinado para la fricción, demuestre la ecuación 13.1.

13.31 Estime la fuerza de laminado (F) y el torque para una cinta de acero al carbón AISI 1020 que tiene 200 mm de ancho y 10 mm de espesor y que se lamina a un espesor de 7 mm. El radio del rodillo es de 200 mm y gira a 200 rpm.

13.32 En el ejemplo 13.1, calcule la fuerza y potencia de laminado para el caso en el que el material de la pieza de trabajo sea aluminio 1100-O y el radio del rodillo R de 10 pulgadas.

13.33 Calcule las reducciones individuales en cada uno de los castillos en la operación de laminado compuesto mostrada en la figura 13.11.

13.34 Suponga que es un instructor que cubre los temas descritos en este capítulo y está haciendo un examen sobre los aspectos cuantitativos, para poner a prueba los conocimientos de los estudiantes. Prepare dos problemas cuantitativos y dé las respuestas

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

13.35 En la figura 13.3a se muestra un simple esquema para un castillo de cuatro rodillos. Investigue en la literatura técnica y presente un esquema más detallado de dicha estación, que muestre los componentes principales.

13.36 Consiga un pedazo de goma suave y redonda de hule para borrar, como la de los lápices, y reproduzca el proceso mostrado en la figura 13.18b. Observe cómo empieza a erosionarse la parte central de la goma, produciendo un orificio.

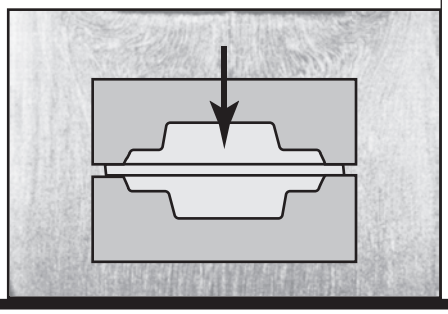
13.37 Si repite el experimento del problema 13.36 con una goma más dura, como la utilizada para tinta, observará que toda la goma empieza a agrietarse y desmoronarse. Explique las razones.

13.38 Diseñe una serie de rodillos para producir secciones transversales distintas de las mostradas en la figura 13.12.

Forjado de metales

CAPÍTULO

14



En este capítulo se examinan los fundamentos de los procesos de forjado y los relacionados con ellos, incluyendo las consideraciones de diseño y económicas. Se incluyen los siguientes temas:

- Operaciones de forjado de matriz abierta para producir formas simples.
- Operaciones de forjado de matriz de impresión y en matriz cerrada para producir formas más intrincadas.
- Diversas operaciones de forjado, como cabeceado, penetrado, acuñado, estampado y extrusión en frío.
- Defectos del forjado y fallas de las matrices y sus causas.
- Economía del forjado en lo que se refiere a la selección de procesos.
- Diseño de piezas forjadas, diseño y manufactura de matrices y selección de materiales y lubricantes.

Partes típicas fabricadas por medio del forjado y otros procesos relacionados con él: flechas de transmisión, engranes, tornillos, álabes de turbinas, herramientas manuales, dados y componentes para maquinaria, transportación e implementos agrícolas.

Procesos alternativos: fundición, metalurgia de polvos, maquinado y fabricación.

14.1 Introducción 371
14.2 Forjado de matriz abierta 373
14.3 Forjado por matriz de impresión y de matriz cerrada 376
14.4 Diversas operaciones de forjado 380
14.5 Forjabilidad de los metales. Defectos del forjado 384
14.6 Diseño de matrices, materiales para matrices y lubricación 387
14.7 Métodos de manufactura de matrices. Fallas en las matrices 388
14.8 Máquinas para forjado 390
14.9 Economía del forjado 392

EJEMPLO:

14.1 Cálculo de la fuerza de forjado en el recalcado 375

ESTUDIO DE CASO:

14.1 Manufactura de un perno escalonado mediante cabeceado y penetrado 382
14.2 Componentes de la suspensión del automóvil Lotus Elise 394

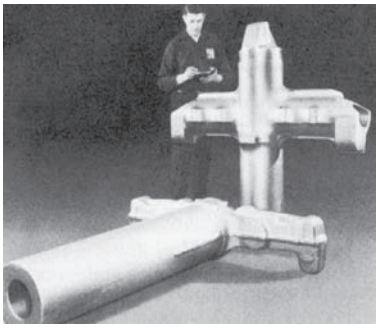
14.1 Introducción

El **forjado** es un proceso básico en el que la pieza de trabajo se moldea mediante fuerzas de compresión aplicadas por medio de matrices y herramentales. Es una de las operaciones más antiguas e importantes en el trabajo de metales; se remonta al año 4000 a.C. y se utilizó por primera vez para realizar joyería, monedas y diversos implementos martillando el metal con herramientas hechas de piedra. En la actualidad, las partes forjadas incluyen grandes rotores para turbinas, engranes, tornillos y remaches, cuchillería (fig. 14.1a), herramientas manuales, diversos componentes estructurales para maquinaria, aeronaves (fig. 14.1b y c) y vías férreas, así como otros equipos de transporte.

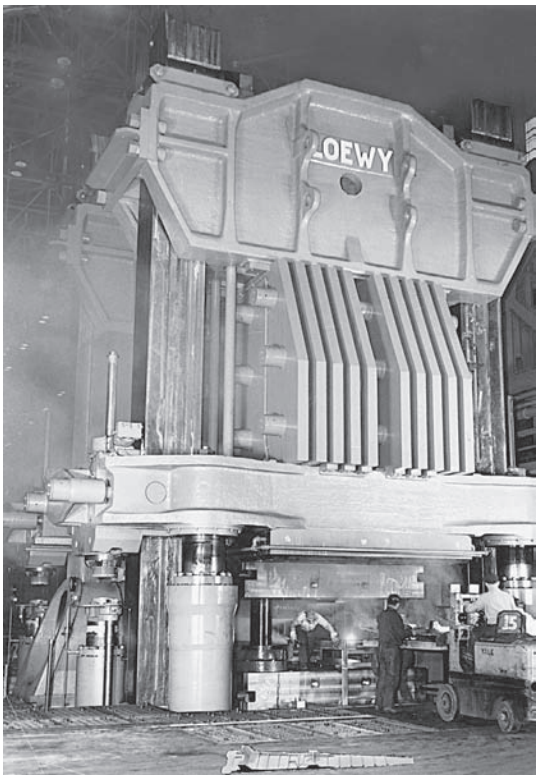
A diferencia de las operaciones de laminado descritas en el capítulo 13, que por lo general producen placas, láminas, cintas o varias secciones transversales estructurales continuas, las operaciones de forjado producen *partes discretas*. Debido a que es posible controlar el flujo de metal en una matriz y la estructura de los granos del material, las partes forjadas tienen buena resistencia y tenacidad y son muy confiables en aplicaciones críticas sujetas a grandes esfuerzos (fig. 14.2). Las operaciones de forjado simple se pueden



(a)

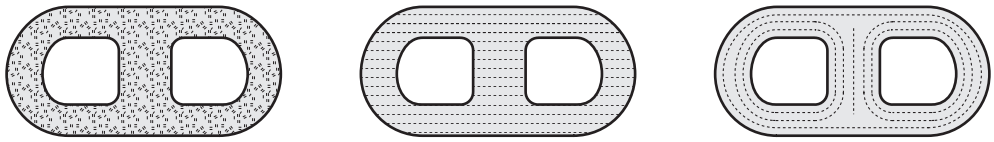


(b)



(c)

FIGURA 14.1 *(a)* Esquema de los pasos comprendidos en el forjado de un cuchillo. *(b)* Componentes hechos mediante forjado del tren de aterrizaje para el avión de transporte C5A y C5B. *(c)* Vista general de una prensa hidráulica de 445 MN (50,000 toneladas). *Fuente*: *(a)* Cortesía de Mundial LLC. *(b)* y *(c)* Cortesía de Wyman-Gordon Company.



(a) (b) (c)

FIGURA 14.2 Esquema de una parte fabricada mediante tres procesos, que muestra el flujo de los granos. *(a)* Fundición por medio de los procesos descritos en el capítulo 11. *(b)* Maquinado de una pieza en bruto, como se describe en la parte IV de este libro, y *(c)* forjado. Cada proceso tiene sus propias ventajas y limitaciones respecto de las características externas e internas, propiedades de los materiales, precisión dimensional, acabado superficial y economía de producción. *Fuente:* Cortesía de Forging Industry Association.

realizar con un martillo pesado y un yunque, como lo hacen tradicionalmente los herreros. Sin embargo, la mayoría de las forjas requieren una serie de matrices y equipo como prensa y martillo mecánico de forja.

El forjado puede efectuarse a temperatura ambiente (*forjado en frío*) o a temperaturas elevadas (*forjado a temperatura media o en caliente*), dependiendo de la temperatura (ver sección 1.7). El forjado en frío requiere fuerzas más grandes, debido a la mayor resistencia del material de la pieza de trabajo, y éste debe poseer suficiente ductilidad a tempe-

ratura ambiente para someterse a la deformación necesaria sin que se agriete. Las partes forjadas en frío tienen un buen acabado superficial y precisión dimensional. En cambio, el forjado en caliente requiere menores fuerzas, pero la precisión dimensional y el acabado superficial de las partes no son tan elevados como en el forjado en frío.

Por lo general, las partes forjadas se someten a operaciones de acabado adicionales, como el tratamiento térmico, para modificar sus propiedades, y el maquinado, a fin de obtener dimensiones finales exactas y acabado superficial. El *forjado de precisión*, que es un ejemplo importante de los procesos de formado de *formas netas* o *formas casi netas*, puede minimizar esas operaciones de acabado. Como veremos a lo largo del libro, los componentes que se pueden forjar con éxito también pueden fabricarse de manera económica mediante otros métodos, como la fundición (capítulo 11), la metalurgia de polvos (capítulo 17) o el maquinado (parte IV). Cada uno de ellos produce una parte que tiene diferentes características, sobre todo en relación con la resistencia, tenacidad, precisión dimensional, acabado superficial y la posibilidad de defectos internos o externos.

14.2 Forjado de matriz abierta

El *forjado de matriz abierta* es la operación más simple de forjado (tabla 14.1). Aunque por lo general la mayoría de las partes forjadas de matriz abierta pesan de 15 a 500 kg (30 a 1000 libras), se han forjado piezas con un peso hasta de 300 toneladas. Las partes pueden ser muy pequeñas, como los clavos, pernos y tornillos, o muy grandes (como los ejes hasta de 23 m [75 pies] de longitud para propulsores de barcos). El forjado de matriz abierta se puede representar mediante una pieza de trabajo sólida colocada entre dos matrices planas y cuya altura se reduce por compresión (fig. 14.3a), proceso que también se conoce como **recalcado** o **forjado con matriz plana**. Asimismo, las superficies de la matriz pueden tener cavidades poco profundas o incorporar rasgos para producir forjas relativamente simples.

En la figura 14.3b se muestra la deformación de la pieza de trabajo en *condiciones sin fricción*. Puesto que el volumen se mantiene constante, cualquier reducción de la al-

TABLA 14.1

Características generales de los procesos de forjado

Proceso	Ventajas	Limitaciones
Matriz abierta	Matrices simples y poco costosas; amplia gama de tamaños de partes; buenas características de resistencia; por lo general para cantidades pequeñas.	Limitado a formas simples; es difícil mantener tolerancias cerradas; es necesario maquinar para dar forma final; velocidad de producción baja; utilización relativamente deficiente del material; requiere alto grado de habilidad.
Matriz cerrada	Uso de material relativamente adecuado; por lo general con mejores propiedades que los forjados de matriz abierta; buena precisión dimensional; altas velocidades de producción; buena reproducibilidad.	Alto costo de la matriz, no económico para cantidades pequeñas; con frecuencia es necesario el maquinado.
De aproximación o bloqueo	Costos bajos de matriz; altas velocidades de producción.	Es necesario maquinado para dar forma final; partes con almas gruesas y filetes grandes.
Convencional	Requiere mucho menos maquinado que el tipo de aproximación; altas velocidades de producción; utilización adecuada del material.	Costo de la matriz más elevado que el del tipo de aproximación.
De precisión	Tolerancias dimensionales cerradas; es posible producir almas muy delgadas y rebordes; generalmente no es necesario el maquinado; muy buena utilización del material.	Fuerzas elevadas de forjado; matrices intrincadas y previsiones para extraer la forja de las matrices.

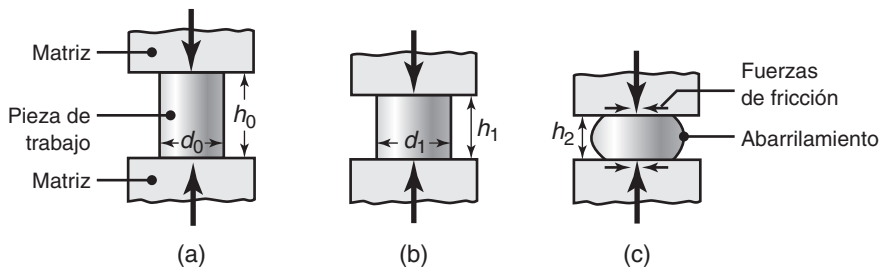


FIGURA 14.3 *(a)* Tocho cilíndrico sólido recalcado entre dos matrices planas. *(b)* Deformación uniforme del tocho sin fricción. *(c)* Deformación con fricción. Obsérvese el abarrilamiento del tocho causado por las fuerzas de fricción en las interfaces entre el tocho y la matriz.

tura aumenta el diámetro de la parte forjada. Obsérvese en la figura 14.3b que la pieza de trabajo se deforma *de manera uniforme*. Sin embargo, en las operaciones reales sí existe fricción y la parte desarrolla una forma de *barril* (fig. 14.3c), deformación también conocida como *colapsado*.

El **abarrilamiento** se produce principalmente por las fuerzas de fricción en las interfaces matriz-pieza de trabajo que se oponen al flujo exterior de los materiales en estas interfaces y que, por lo tanto, se pueden minimizar con un lubricante eficaz. El abarrilamiento también puede desarrollarse al recalcar piezas de trabajo calientes entre matrices frías. El material en las superficies de la matriz, o cerca de ellas, se enfría con rapidez, en tanto que el resto de la pieza de trabajo permanece relativamente caliente. En consecuencia, el material en las partes superior e inferior de dicha pieza tiene mayor resistencia a la deformación que el de la parte central. Por lo tanto, la parte central de la pieza se dilata hacia los lados más que en sus extremos. El abarrilamiento que se produce por los efectos térmicos puede reducirse o eliminarse mediante matrices calientes. Para este propósito, también es posible utilizar barreras térmicas, como la tela de vidrio, en las interfaces entre la matriz y la pieza de trabajo.

La **forja de desbaste** (también conocida como *estirado*) es una operación de forjado de matriz abierta en la que el espesor de una barra se reduce por medio de pasos sucesivos de forjado (*reducciones*) a intervalos específicos (fig. 14.4a). Se puede reducir el espesor de barras y anillos mediante técnicas similares de forjado de matriz abierta, como se muestra en la figura 14.4b y c. Debido a que el área de contacto entre la matriz y la pieza de trabajo es pequeña, puede reducirse el espesor de una sección larga de una barra sin requerir grandes fuerzas o maquinaria pesada. Los herreros efectúan dichas ope-

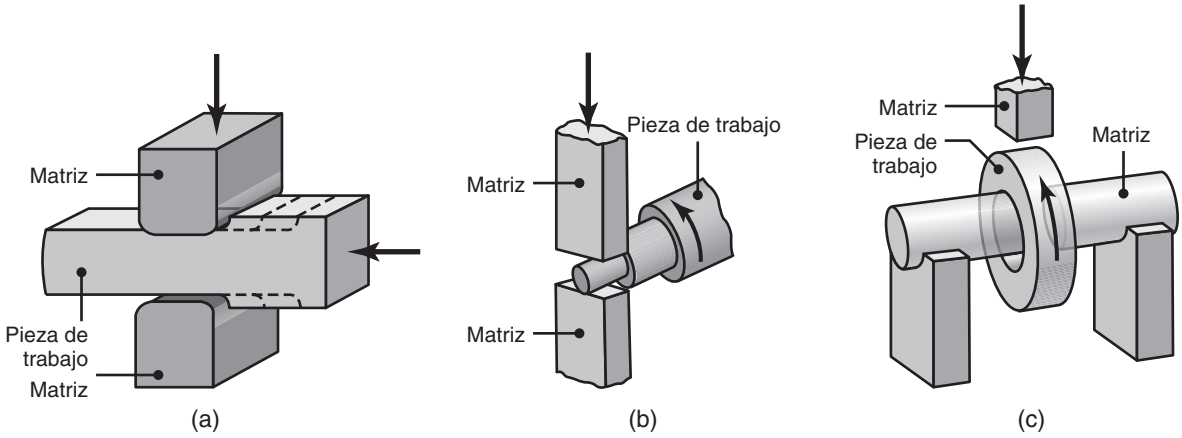


FIGURA 14.4 *(a)* Esquema de una operación de forja de desbaste en una barra rectangular. Los herreros utilizan este proceso para reducir el espesor de las barras martillando la parte sobre un yunque. La reducción de espesor va acompañada de abarrilamiento, como en la figura 14.3c. *(b)* Reducción del diámetro de una barra mediante forjado en matriz abierta; obsérvese los movimientos de las matrices y de la pieza de trabajo. *(c)* Espesor de un anillo que se reduce mediante forjado de matriz abierta.

raciones con un martillo y un yunque mediante piezas calientes de metal: ejemplos comunes de estos productos son las cercas de hierro de diversos diseños. En consecuencia, la forja de desbaste puede ser un sustituto aproximado de las operaciones de laminado. Por lo general, la forja de desbaste de piezas de trabajo más grandes se hace con equipo mecanizado y controles por computadora, en los que se coordinan los movimientos laterales y verticales para producir la parte deseada.

Fuerza de forjado. La *fuerza de forjado* (F) en una operación de *forjado de matriz abierta*, en una pieza sólida cilíndrica, se puede calcular a partir de la fórmula

$$F = Y_f \pi r^2 \left(1 + \frac{2\mu r}{3h}\right) \tag{14.1}$$

en la que Y_f es el *esfuerzo de flujo* del material (ver el ejemplo siguiente), μ el coeficiente de fricción entre la pieza de trabajo y la matriz, y r y h son el radio y la altura de la pieza de trabajo, respectivamente. (En las referencias listadas en la bibliografía al final del capítulo se proporciona la derivación de esta fórmula y de otras para diversos procesos de forjado).

EJEMPLO 14.1 Cálculo de la fuerza de forjado en el recalcado

Un trozo de metal cilíndrico hecho de acero inoxidable 304 tiene 150 mm (6 pulgadas) de diámetro y 100 mm (4 pulgadas) de altura. Ésta se reduce 50% a temperatura ambiente por medio de forjado de matriz abierta con matrices planas. Si el coeficiente de fricción es de 0.2, calcule la fuerza de forjado al *final* del recorrido o carrera.

Solución La fuerza de forjado al final del recorrido se calcula mediante la ecuación 14.1, en la que las dimensiones corresponden a las dimensiones finales del forjado. Por lo tanto, la altura final es $h = 100/2 = 50$ mm y el radio final (r) se determina a partir del volumen constante, igualando los volúmenes antes y después de la deformación. Por lo que

$$(\pi)(75)^2(100) = (\pi)(r)^2(50)$$

y por lo tanto, $r = 106$ mm (4.17 pulgadas).

La cantidad Y_f en la ecuación 14.1 es el esfuerzo de flujo del material, que es el esfuerzo requerido para continuar con la deformación plástica de la pieza de trabajo bajo una deformación real particular. El valor absoluto de la deformación real a la que se somete dicha pieza al final del recorrido en esta operación es

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{100}{50}\right) = 0.69$$

Podemos determinar el esfuerzo de flujo si vemos la ecuación 2.8 y observamos en la tabla 2.3 que para el acero inoxidable 304, $K = 1275$ MPa y $n = 0.45$. Por lo tanto, se calcula que para una deformación real de 0.69, el esfuerzo de flujo es de 1100 MPa. Otro método consiste en ver la figura 2.6 y observar que el esfuerzo de flujo para el acero inoxidable 304, a una deformación real de 0.69, es de unos 1000 MPa (140 ksi). La pequeña diferencia entre los dos valores se debe a que los datos de la tabla 2.3 y la figura 2.6 son de fuentes distintas. Tomando el último valor ya se puede calcular la fuerza de forjado, considerando que en este problema las unidades de la ecuación 14.1 deben estar en N y m. Por consiguiente,

$$F = (1000)(10^6)(\pi)(0.106)^2\,(1) + \frac{(2)(0.2)(0.106)}{(3)(0.050)}$$

$$= 4.5 \times 10^7 \text{ N} = 45 \text{ MN} = 10^7 \text{ lb} = 5000 \text{ toneladas}^{\text{N. del RT.}}$$

N. del RT. Una tonelada corta equivale a 2000 lb.

14.3 Forjado por matriz de impresión y de matriz cerrada

En el *forjado por matriz de impresión*, la pieza de trabajo toma la forma de la cavidad de la matriz mientras se va forjando entre dos matrices con forma (fig. 14.5a a c). Por lo general, este proceso se realiza a temperaturas elevadas para mejorar la ductilidad de los metales y disminuir las fuerzas. Obsérvese que en la figura 14.5c, durante la deformación, parte del material fluye hacia el exterior y forma unos **bigotes o rebaba de forja**. La rebaba desempeña un papel importante en el forjado por matriz de impresión. La temperatura elevada y la alta resistencia a la fricción resultante en la rebaba representan una severa restricción al flujo exterior del material en la matriz. Por lo tanto, con base en el principio de que en la deformación plástica los materiales fluyen hacia donde hay menor resistencia (debido a que requiere menos energía), el material empieza a fluir al interior de la cavidad de la matriz, llenándola finalmente.

En la figura 14.5d se muestra la terminología estándar para una matriz común de forjado. En vez de hacerse de una sola pieza, las matrices se pueden fabricar de varias piezas (segmentadas), incluyendo **insertos de matrices** (fig. 14.6) y en particular para formas complejas. Es posible reemplazar estos insertos con facilidad en caso de desgaste o falla en una sección particular de la matriz, y por lo general se hacen de materiales más resistentes y duros. Por supuesto que las matrices deben permitir la extracción de las forjas sin dificultad (ver también sección 14.6).

La pieza en bruto, o tocho, que se va a forjar, se prepara por medios como *(a) corte* de un barra de material extruido o estirado; *(b)* una preforma de operaciones como *metalurgia de polvos*; *(c) fundición*; o *(d)* utilización de una pieza en bruto preformada mediante una operación previa de forjado. Dicha pieza se coloca en la matriz inferior y conforme la matriz superior empieza a descender, la forma de la pieza en bruto cambia gradualmente, como se muestra para el forjado de una biela en la figura 14.7a.

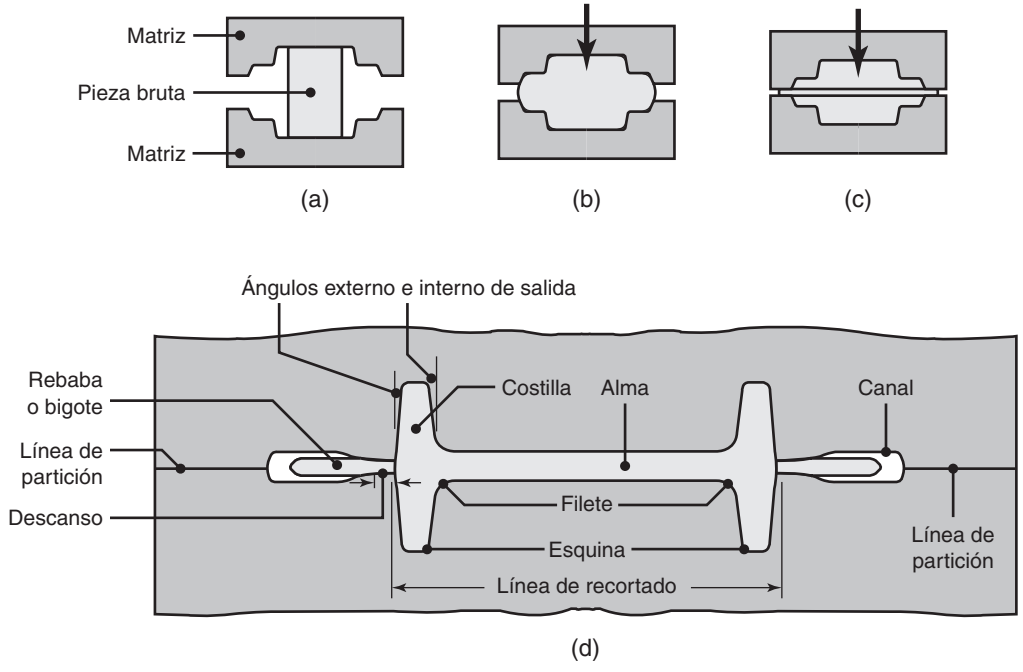


FIGURA 14.5 *(a)* a la *(c)* Etapas en el formado por matriz de impresión de un tocho sólido. Obsérvese la formación de rebaba, que es el exceso de metal que se recorta posteriormente (ver fig. 14.7). *(d)* Terminología estándar para diversas características de una matriz de forjado.

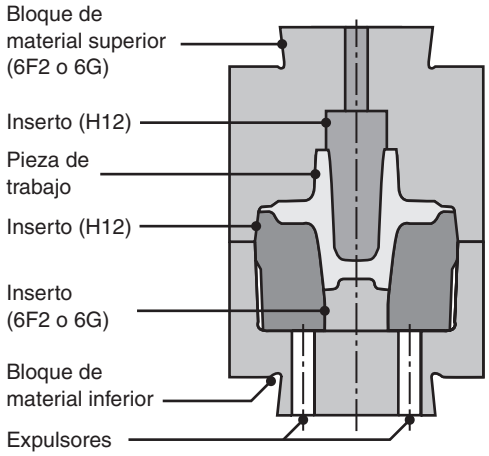


FIGURA 14.6 Insertos de matriz utilizados en el forjado del alojamiento de un eje automovilístico.

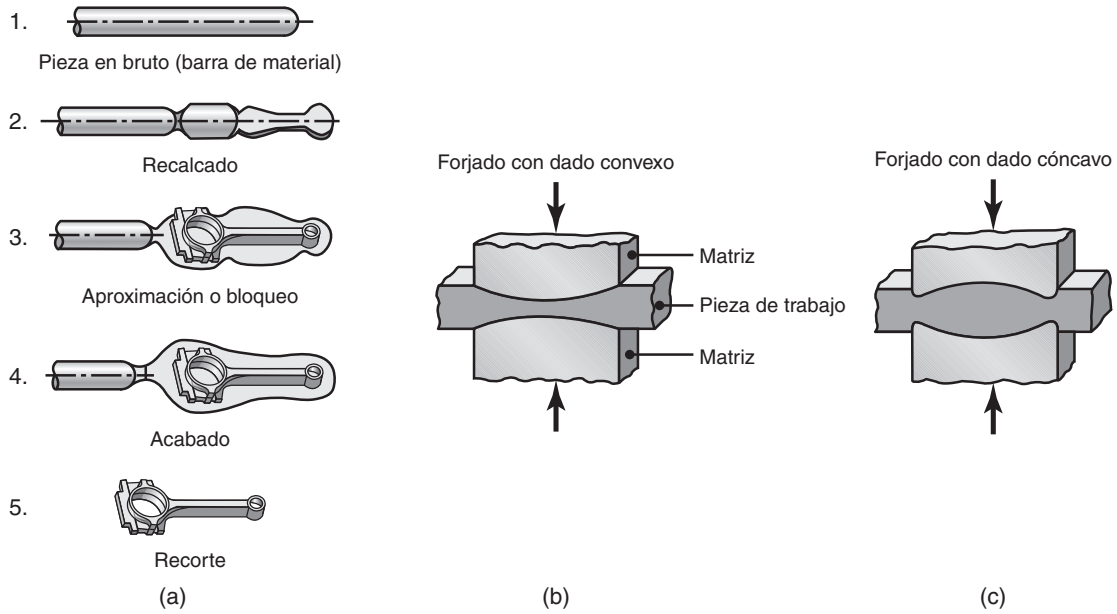


FIGURA 14.7 *(a)* Etapas de forjado de una biela para un motor de combustión interna. Obsérvese la cantidad de rebaba requerida para asegurar el llenado apropiado de las cavidades de la matriz. *(b)* Operaciones de forjado con dado convexo y *(c)* con dado cóncavo para distribuir el material de manera apropiada cuando se da forma previa a la pieza en bruto para forjarla.

Por lo general, las **operaciones de preformado** (fig. 14.7b y c) se utilizan para distribuir el material adecuadamente en varias regiones de la pieza en bruto, mediante matrices con formas simples de diversos contornos. En el **forjado con dado convexo**, se *retira* el material de un área. En el **forjado con dado cóncavo**, se *acumula* en un área localizada. Después se le da a la parte una forma aproximada (digamos, una biela) por medio de un proceso conocido como **aproximación o bloqueo**, utilizando *matrices de aproximación*. La operación final es el terminado del forjado en las *matrices de impresión*, que le proporcionan su forma final. Luego se elimina la rebaba mediante una operación de recortado de rebabas (fig. 14.8).

Fuerza de forjado. La *fuerza de forjado* (F) requerida para efectuar una operación de *forjado con matriz de impresión* se puede calcular a partir de la fórmula

$$F = kY_f A \tag{14.2}$$

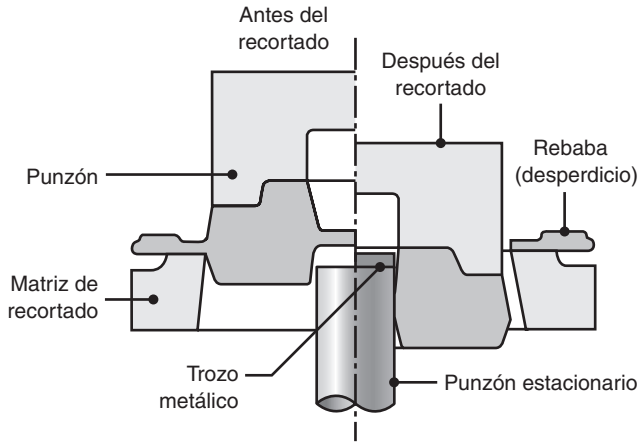


FIGURA 14.8 Recorte de rebaba de una parte forjada. Obsérvese que el material delgado en el centro se elimina mediante troquelado.

en la que k es un factor multiplicador que se obtiene de la tabla 14.2, Y_f el esfuerzo de flujo del material a la temperatura de forjado y A el área proyectada de la pieza forjada, incluyendo la rebaba. Por lo general, en las operaciones de forjado en caliente, la presión real del forjado para la mayoría de los metales va de 550 a 1000 MPa (80 a 140 ksi). Como ejemplo, supóngase que el esfuerzo de flujo plástico de un material a la temperatura de forjado es 100,000 psi y una parte (como la mostrada en la fig. 14.7a) tiene un área proyectada (con rebaba) de 60 pulg^2. Tomando un valor de $k = 10$ de la tabla 14.2, la fuerza de forjado sería $F = (10)(100{,}000)(60) = 60 \times 10^6$ lb = 30,000 toneladas cortas = 26.8 toneladas.

Forjado en matriz cerrada. Al proceso mostrado en la figura 14.5 también se le conoce como *forjado en matriz cerrada*. Sin embargo, en éste no se forma rebaba (de ahí el término *forjado sin rebaba*) y la pieza de trabajo llena la cavidad de la matriz (ver el lado derecho de la fig. 14.9b). Por consiguiente, la presión de forjado es muy alta. Son fundamentales el control preciso del volumen de la pieza en bruto y el diseño adecuado de la matriz para producir un forjado con las tolerancias dimensionales deseadas. Las piezas en bruto subdimensionadas evitan el llenado de la cavidad de la matriz; por el contrario, las piezas sobredimensionadas generan presiones excesivas y pueden hacer que las matrices fallen de manera prematura o que la máquina se atasque.

Forjado de precisión. Con el fin de reducir el número de operaciones de acabado adicionales (formado de forma neta), y en consecuencia el costo, se tiende hacia una mayor precisión en los productos forjados. Algunos productos comunes obtenidos por forjado de precisión son los engranes, las bielas y los álabes para turbinas. Este forjado requiere *(a)* matrices especiales y más complejas, *(b)* control preciso del volumen y la forma de la pieza en bruto, y *(c)* posicionamiento exacto de dicha pieza en la cavidad de la matriz. Además, debido a las mayores fuerzas que se necesitan para obtener detalles finos en la parte, este proceso requiere equipo de más capacidad. Las aleaciones de aluminio y magnesio son adecuadas, en especial para el forjado de precisión, debido a las

TABLA 14.2

Intervalo de valores de k para la ecuación 14.2	
Formas simples, sin rebaba	3–5
Formas simples, con rebaba	5–8
Formas complejas, con rebaba	8–12

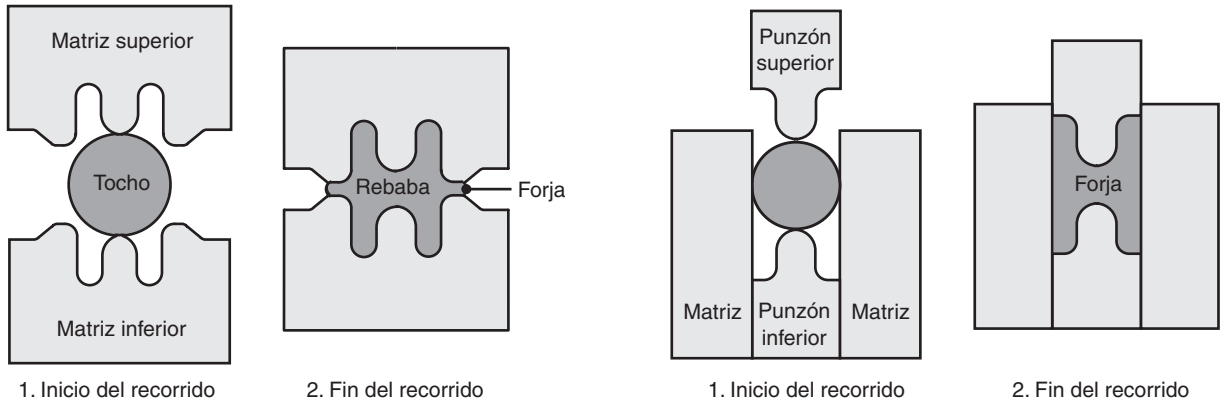


FIGURA 14.9 Comparación de *(a)* forjado en matriz cerrada con rebaba, y *(b)* forjado de precisión o sin rebaba de un tocho redondo. *Fuente*: H. Takemasu, V. Vázquez, B. Painter y T. Altan.

cargas y temperaturas de forjado relativamente bajas que exigen; también se pueden utilizar los aceros y el titanio en el forjado de precisión.

Operación característica de forjado y calidad de los productos. Por lo general, una operación de forjado comprende la siguiente secuencia de pasos:

1. Preparar una pieza de metal, tocho o preforma mediante procesos como cizallado (recorte), aserrado o tronzado. De ser necesario, limpiar las superficies por medios como la limpieza con chorro de granalla.
2. Para forjado en caliente, calentar la pieza de trabajo en un horno apropiado y después, de ser necesario, eliminar la cascarilla tras el calentamiento con un cepillo de alambre, chorro de agua, vapor o raspado. La cascarilla también se puede eliminar durante las etapas iniciales del forjado, ya que es quebradiza y se desprende durante la deformación.
3. Para forjado en caliente, precalentar y lubricar las matrices; para forjado en frío, lubricar la matriz.
4. Forjar el tocho en las matrices apropiadas y en la secuencia adecuada. De ser necesario, eliminar cualquier exceso de material (como las rebabas) por medio de recortado, maquinado o esmerilado.
5. Limpiar la forja, verificar sus dimensiones y (de ser necesario) maquinarla hasta obtener las dimensiones finales y las tolerancias especificadas.
6. Efectuar operaciones adicionales, como enderezado y tratamiento térmico (para mejorar las propiedades mecánicas). Además, realizar las operaciones de acabado que sean necesarias, como maquinado y rectificado.
7. Inspeccionar la forja en caso de cualquier defecto externo e interno.

La calidad, tolerancias dimensionales y acabado superficial de una forja dependen de cuán bien se efectúan y se controlan estas operaciones. Por lo general, las tolerancias se clasifican entre ± 0.5 y $\pm 1\%$ de las dimensiones de la forja. En una buena práctica, por lo general las tolerancias para forjado en caliente del acero son menores a ± 6 mm (1/4 pulgada); en el forjado de precisión, pueden ser hasta de ± 0.25 mm (0.01 pulgada). Otros factores que contribuyen a las imprecisiones dimensionales son los ángulos de salida, los radios, los filetes, el desgaste y cierre de las matrices (si cierran bien o no) y la asimetría de las mismas. El acabado superficial de la forja depende de la preparación de la pieza en bruto, el acabado superficial de la matriz, el desgaste de ésta y la eficacia del lubricante.

14.4 Diversas operaciones de forjado

Para proporcionar la forma y las características deseadas a los productos forjados, se realizan muchas otras operaciones relacionadas con el proceso básico de forjado.

Acuñado. Se trata de un proceso de forjado en matriz cerrada que por lo general se utiliza en el troquelado de monedas, medallas y joyería (fig. 14.10). La pieza en bruto o trozo de metal se acuña en la cavidad de una matriz completamente cerrada. Para producir detalles finos (por ejemplo, el detalle en monedas recién troqueladas), las presiones requeridas pueden ser tan elevadas como cinco o seis veces la resistencia del material. En algunas partes es posible que se requieran varias operaciones de acuñado. En éste no se pueden aplicar lubricantes, porque quedarían atrapados en las cavidades de la matriz y, al no poder comprimirse, evitarían la reproducción total de los detalles de la superficie de la matriz y el acabado superficial.

El **marcado** de partes con letras y números también se puede realizar con rapidez por medio de este proceso. El acuñado se utiliza asimismo con forjas y otros productos para mejorar el acabado superficial y proporcionar la precisión dimensional deseada con pocos o ningún cambio en el tamaño de la parte. Conocido como **dimensionado**, este proceso requiere presiones elevadas.

Cabeceado. También conocido como **forjado por recalcado**, el *cabeceado* es básicamente una operación de recalcado que por lo general se efectúa en el extremo de una barra redonda o alambre para aumentar la sección transversal. Los ejemplos típicos son los clavos, las cabezas de tornillos, los pernos, remaches y muchos otros sujetadores (fig. 14.11a). El cabeceado puede realizarse en frío, en caliente o a temperatura media. Una consideración importante en él es la tendencia de la barra a curvarse si su relación de longitud a diámetro sin soporte es demasiado elevada. Por lo general, esta relación se limita a menos de 3:1, pero con las matrices apropiadas puede ser más alta. Por ejemplo, se pueden tolerar relaciones más altas si el diámetro de la cavidad de la matriz no es mayor a 1.5 veces el diámetro de la barra.

Las operaciones de cabeceado se efectúan en máquinas conocidas como **cabeceadoras**, que suelen automatizarse en gran medida con velocidades de producción de cientos de piezas por minuto para partes pequeñas. Operaciones de cabeceado en caliente en piezas más grandes se realizan comúnmente en *recalcadores horizontales*. Estas máquinas tienden a ser ruidosas; se requiere una cubierta a prueba de ruido o el uso de protec-

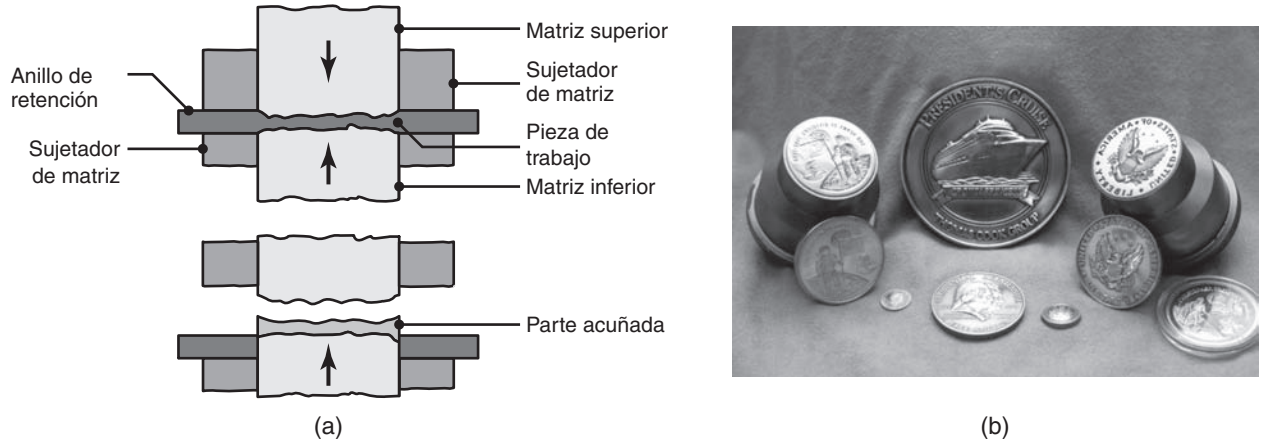


FIGURA 14.10 *(a)* Esquema del proceso de acuñado. Las monedas más antiguas se hacían por medio de forjado de matriz abierta y carecían de precisión y detalles de forma. *(b)* Ejemplo de operación moderna de acuñado que muestra la pieza de trabajo y las herramientas. Obsérvese el detalle y el acabado superficial superior que se puede obtener con este proceso. *Fuente*: Cortesía de C & W Steel Stamp Co., Inc.

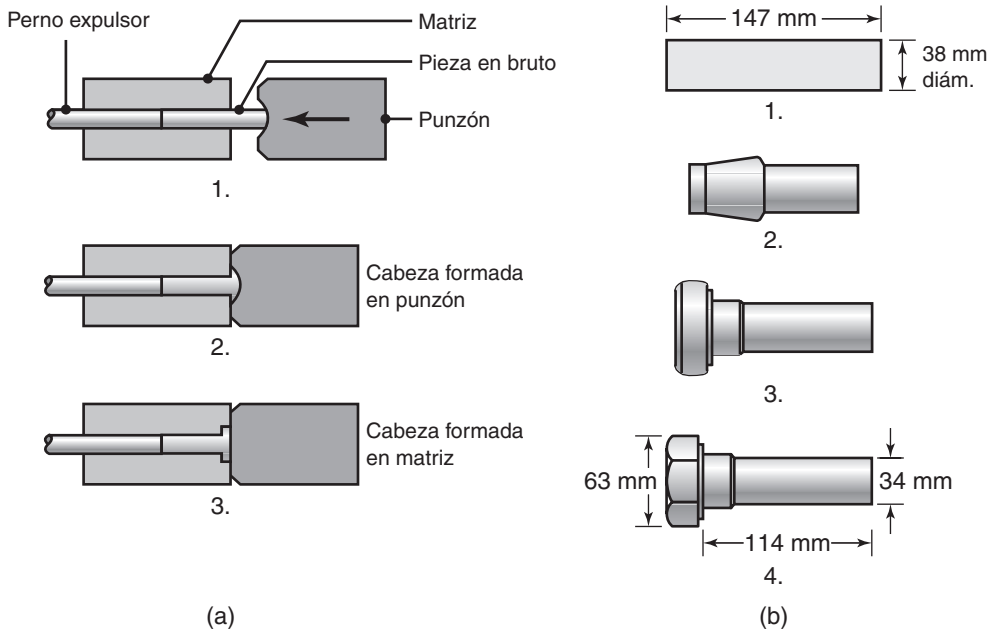


FIGURA 14.11 *(a)* Operación de cabeceado para formar cabezas en sujetadores, como clavos y remaches. *(b)* Secuencia de operaciones para producir la cabeza de un tornillo común por medio de cabeceado.

tores auditivos. Las operaciones de cabeceado se pueden combinar con procesos de extrusión en frío para fabricar varias partes, como se describe en la sección 15.4.

Penetrado. Este es un proceso de penetración de la superficie de una pieza de trabajo (aunque sin pasar a través de ella) con un punzón para producir una cavidad o una impresión (fig. 14.12). Dicha pieza se puede confinar en un contenedor (como la cavidad de una matriz) o dejar sin restricciones. Su deformación dependerá de cuánto se limita su flujo conforme desciende el punzón. Ejemplos comunes de penetrado son el ahuecamiento y la cavidad hexagonal en las cabezas de los tornillos. Después del penetrado, puede seguir el troquelado para producir un orificio en la parte (para una descripción similar de esta situación, ver la *masa* arriba del punzón estacionario en la parte central de la fig. 14.8). El penetrado también se utiliza para producir regiones huecas en las forjas mediante equipo auxiliar de acción lateral.

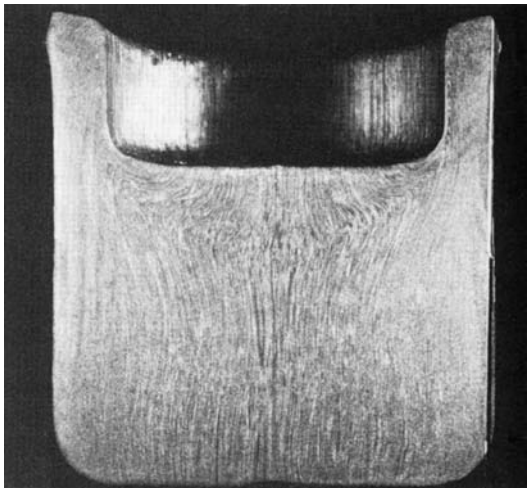


FIGURA 14.12 Tocho redondo penetrado que muestra el patrón de flujo de los granos (ver también fig. 14.2c). *Fuente*: Cortesía de Ladish Co., Inc.

La *fuerza de penetrado* depende de *(a)* el área de la sección transversal y la geometría de la punta del punzón, *(b)* la resistencia del material, y *(c)* la magnitud de la fricción en las interfaces de deslizamiento. La presión puede ser de tres a cinco veces la resistencia del material, que se encuentra casi al mismo nivel de esfuerzo requerido para efectuar una penetración en las pruebas de dureza.

ESTUDIO DE CASO 14.1 Manufactura de un perno escalonado mediante cabeceado y penetrado

La figura 14.13a muestra un perno escalonado hecho de acero SAE 1008 y utilizado como parte del ensamble de un rodillo para ajustar la posición del asiento de un automóvil. La parte es bastante compleja y debe producirse de manera progresiva a fin de reproducir los detalles requeridos y llenar la matriz. En la figura 14.13b se muestran los pasos de forjado en frío usados para fabricar esta parte. Primero, se extruye una pieza en bruto cilíndrica sólida, en dos operaciones, seguida de una operación de recalcado. Ésta emplea una sección transversal cónica en la matriz para producir la preforma y se orienta de manera que el material se concentre en la parte superior para asegurar el llenado apropiado de la matriz. Después del formado por matriz de impresión, se realiza una operación de penetrado a fin de formar el agujero. La parte se produce con forma neta en una máquina de formado en frío a una velocidad de 240 partes por minuto.

Punzonado de cavidades o clavado. Este proceso consiste en prensar un punzón endurecido con una geometría especial de la punta, dentro de la superficie de un bloque de metal. La cavidad producida se utiliza después como matriz para operaciones de formado, como las que se utilizan para artículos de mesa. Por lo general, la cavidad de la matriz es poco profunda; para cavidades más profundas se puede eliminar parte del material de la superficie mediante maquinado antes del clavado (ver fig. 23.3c). La *fuerza de clavado* se puede calcular a partir de la ecuación

$$\text{Fuerza de clavado} = 3(\text{UTS})(A) \tag{14.3}$$

en la que UTS se obtiene de la tabla 2.2 y A es el área proyectada de la impresión. Por ejemplo, para un acero de alta resistencia con UTS = 1500 MPa y una parte con un área proyectada de 400 mm^2, la fuerza de clavado sería (3)(1500 N/mm^2)(400 mm^2) = 1.8 MN = 179 toneladas métricas.

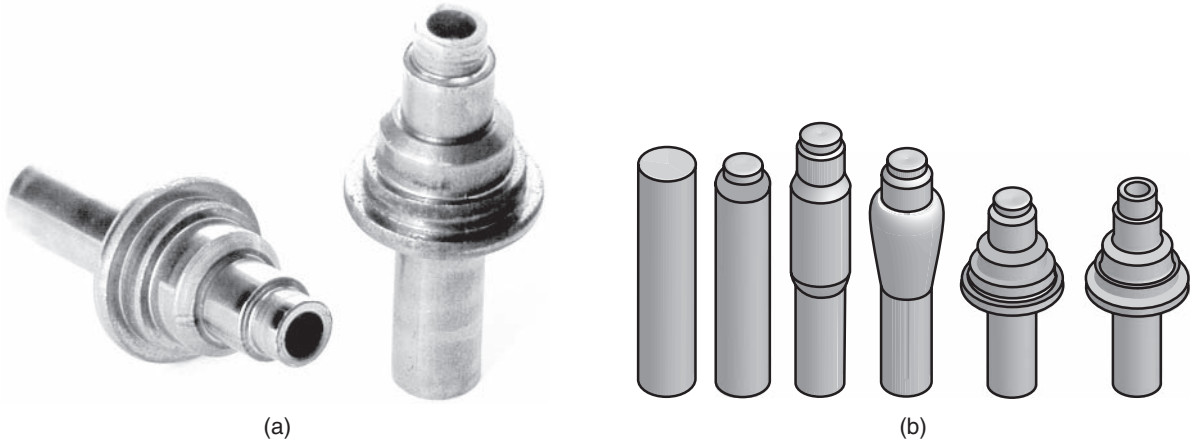


FIGURA 14.13 *(a)* Perno escalonado que se utilizó en el estudio de caso 14.1. *(b)* Ilustración de los pasos de manufactura empleados para producir el perno escalonado. *Fuente*: Cortesía de National Machinery, LLC.

Forjado orbital. Este es un proceso en el que la matriz superior se mueve a lo largo de una trayectoria orbital y da forma a la parte de manera *progresiva*. La operación es similar a la acción de la mano y del mortero utilizados para moler hierbas y semillas. Aunque no son de uso regular, los componentes comunes que se pueden forjar mediante este proceso son partes con forma de disco y cónicas, como engranes cónicos y piezas en bruto para engranes. La fuerza de forjado es relativamente menor debido a que en cualquier instante específico el contacto de la matriz se concentra en una pequeña área de la pieza de trabajo (ver también *forjado progresivo* a continuación). La operación es silenciosa y las partes se pueden formar en 10 a 20 ciclos de la matriz orbital.

Forjado progresivo. En este proceso, se forja una pieza en bruto dándole forma con una herramienta que la trabaja en varios pasos pequeños. Obsérvese que esta operación es similar a la forja de desbaste (ver fig. 14.4), en la que la matriz penetra la pieza en bruto a diferentes profundidades a lo largo de la superficie. Debido a que el área de contacto de la matriz es más pequeña, este proceso requiere fuerzas mucho menores en comparación con el forjado convencional por matriz de impresión y las herramientas son más simples y menos costosas.

Forjado isotérmico. También se conoce como **forjado por matriz en caliente**. Las matrices en este proceso se calientan a la misma temperatura que la de la pieza de trabajo caliente. Como permanece caliente, durante el forjado se mantienen la resistencia baja y la alta ductilidad de la pieza de trabajo. Además, la carga de forjado es baja y se mejora el flujo del material dentro de la cavidad de la matriz. Se pueden forjar isotérmicamente partes complejas, con buena precisión dimensional para una forma casi neta con un golpe en una prensa hidráulica. Por lo general, las matrices para forjado en caliente de aleaciones de alta temperatura están hechas de aleaciones de níquel y molibdeno (debido a su resistencia a altas temperaturas), aunque para las aleaciones de aluminio se pueden utilizar matrices de acero. El forjado isotérmico es costoso y la velocidad de producción es baja. Sin embargo, puede ser económico para forjas intrincadas especiales, fabricadas con materiales como el aluminio, titanio y superaleaciones, siempre que la cantidad requerida sea suficientemente grande para justificar los costos de las matrices.

Forjado rotatorio. En este proceso (también conocido como *forjado radial*, *forjado rotatorio* o simplemente *estampado*), una barra sólida o tubo se somete a fuerzas de impacto radial por medio de una serie de matrices reciprocantes de la máquina (fig. 14.14a y b). Los movimientos de las matrices se obtienen mediante una serie de rodillos en una jaula, por miedo de una acción similar a la de un rodamiento de rodillos. La pieza de trabajo se mantiene estacionaria y las matrices giran (mientras se mueven radialmente en sus ranuras), golpeando la pieza a velocidades tan altas como 20 golpes por segundo. En las *máquinas de estampado con matrices de cierre*, los movimientos de las matrices se obtienen mediante el movimiento alternativo de cuñas (fig. 14.14c). Las matrices se pueden abrir más que las de las forjadoras rotatorias, soportando así partes de diámetro grande o variable. En otro tipo de máquina, las matrices no giran, sino que se mueven radialmente adentro y afuera. Los productos comunes fabricados por este método son las hojas de los desarmadores y las puntas de hierro para soldadoras.

El proceso de forjado rotatorio también se puede utilizar para *ensamblar* accesorios en cables y alambres; en dichos casos, el accesorio tubular se estampa directamente en el cable. Este proceso se usa asimismo para operaciones como *punteado* (ahusado de la punta de una parte cilíndrica) y *dimensionado* (terminación de las dimensiones de una parte).

Por lo general, el forjado rotatorio se limita a un diámetro máximo de la pieza de trabajo de 150 mm (6 pulgadas); se han estampado pequeñas partes hasta de 0.5 mm (0.02 pulgada). Las tolerancias dimensionales van de ± 0.05 a ± 0.5 mm (0.002 a 0.02 pulgada). El proceso es adecuado para velocidades medias a altas de producción, en las que son posibles velocidades hasta de 50 partes por minuto, dependiendo de la complejidad de la parte. Es un proceso versátil y su longitud sólo se limita por la longitud de la barra que soporta el mandril (si se requiere alguno).

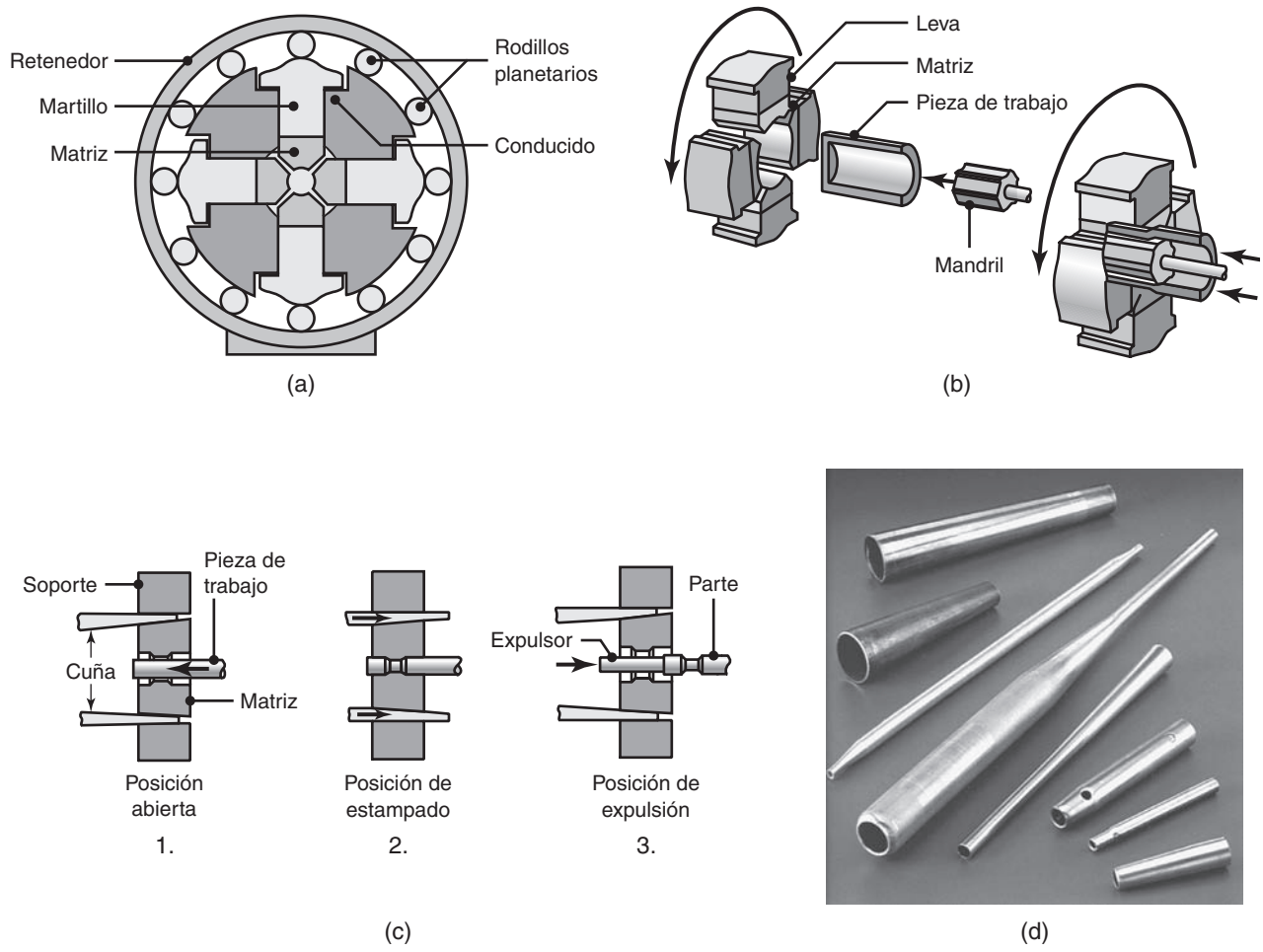


FIGURA 14.14 *(a)* Esquema del proceso del forjado rotatorio. *(b)* Formación de perfiles internos en una pieza de trabajo tubular por medio de forjado rotatorio. *(c)* Máquina de forjado rotatorio con matriz de cierre que muestra el formado de un eje escalonado. *(d)* Partes comunes producidas mediante forjado rotatorio. *Fuente*: *(d)* Cortesía de J. Richard Industries.

Extrusión de tubos. En este proceso se reduce el diámetro interno y/o espesor del tubo con el uso de *mandriles internos* o sin él (fig. 14.15a y b). Para la tubería de diámetro pequeño se puede utilizar alambre de alta resistencia como mandril. Los mandriles también pueden fabricarse con estrías longitudinales que permiten la extrusión de tubos con forma interior (fig. 14.15c). Por ejemplo, el estriado en los cañones de las armas (estrías internas en espiral que proporcionan el efecto giroscópico a las balas) se puede producir si se estampa un tubo sobre un mandril con estrías en espiral. Se ha construido maquinaria especial para estampar cañones de armas y otras partes con diámetros iniciales grandes, hasta de 350 mm (14 pulgadas).

14.5 Forjabilidad de los metales. Defectos del forjado

Por lo general, la *forjabilidad* se define como la capacidad de un material para someterse a deformación sin agrietarse. Se han desarrollado varias pruebas para cuantificar la forjabilidad; sin embargo, debido a su naturaleza compleja, sólo dos pruebas simples han tenido aceptación general: el recalcado y la torsión en caliente.

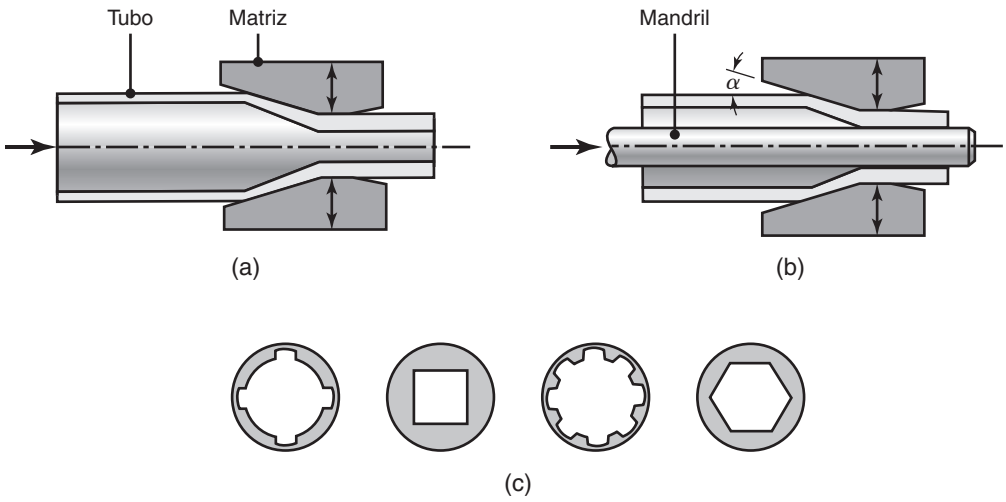


FIGURA 14.15 *(a)* Forjado rotatorio de tubos sin un mandril; obsérvese el aumento del espesor de la pared en la separación de la matriz. *(b)* Forjado rotatorio con mandril; nótese que el espesor final de la pared del tubo depende del diámetro del mandril. *(c)* Ejemplos de las secciones transversales producidas por el forjado rotatorio en mandriles con forma. El estriado (estrías internas en espiral) en los cañones de las armas se puede producir mediante este proceso.

En la **prueba de recalcado**, se recalca un espécimen cilíndrico sólido entre matrices planas y se observa la reducción de la altura a la que empieza el agrietamiento en las superficies abarriladas (ver también fig. 2.19d). Cuanto más grande sea la deformación antes del agrietamiento, más grande será la forjabilidad del metal. El segundo método es el **ensayo de torsión en caliente**, en el que un espécimen redondo se tuerce de manera continua en la misma dirección hasta que se rompe. Esta prueba se efectúa en cierta cantidad de especímenes a diferentes temperaturas y se grafica la cantidad de vueltas totales a las que se somete cada espécimen antes de romperse a cada temperatura. Así, la temperatura a la que ocurre la máxima cantidad de vueltas se convierte en la temperatura de forjado para la forjabilidad máxima. Se ha descubierto que el ensayo de torsión en caliente es útil, en especial para aceros.

En la tabla 14.3 se da la forjabilidad de diversos metales y aleaciones, en orden decreciente. Se basan en consideraciones como ductilidad y resistencia del material, temperatura requerida para el forjado, comportamiento de fricción y calidad de las forjas producidas. Estos valores se deben considerar sólo como guías generales. En la tabla 14.3 se incluyen los intervalos característicos de la *temperatura de forjado en caliente* para varios metales y aleaciones. Obsérvese que la temperatura de forjado más alta no necesariamente indica mayor dificultad en el forjado del material. Para forjado *a temperatura media*, las temperaturas van de 200 °C a 300 °C (400 °F a 600 °F) para aleaciones de aluminio y de 550 °C a 750 °C (1000 °F a 1400 °F) para aceros.

Defectos del forjado. Además del agrietamiento de la superficie durante el forjado, también se pueden desarrollar otros defectos debido al patrón de flujo del material en la matriz, como se describe en la sección 14.6 respecto del diseño de matrices. Por ejemplo, si no existe suficiente volumen de material para llenar la cavidad de la matriz, el alma se puede torcer durante el forjado y desarrollar pliegues (fig. 14.16a). Por otro lado, si el alma es demasiado gruesa, el exceso de material fluye nuevamente sobre las partes ya formadas de la forja y desarrolla grietas internas (fig. 14.16b).

TABLA 14.3

Clasificación de metales en orden decreciente de forjabilidad

Metal o aleación	Intervalo aproximado de temperaturas para forjado en caliente (°C)
Aleaciones de aluminio	400–550
Aleaciones de magnesio	250–350
Aleaciones de cobre	600–900
Aceros al carbono y de baja aleación	850–1150
Aceros inoxidables martensíticos	1100–1250
Aceros inoxidables austeníticos	1100–1250
Aleaciones de titanio	700–950
Superaleaciones de base hierro	1050–1180
Superaleaciones de base cobalto	1180–1250
Aleaciones de tantalio	1050–1350
Aleaciones de molibdeno	1150–1350
Superaleaciones de base níquel	1050–1200
Aleaciones de tungsteno	1200–1300

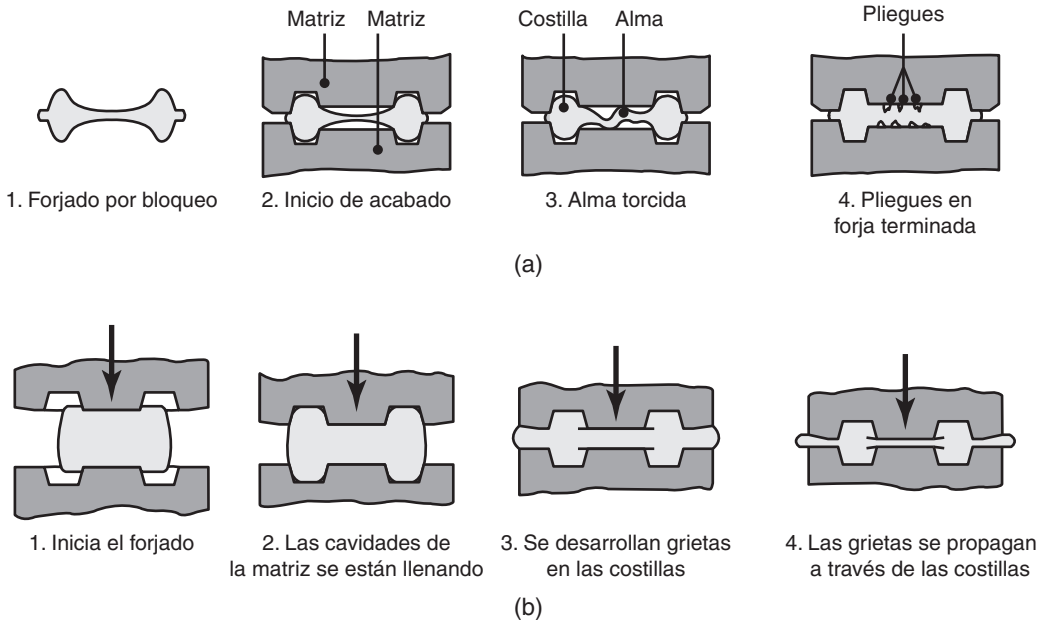


FIGURA 14.16 Ejemplos de defectos en partes forjadas. *(a)* Pliegues formados por el pandeo del alma durante el forjado; se debe aumentar el espesor del alma para evitar este problema. *(b)* Defectos internos producidos por un tocho sobredimensionado. Las cavidades de la matriz se llenan de manera prematura y el material en el centro fluye más allá de las regiones ya llenas cuando se cierran las matrices.

Los diversos radios en la cavidad de la matriz de forjado pueden influir de manera significativa en la formación de dichos defectos. Los defectos internos también se pueden desarrollar por *(a)* deformación no uniforme del material en la cavidad de la matriz, *(b)* los gradientes de temperatura a lo largo de la pieza de trabajo durante el forjado y *(c)* los cambios microestructurales a causa de las transformaciones de las fases. También es importante el patrón de flujo de los granos del material en el forjado. Las líneas de flujo pueden alcanzar una superficie en forma perpendicular, como se muestra en la figura

14.12. Esta condición, conocida como **granos de orilla**, expone los límites de los granos directamente al ambiente, que los puede atacar desarrollando una superficie rugosa, actuando además como elevadores de esfuerzos.

Los defectos de forjado pueden causar fallas por fatiga y otros problemas como la corrosión y el desgaste durante la vida útil del componente forjado. Es obvia la importancia de inspeccionar las forjas antes de ponerlas en servicio, sobre todo en aplicaciones críticas, como en el caso de los aviones. En el capítulo 36 se describen las técnicas de inspección para partes manufacturadas.

14.6 Diseño de matrices, materiales para matrices y lubricación

El diseño de las matrices de forjado requiere bastante conocimiento y experiencia respecto de la forma y complejidad de la pieza de trabajo, su ductilidad, resistencia y sensibilidad a la velocidad de deformación y temperatura, además de sus características de fricción. La distorsión de la matriz bajo cargas elevadas de forjado también debe considerarse en el diseño, en particular si se requieren tolerancias dimensionales cerradas. La regla más importante en el diseño de matrices es que la parte fluye hacia donde hay menor resistencia. Por ello, deben planearse las *formas intermedias* de la pieza de trabajo de manera que llenen adecuadamente las cavidades de la matriz. En la figura 14.6a se muestra un ejemplo de formas intermedias para una biela.

Con los constantes avances en el desarrollo de simulaciones confiables de todo tipo de operaciones de trabajo de los metales, se cuenta con paquetes de aplicación (software) para ayudar a predecir el flujo del material en las cavidades de las matrices de forjado en diversas condiciones, como temperatura y transferencia de calor, condiciones de fricción en las superficies de contacto entre la matriz y la pieza de trabajo y velocidad de forjado. Dichos paquetes de aplicación pueden ser muy útiles en el diseño de matrices y en la eliminación de futuros problemas con forjas defectuosas (ver sección 38.7).

Preformado. En una pieza de trabajo preformada de manera correcta, el material no debe fluir con facilidad hacia la rebaba (ya que de otro modo la matriz se llenaría de forma incompleta); el patrón del flujo de los granos debe ser favorable para la resistencia y confiabilidad de los productos y se debe minimizar el deslizamiento excesivo en las interfaces de la pieza de trabajo y la matriz, con el fin de reducir el desgaste de esta última. La selección de las preformas requiere bastante experiencia y comprende cálculos de áreas de secciones transversales en cada lugar de la forja. Las técnicas computarizadas de modelado y simulación son muy útiles en dichos cálculos.

Características de diseño de las matrices. En la figura 14.5d se muestra la terminología de las matrices para forjado y a continuación se describe la importancia de diversas características. Algunas de estas consideraciones son similares a las de la fundición (sección 12.2). Para la mayoría de las forjas, la línea de partición se encuentra en la sección transversal más grande de la parte. Por lo general, en el caso de formas simétricas simples, la línea de partición es una línea recta en el centro de la forja, aunque para formas más complejas quizá no quede en un solo plano. Por lo tanto, las matrices se diseñan de manera que se cierren durante el acoplamiento, para evitar el empuje lateral y las fuerzas de compensación y mantener la alineación de la matriz durante el forjado.

Después de restringir el flujo lateral lo suficiente para garantizar un llenado correcto de la matriz, se permite que el material de la rebaba fluya a un *canal*, de modo que la rebaba adicional no aumente innecesariamente la carga de forjado. Como guía general, la holgura de la rebaba entre las matrices debe ser 3% del espesor máximo de la forja. La longitud del *descanso* suele ser de dos a cinco veces el espesor de la rebaba.

Los **ángulos de salida** son necesarios en casi todas las matrices de forjado para facilitar la extracción de la parte de la matriz. Al enfriarse, la forja se contrae radial y longi-

tudinalmente, de modo que se forman ángulos de salida internos mayores a los externos. Los ángulos internos son de 7° a 10°, en tanto que los externos son de entre 3° y 5°.

La selección de los radios adecuados para esquinas y filetes es importante a fin de garantizar un flujo suave del metal en la cavidad de la matriz y mejorar la vida de esta última. Por lo general, no son deseables los radios pequeños debido a su efecto adverso en el flujo del metal y su tendencia a desgastarse con rapidez (como resultado de una concentración de esfuerzos y ciclos térmicos). Los radios de filetes pequeños también pueden causar agrietamiento por fatiga de las matrices. Por regla general, estos radios deben ser tan grandes como lo permita el diseño de la pieza forjada. Como sucede con los modelos utilizados en la fundición, en el diseño de las matrices de forjado se proveen *tolerancias*, porque quizá sea necesario el maquinado de la forja para obtener las dimensiones finales y el acabado superficial deseado. Se debe proveer una tolerancia para el maquinado en bridas, orificios y superficies coincidentes.

Materiales para matrices. La mayoría de las operaciones de forjado (en especial para partes grandes) se efectúa a temperaturas elevadas. De este modo, los requisitos generales de los materiales para matrices son:

- Resistencia y tenacidad a temperaturas elevadas.
- Templabilidad y capacidad de endurecimiento uniforme.
- Resistencia al impacto mecánico y térmico.
- Resistencia al desgaste (en particular al abrasivo) debido a la presencia de cascarilla en el forjado en caliente.

Los materiales comunes para matrices son los aceros para herramientas y matrices que contienen cromo, níquel, molibdeno y vanadio (ver las tablas 5.5 y 5.6). Las matrices se producen de bloques de material, que a su vez se forjan a partir de fundiciones y después se maquinan y terminan con la forma y el acabado superficial deseados. En la sección 14.7 se describen los métodos de manufactura de las matrices.

Lubricación. En el forjado se puede utilizar una gran variedad de fluidos para trabajo de los metales, como se describe en la sección 33.7. Los lubricantes influyen en gran medida en la fricción y el desgaste. Por consiguiente, afectan las fuerzas requeridas (ver ecuación 14.1) y la manera en la que el material fluye en las cavidades de las matrices. También pueden actuar como barrera térmica entre la pieza de trabajo caliente y las matrices relativamente frías, lo que reduce la velocidad de enfriamiento de dicha pieza y mejora el flujo del metal. Otro papel importante del lubricante es actuar como *agente separador*, que evita que la pieza forjada se adhiera a las matrices y ayuda a extraerla de la matriz.

14.7 Métodos de manufactura de matrices. Fallas en las matrices

Con base en los temas descritos hasta ahora, es evidente que la calidad y la vida útil de las matrices son aspectos muy significativos de la operación total de la manufactura, incluyendo la calidad de las partes producidas. En particular, vale la pena resaltar esto dado que la vasta mayoría de las partes discretas que se producen en grandes cantidades (como engranes, ejes, tornillos y diversos componentes de maquinaria y equipo de transporte y agrícola), así como las fundiciones de todo tipo de productos, se hacen en matrices y moldes individuales. Las matrices también afectan la economía general de la manufactura debido a su costo y al tiempo de entrega necesario para producirlas, ya que varias requieren meses para su manufactura. Factores igualmente importantes son el mantenimiento de las matrices y sus modificaciones cuando las partes se producen por primera vez.

Se pueden utilizar varios métodos de manufactura, individualmente o en conjunto, para fabricar matrices de forjado y para otros procesos de trabajo de los metales. Estos procesos incluyen *(a)* fundición, *(b)* forjado, *(c)* maquinado, *(d)* rectificado, *(e)* métodos eléc-

tricos y electroquímicos (en particular maquinado por descarga eléctrica [EDM] o electroerosión, con electrodo, y de alambre), y *(f)* rayos láser para matrices pequeñas. Un desarrollo importante y continuo es la producción de herramientas y matrices por medio de **producción rápida de herramentales** mediante técnicas de elaboración rápida de prototipos, como se describe en la sección 20.5.

El proceso de producción de la cavidad de una matriz en un **bloque de material** se conoce como **estampado de matrices**. El proceso de *punzonado de cavidades o clavado* (sección 14.4), ya sea en frío o en caliente, también puede utilizarse para hacer matrices pequeñas con cavidades poco profundas. Por lo general, a las matrices se les da tratamiento térmico para obtener una mayor dureza y resistencia al desgaste (capítulo 31). De ser necesario, el perfil de su superficie y el acabado se mejoran más por medio de rectificado y pulido de acabado, ya sea manualmente o con robots industriales programables.

La elección de un método de manufactura de matrices depende de su tamaño y forma, así como de la operación específica en la que se van a utilizar, como fundición, forjado, extrusión, metalurgia de polvos o moldeo de plásticos. Como en todas las operaciones de manufactura, con frecuencia el costo rige el proceso seleccionado debido a que los costos de los herramentales y las matrices pueden ser significativos. Se pueden **fundir** matrices de varios tamaños y formas a partir de aceros, hierros fundidos y aleaciones no ferrosas. Los procesos utilizados para prepararlas pueden ser desde fundición en arena (para matrices grandes que pesan varias toneladas) hasta moldeo en cáscara (para fundición de matrices pequeñas). Por lo general, se prefieren los aceros fundidos para matrices grandes debido a su resistencia y tenacidad, así como por la facilidad con que se puede controlar y modificar la composición del acero, el tamaño de los granos y las propiedades.

Es más común que las matrices se *maquinen* a partir de *bloques forjados* por medio de procesos como el fresado, torneado, rectificado y maquinado por descarga eléctrica y electroquímico. En la figura I.14b se muestra dicha operación para fabricar moldes para armazones de lentes. En el caso de los materiales para matrices de alta resistencia y resistentes al desgaste, que son duros o a los que se da tratamiento térmico (por lo que son difíciles de maquinar), procesos como el maquinado duro (sección 25.6) y el maquinado eléctrico y electroquímico son una práctica común. En general, una matriz se maquina por medio de fresado en máquinas herramienta controladas por computadora con diversos paquetes de aplicación o software (ver fig. 24.2), que tienen la capacidad (en términos de economía) de optimizar la trayectoria de las herramientas de corte. Por lo tanto, es posible obtener el mejor acabado superficial en el menor tiempo de maquinado. De igual importancia es el montaje para el maquinado, porque las matrices deben maquinarse en un solo montaje sin tener que retirarlas de sus accesorios y reorientarlas para operaciones posteriores de maquinado.

Por lo general, después de utilizar el tratamiento térmico para obtener las propiedades mecánicas deseadas, las matrices se someten a *operaciones de acabado* (sección 26.7), como rectificado, pulido y procesos químicos y eléctricos, a fin de obtener el acabado superficial y la precisión dimensional deseados. Esto también incluye *tratamientos superficiales con rayo láser* y *recubrimientos* (capítulo 34) para mejorar la vida de la matriz. El láser se utiliza asimismo con el propósito de reparar matrices y reconfigurar las regiones desgastadas de las mismas (ver también fig. 33.11).

Costos de las matrices. De acuerdo con lo descrito, es evidente que el costo de una matriz dependerá en gran medida de su tamaño, complejidad de forma, aplicación y acabado superficial requeridos, así como de su material y manufactura, su tratamiento térmico y los métodos utilizados en el acabado. Por ello, no es fácil clasificar los costos específicos de las matrices. A lo largo de este libro se proporcionan algunos intervalos cualitativos de los costos de herramentales y matrices, como se hace en la tabla 12.6. Incluso la fabricación de matrices pequeñas y relativamente simples puede costar cientos de dólares, en tanto que el costo de un conjunto de matrices para piezas de carrocerías automotrices puede ser hasta de 2 millones de dólares. Por otro lado, ya que suele fabricarse una gran cantidad de partes con un conjunto de matrices, el *costo de la matriz por pieza fabricada* es generalmente una par-

te pequeña del costo de manufactura de una parte (ver también la sección 40.11). El tiempo de entrega requerido para producir matrices también puede afectar significativamente el costo general de manufactura, en particular en un mercado global y competitivo.

Fallas en las matrices. Por lo general, las fallas de las matrices en las operaciones de manufactura se deben a una o más de las siguientes causas:

- Diseño inadecuado de la matriz.
- Selección defectuosa o inapropiada del material de la matriz.
- Manufactura y operaciones inadecuadas de tratamiento térmico y acabado.
- Sobrecalentamiento y agrietamiento por calor (es decir, agrietamiento provocado por los ciclos de la temperatura).
- Desgaste excesivo.
- Sobrecarga (es decir, fuerza excesiva sobre la matriz).
- Alineación inapropiada de los componentes de la matriz con respecto a sus movimientos.
- Mal uso.
- Manejo inapropiado de la matriz.

Aunque estos factores se aplican generalmente a matrices fabricadas con aceros para herramientas y matrices, muchos también se aplican a otros materiales para matrices, como carburos, cerámicas y diamante.

El diseño apropiado de las matrices es tan importante como la selección adecuada de los materiales que las conforman. Para resistir las fuerzas correspondientes, una matriz debe tener secciones transversales y holguras suficientemente grandes (a fin de evitar atascamientos). Los cambios abruptos de sección transversal, las esquinas, radios y filetes filosos y el acabado superficial grueso (incluyendo marcas de rectificado y su orientación en las superficies de las matrices), actúan como elevadores de esfuerzos y, por lo tanto, pueden dañar la vida de la matriz. Para obtener una mejor resistencia y reducir la tendencia al agrietamiento, las matrices se pueden fabricar en segmentos y ensamblar como una matriz completa con anillos que las pretensan. Es esencial el manejo, la instalación, el ensamble y la alineación adecuados de las matrices. La sobrecarga de los herramentales y matrices puede producir fallas prematuras. Una causa común de falla en los dados de extrusión en frío es que el operador (o un robot programable) no extraiga del dado una pieza ya formada antes de cargarla con otra pieza en bruto.

14.8 Máquinas para forjado

Existe una variedad de máquinas para forjado con una gama de características de capacidad (fuerza en toneladas), velocidades y velocidad-carreras (tabla 14.4).

TABLA 14.4

Intervalos característicos de velocidades del equipo de forjado

Equipo	m/s
Prensa hidráulica	0.06–0.30
Prensa mecánica	0.06–1.5
Prensa de tornillo	0.6–1.2
Martinete de caída por gravedad	3.6–4.8
Martinete de caída mecánica	3.0–9.0
Contramartillo	4.5–9.0

Prensas hidráulicas. Estas prensas funcionan a velocidades constantes y son *de carga limitada o restringida*. En otras palabras, una prensa se detiene si la carga requerida excede su capacidad. Se pueden transmitir grandes cantidades de energía a una pieza de trabajo por medio de una carga constante a través de un recorrido, cuya velocidad se puede controlar. Puesto que el forjado en una prensa hidráulica es más tardado que en otros tipos de máquinas de forjado descritos, la pieza de trabajo se puede enfriar con rapidez a menos que se calienten las matrices (ver *forjado isotérmico*, sección 14.4). En comparación con las prensas mecánicas, las prensas hidráulicas son más lentas y tienen costos iniciales más altos, pero requieren menor mantenimiento.

Por lo general, una prensa hidráulica consiste en un bastidor marco de forja con dos o cuatro columnas, pistones, cilindros (fig. 14.17a), arietes y bombas hidráulicas accionadas por motores eléctricos. Se puede variar la velocidad del ariete durante el recorrido. Las capacidades de prensado van de 125 MN (14,000 toneladas cortas) para forjado de matriz abierta, hasta 450 MN (50,000 toneladas cortas) en América del Norte, 640 MN (72,000 toneladas cortas) en Francia y 730 MN (82,000 toneladas cortas) en Rusia para forjado en matriz cerrada. La viga principal de soporte del tren de aterrizaje del avión Boeing 747 se forja en una prensa hidráulica de 450 MN (50,000 toneladas cortas), que se muestra en la figura 14.1c (con la pieza en la parte frontal). Esta parte está fabricada con una aleación de titanio y pesa casi 1350 kg (3000 libras).

Prensas mecánicas. Estas prensas son básicamente de tipo manivela o excéntrica (fig. 14.17b). La velocidad varía desde un máximo en el centro del recorrido, hasta cero en su parte inferior, por lo que son *de recorrido o carrera limitada*. La energía en una prensa mecánica se genera con un gran volantín accionado por un motor eléctrico. Un embrague acopla el volantín en un eje excéntrico. Una biela traduce el movimiento giratorio en movimiento lineal alternativo. En la figura 14.17c se muestra una prensa mecánica de *junta articulada*. Debido al diseño de la unión, se pueden aplicar fuerzas muy altas en este tipo de prensa (ver también fig. 11.18).

La fuerza disponible en una prensa mecánica depende de la posición del recorrido y se vuelve extremadamente alta en la parte inferior del centro "muerto". Por lo tanto, una instalación adecuada es fundamental para evitar que se rompan las matrices o los componentes del equipo. Las prensas mecánicas tienen altas velocidades de producción, son más fáciles de automatizar y requieren menos habilidades del operador que otros tipos de máquinas. Las capacidades de la prensa van de 2.7 a 107 MN (300 a 12,000 toneladas cortas). Las prensas mecánicas son preferibles para el forjado de partes de alta precisión.

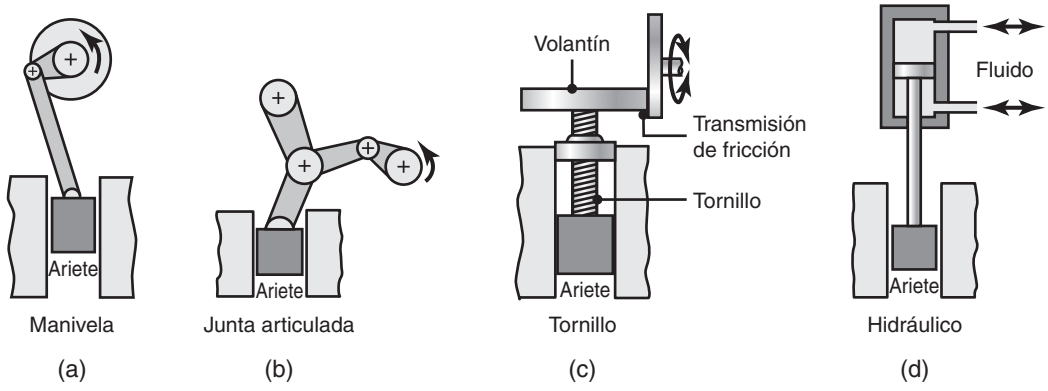


FIGURA 14.17 Esquema de los principios de diversas máquinas de forjado. *(a)* Prensa mecánica con accionamiento excéntrico; la flecha excéntrica se puede reemplazar con un cigüeñal para dar movimiento al ariete arriba y abajo. *(b)* Prensa de junta articulada. *(c)* Prensa de tornillo. *(d)* Prensa hidráulica.

Prensas de tornillo. Estas prensas (fig. 14.17d) obtienen su energía de un volantín, por lo que son *de energía limitada*. La carga de forjado se transmite a través de un tornillo vertical grande y el ariete se para cuando se disipa la energía del volantín. Si las matrices no cierran al final del ciclo, la operación se repite hasta que se complete el forjado. Las prensas de tornillo se utilizan para varias operaciones de matriz abierta y matriz cerrada. En particular, son adecuadas para pequeñas cantidades de producción, sobre todo partes delgadas con alta precisión, como los álabes de las turbinas. Las capacidades de las prensas van de 1.4 a 280 MN (160 a 31,500 toneladas cortas).

Martillos. Los martillos obtienen su energía de la energía potencial del ariete, que se convierte en energía cinética, por lo que son de *energía limitada*. A diferencia de las prensas hidráulicas, los martillos (como se infiere de su nombre) operan a altas velocidades y el tiempo reducido de formado minimiza el enfriamiento de una forja en caliente. De esta manera, las bajas velocidades de enfriamiento permiten el forjado de formas complejas, en especial aquéllas con cavidades delgadas y profundas. Por lo general, para completar el forjado se realizan varios impactos sucesivos sobre la misma matriz. Hay martillos disponibles en una variedad de diseños y son el tipo más versátil y menos costoso de equipo de forjado.

Martinetes. En los *martinetes mecánicos*, el recorrido del ariete hacia abajo se acelera con presión de vapor, aire o hidráulica hasta casi 750 kPa (100 psi). Los pesos de los arietes van de 225 a 22,500 kg (500 a 50,000 libras) con capacidades de energía que van hasta 1150 kJ (850,000 pies-libras). En la operación de los *martinetes por gravedad* (proceso conocido como **forjado de caída libre**), la energía se obtiene del ariete en caída libre (energía potencial). La energía disponible en un martinete es el producto del peso del ariete por la altura de su caída. Los pesos del ariete van de 180 a 4500 kg (400 a 10,000 libras) con capacidades de energía que van hasta 120 kJ (90,000 pies-libras).

Contramartillos. Este martillo tiene dos arietes que se acercan al mismo uno al otro, horizontal o verticalmente, a fin de forjar la parte. Como en las operaciones de forjado de matriz abierta, la parte se puede girar entre impactos para formar la pieza de trabajo de manera adecuada durante el forjado. Los contramartillos operan a altas velocidades y transmiten menos vibración a sus bases. Las capacidades van hasta 1200 kJ (900,000 pies-libras).

Máquinas de forjado de alto índice de energía (HERF). En este tipo de máquina, el ariete se acelera rápidamente por medio de gas inerte a alta presión y la parte se forja en un impacto a una gran velocidad. A pesar de que existen diversos tipos de estas máquinas, varios problemas asociados con su operación, mantenimiento, ruptura de las matrices y consideraciones de seguridad han limitado en gran medida su uso en la industria.

14.9 Economía del forjado

El costo del forjado implica diversos factores. Según la complejidad del forjado, los costos de herramentales y matrices van de moderados a elevados. Sin embargo, como en otras operaciones de manufactura, este costo se distribuye entre la cantidad de partes forjadas con el conjunto de matrices en particular. Por lo tanto, aunque el costo del material de cada pieza de trabajo permanece constante, los costos por pieza del montaje y del herramental disminuyen al aumentar la cantidad de forjas (fig. 14.18).

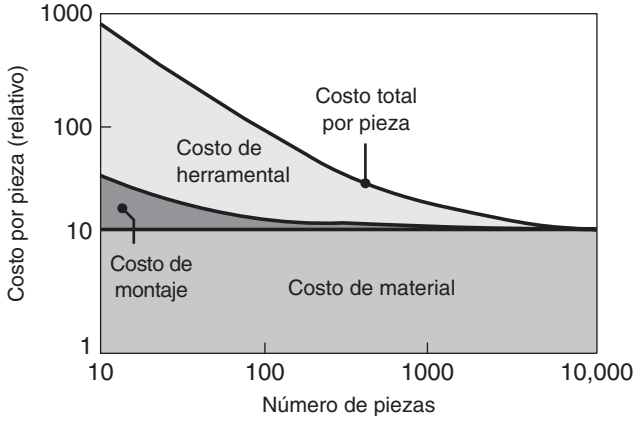


FIGURA 14.18 Costo característico por pieza en forjado; obsérvese cómo disminuyen los costos por pieza relativos al montaje y al herramental al aumentar el número de piezas forjadas si todas las piezas utilizan la misma matriz.

La relación del costo del material de la matriz con el costo total del forjado de la parte aumenta con el peso de las forjas; cuanto más costoso es el material, más alto será el costo del material respecto del costo total. Debido a que las matrices se deben fabricar y las operaciones de forjado se deben realizar, sin importar el tamaño de la forja, el costo de las matrices y de la operación de forjado respecto del costo del material es elevado para partes pequeñas y, por el contrario, los costos del material de la matriz son relativamente bajos.

El tamaño de las forjas también tiene el mismo efecto sobre el costo. Los tamaños van desde forjas pequeñas (como utensilios y pequeños componentes automovilísticos) hasta grandes (como engranes, cigüeñales y bielas para motores grandes). Al aumentar el tamaño de la forja, también se incrementa la proporción del costo del material en el costo total, aunque en menor proporción. Esto ocurre debido a que *(a)* el aumento progresivo en el costo de las matrices para matrices más grandes es relativamente pequeño, *(b)* la maquinaria y las operaciones involucradas son en lo fundamental las mismas, independientemente del tamaño de la forja, y *(c)* la mano de obra incorporada en cada pieza fabricada no es mucho mayor.

El costo total comprendido en una operación de forjado no se ve afectado de manera importante por el tipo de materiales forjados. Los costos de la mano de obra en el forjado suelen ser moderados, ya que se han reducido de manera significativa gracias a las operaciones automatizadas y controladas por computadora. Además, en la actualidad, las técnicas de diseño y manufactura se efectúan con la ayuda de las computadoras (capítulo 38), lo que produce ahorros importantes de tiempo y esfuerzos.

En un mercado global competitivo, el costo de forjado de una parte, en comparación con el de su producción por medio de otras técnicas como fundición, metalurgia de polvos, maquinado u otros métodos, es un factor que se debe considerar.

Por ejemplo, si se mantienen iguales todos los demás factores y dependiendo del número de piezas requeridas, la fabricación de una pieza mediante, digamos, la fundición en molde desechable, puede ser bastante más económica que su producción por medio de forjado para lotes más cortos de producción (fig. 14.19). Este método de fundición no requiere moldes ni herramentales costosos, en tanto que el forjado exige matrices costosas. Los aspectos competitivos de la selección de la manufactura y el proceso se tratarán con mayor detalle en el capítulo 40.

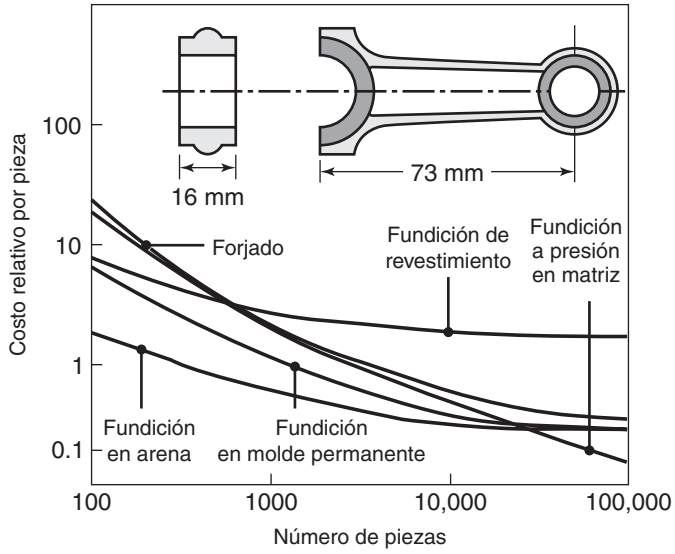


FIGURA 14.19 Costos unitarios relativos de una pequeña biela fabricada por medio de diferentes procesos de forjado y fundición. Obsérvese que, para grandes cantidades, el forjado es más económico. La fundición en arena es el proceso más económico para menos de 20,000 piezas.

ESTUDIO DE CASO 14.2 Componentes de la suspensión del automóvil Lotus Elise

La industria automotriz se ha visto sujeta cada vez más a una demandante serie de normas de desempeño, de costo, ambientales y de eficiencia del combustible. Una de las principales estrategias para mejorar el diseño del vehículo respecto de todas estas restricciones (aparentemente) contradictorias consiste en reducir el peso del auto mediante materiales y procesos de fabricación avanzados para preservar el desempeño y la seguridad. La optimización de los diseños anteriores ha demostrado que se pueden obtener ahorros de peso hasta de 34% en los componentes del sistema de suspensión, lo que es significativo, ya que las suspensiones constituyen casi 12% de la masa de un auto. Estos ahorros de peso se pueden lograr en gran medida con el desarrollo de diseños óptimos, utilizando herramientas analíticas avanzadas y forjas de acero de forma neta, cercana a la neta, en vez de componentes de hierro fundido. Además, ha habido ahorros importantes en los costos de muchas partes cuando se utilizan forjas optimizadas de acero en lugar de fundiciones y extrusiones de aluminio.

El Lotus Elise es un auto deportivo de alto rendimiento, diseñado para una conducción y un manejo más exigentes. El grupo Lotus investigó el uso de forjas de acero en lugar de soportes de suspensión con aluminio extruido para reducir el costo y mejorar la confiabilidad y el rendimiento. Sus esfuerzos de desarrollo consistieron en dos fases, como se muestra en la figura 14.20. La primera fase comprendía el desarrollo de un componente de acero forjado que se puede utilizar en los autos deportivos Elise ya existentes; la segunda fase comprendía la producción de un soporte de suspensión para un nuevo modelo.

Se desarrolló un nuevo diseño mediante un proceso interactivo con herramientas avanzadas de software para reducir el número de componentes y determinar la geometría óptima. El material seleccionado para el soporte fue un acero forjado enfriado por aire, que da un tamaño y microestructura uniforme de los granos y una alta resistencia uniforme sin necesidad de tratamiento térmico. Estos materiales también tienen resistencias a la fatiga casi 20% más altas que los aceros al carbono tradicionales, como el AISI 1548-HT, que se utiliza en aplicaciones similares.

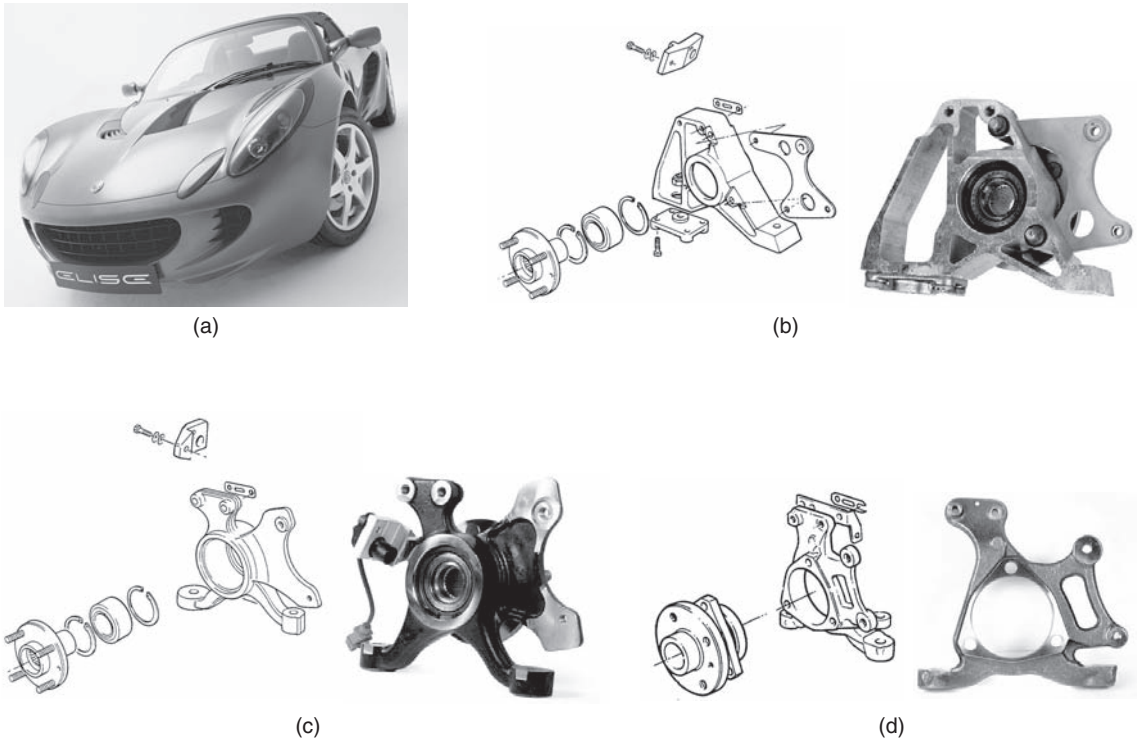


FIGURA 14.20 *(a)* Automóvil Lotus Elise serie 2; *(b)* ilustración del diseño original para los soportes verticales de la suspensión, mediante una extrusión de aluminio; *(c)* diseño de reemplazo utilizando una forja de acero; *(d)* diseño optimizado de forja de acero para nuevos modelos de autos. *Fuente: (a)* Cortesía de Fox Valley Motorcars, *(b)* a *(d)* Cortesía de Lotus Engineering y American Iron and Steel Institute.

TABLA 14.5

Comparación de diseños de soportes de suspensión del automóvil Lotus Elise

Dibujo de la figura 14.20	Material	Aplicación	Masa (kg)	Costo ($)
(b)	Extrusión de aluminio, soporte de acero, buje de acero, caja de acero	Diseño original	2.105	85
(c)	Acero forjado	Fase I	2.685 (+28%)	27.7 (−67%)
(d)	Acero forjado	Fase II	2.493 (+18%)	30.8 (−64%)

Los diseños modificados se resumen en la tabla 14.5. Como se podrá ver, el nuevo diseño optimizado de forjado (fig. 14.20d) produjo importantes ahorros de costos. Aunque también ocasiona un pequeño aumento de peso en comparación con el diseño de extrusión de aluminio, se reconoce que la penalidad por el peso es bastante pequeña y el uso de acero forjado para estos componentes tiene grandes ventajas en las condiciones de carga de fatiga que los componentes de la suspensión encuentran constantemente. El nuevo diseño también tenía ciertas ventajas de rendimiento dado que la rigidez del componente ahora es mayor, lo que se registró como una mejor satisfacción del cliente y mejor "sensación" durante su manejo. Además, el nuevo diseño redujo el número de partes requeridas, satisfaciendo así otro principio fundamental del diseño.

Fuente: Cortesía de Lotus Engineering y American Iron and Steel Institute.

RESUMEN

- El forjado denota una familia de procesos de trabajo de los metales en los que la deformación de la pieza de trabajo se realiza mediante fuerzas de compresión aplicadas por lo general a través de una serie de matrices. El forjado tiene la capacidad de producir una amplia variedad de partes estructurales con características favorables, como resistencia, tenacidad, precisión dimensional y confiabilidad en el servicio.
- El proceso de forjado puede efectuarse a temperatura ambiente, media o alta. El comportamiento del material de la pieza de trabajo durante la deformación, la fricción, la transferencia de calor y las características de flujo del material en la cavidad de la matriz son factores que deben considerarse, como la selección adecuada del material para las matrices, los lubricantes, la temperatura de la pieza de trabajo y de las matrices, las velocidades de forjado y el equipo.
- Si el proceso de forjado no se controla de manera apropiada se pueden desarrollar varios defectos, sobre todo en la calidad de la pieza de trabajo, la forma del tocho o de la forma previa y la geometría de la matriz. En la actualidad, se usan técnicas de diseño y fabricación asistidas por computadora, sobre todo en el diseño y fabricación de matrices, diseño de formas previas, predicción del flujo de material y para evitar la posibilidad de defectos internos y externos durante el forjado.
- Existen varias máquinas de forjado, cada una con sus propias capacidades y características. En la actualidad, las operaciones de forjado se automatizan en gran medida con el uso de robots industriales y controles por computadora.
- El forjado rotatorio es una operación de forja que reduce el diámetro de una barra o tubo sólido con el movimiento radial alternativo de un conjunto de dos o cuatro matrices. El proceso es apropiado para producir tramos cortos o largos de barra o tubería con diversos perfiles internos o externos.
- Debido a que las fallas en las matrices tienen un importante impacto económico, su diseño, la selección del material y el método de producción son de suma importancia. Existen varios materiales para matrices y métodos de fabricación, incluyendo procesos avanzados de remoción del material y de acabado.

TÉRMINOS CLAVE

Abarrilamiento
Acuñado
Bigotes o rebaba de forja
Cabeceado
Dimensionado
Ensayo de torsión en caliente
Forja de desbaste
Forjabilidad
Forjado
Forjado con dado cóncavo
Forjado con dado convexo
Forjado de forma neta
Forjado de matriz abierta
Forjado de precisión
Forjado en matriz cerrada
Forjado isotérmico
Forjado orbital
Forjado por matriz de impresión
Forjado progresivo
Forjado rotatorio
Granos de orilla
Martillos
Penetrado
Prensas
Punzonado de cavidades o clavado
Recalcado

BIBLIOGRAFÍA

Altan, T., Ngaile, G. y Shen, G. (eds.), *Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications*, ASM International, 2004.

ASM Handbook, Vol. 14: *Forming and Forging*, ASM International, 1988.

Blazynski, T. Z., *Plasticity and Modern Metal-forming Technology*, Elsevier, 1989.
Byrer, T. G. (ed.), *Forging Handbook*, Forging Industry Association, 1985.
Dieter, G. E., Kuhn, H. A. y Semiatin, S. L. (eds.), *Handbook of Workability and Process Design*, ASM International, 2003.
Lange, K. (ed.), *Handbook of Metal Forming*, McGraw-Hill, 1985.
Open Die Forging Manual, 3a. ed., Forging Industry Association, 1982.
Prasad, Y. V. R. K. y Sasidhara, S. (eds.), *Hot Working Guide: A Compendium of Processing Maps*, ASM International, 1997.
Product Design Guide for Forging, Forging Industry Association, 1997.
Reid, D. T. (ed.), *Fundamentals of Tool Design*, 3a. ed., Society of Manufacturing Engineers, 1991.
Thomas, A., *DFRA Forging Handbook: Die Design*, Drop Forging Research Association, 1980.
Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4a. ed., Vol. 2, *Forming*, Society of Manufacturing Engineers, 1984.

PREGUNTAS DE REPASO

14.1 ¿Cuál es la diferencia entre forjado en frío, en caliente y a temperatura media?
14.2 Explique la diferencia entre forjado de matriz abierta y por impresión de matriz.
14.3 Explique la diferencia entre forjado con dado cóncavo, convexo y bloqueo.
14.4 ¿Qué factores están involucrados en el forjado de precisión?
14.5 ¿Qué tipo de partes puede producir el forjado rotatorio?
14.6 Explique las características de una matriz típica de forjado.
14.7 Explique a qué se refieren los términos "de carga limitada", "de energía limitada" y "de recorrido o carrera limitada" en relación con las máquinas para forjado.
14.8 ¿Qué es un bigote o rebaba de forja?
14.9 ¿Por qué el punzonado de cavidades, o clavado, es una alternativa atractiva para producir matrices simples?
14.10 ¿Cuál es la diferencia entre penetrado y troquelado?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

14.11 ¿Cómo puede decir si una parte está forjada o fundida? Explique las características que investigaría.
14.12 ¿Por qué es importante la forma intermedia de una parte en las operaciones de forjado?
14.13 Explique las funciones de las rebabas en un forjado por impresión de matriz.
14.14 ¿Por qué el control del volumen de la pieza en bruto es importante en el forjado en matriz cerrada?
14.15 ¿Por qué hay tantos tipos de máquinas para forjado? Describe las capacidades y limitaciones de cada una.
14.16 ¿Cuáles son las ventajas y limitaciones de *(a)* una operación de desbaste, y *(b)* forjado isotérmico?
14.17 Describa sus observaciones en relación con la figura 14.16.
14.18 ¿Cuáles son las ventajas y limitaciones de utilizar insertos de matrices?
14.19 Revise la figura 14.5d y explique por qué los ángulos de salida interiores son más grandes que los exteriores. ¿Esto también es cierto para la fundición de molde permanente?
14.20 Haga comentarios en relación con el patrón de flujo de los granos en la figura 14.12.
14.21 Haga comentarios en relación con el control del espesor final de un tubo en la figura 14.15.
14.22 Si inspecciona algunos productos forjados (como una llave para tubos) puede ver que las letras sobre ellos se resaltan en vez de estar rebajadas. Explique por qué están producidas de esa manera.
14.23 Describa las dificultades comprendidas al definir con precisión el término "forjabilidad".
14.24 Identifique las normas de diseño de la fundición (descritas en la sección 12.2) que también se pueden aplicar al forjado.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

14.25 Calcule la fuerza de forjado de una pieza de trabajo sólida, cilíndrica, producida con acero 1020, que tiene 3.5 pulgadas de altura y 5 pulgadas de diámetro, y cuya altura se va a reducir 30%. Considere un coeficiente de fricción de 0.2.

14.26 Mediante la ecuación 14.2, estime la fuerza de forjado de la pieza de trabajo del problema 14.25, suponiendo que es un forjado complejo y que el área proyectada de la rebaba es 40% mayor que el área proyectada de la pieza de trabajo forjada.

14.27 Tome dos especímenes sólidos cilíndricos del mismo diámetro pero de diferentes alturas, y comprímalos (sin fricción) al mismo porcentaje de reducción de la altura. Muestre que los diámetros finales son los mismos.

14.28 En el ejemplo 14.1, calcule la fuerza de forjado, suponiendo que el material es aluminio 1100-O y que el coeficiente de fricción es 0.2.

14.29 Mediante la ecuación 14.1, realice un diagrama de la fuerza de forjado (F) en función del radio (r) de la pieza de trabajo. Suponga que el esfuerzo de flujo (Y_f) del material es constante. Recuerde que el volumen del material permanece constante durante el forjado, así que cuando h disminuye, r aumenta.

14.30 ¿Cómo haría para calcular la fuerza requerida en una operación de punzonado de cavidades, suponiendo que el material es acero dulce y el área proyectada de la impresión es 0.5 pulg^2? Explique con claridad. (*Sugerencia*: vea la sección 2.6 sobre dureza).

14.31 Una prensa mecánica se activa por medio de un motor de 30 hp y opera a 40 golpes por minuto. Utilice un volantín, de modo que la velocidad del cigüeñal no varíe de manera considerable durante la carrera. Si ésta es de 6 pulgadas, ¿cuál es la máxima fuerza constante que se puede ejercer sobre toda la longitud de la carrera o recorrido?

14.32 Para la misma prensa mecánica del problema 14.31, ¿a qué espesor se puede forjar un cilindro de aluminio 5052-O que tiene 3 pulgadas de diámetro y 2 pulgadas de altura que se forjará antes de que la prensa se detenga?

14.33 Suponga que es un instructor que cubre los temas descritos en este capítulo y está haciendo un examen sobre los diversos aspectos para evaluar los conocimientos de los estudiantes. Elabore dos problemas cuantitativos y proporcione las respuestas.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

14.34 Diseñe un método experimental por el cual pueda medir sólo la fuerza requerida para forjar la rebaba en el forjado por impresión de matriz.

14.35 Suponga que representa a la industria del forjado y que está enfrentando a un representante de la industria de la fundición. ¿Qué le diría a esa persona sobre los méritos de los procesos de forjado?

14.36 En la figura P14.36 se muestra una forja redonda por impresión de matriz producida con una pieza en bruto cilíndrica, como se muestra a la izquierda. Conforme a lo descrito en este capítulo, dichas partes están hechas en una secuencia de operaciones de forjado. Sugiera una secuencia de pasos intermedios de forjado para hacer la parte de la derecha y dibuje la forma de las matrices requeridas.

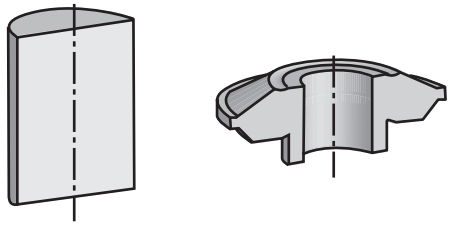


FIGURA P14.36

14.37 Los engranes se pueden fabricar por medio de forjado, en particular los engranes cónicos. Investigue en la bibliografía técnica y describa la secuencia de los pasos de manufactura comprendidos. Comente la calidad de dicho engrane si se compara con uno fabricado mediante los procesos de fundición descritos en el capítulo 11.

14.38 El forjado es un método de producción de álabes para turbinas de motores a reacción (además de la fundición o el maquinado). Estudie el diseño de dichos álabes y la literatura técnica; después prepare un procedimiento paso por paso para producir álabes mediante forjado. Comente las posibles dificultades que se pueden encontrar y ofrezca soluciones.

14.39 Al comparar partes forjadas y fundidas, notamos que una misma parte se puede fabricar mediante ambos procesos. Comente las ventajas y desventajas de cada proceso, considerando factores como el tamaño de la parte y la complejidad de la forma, la flexibilidad del diseño, las propiedades mecánicas desarrolladas y el desempeño durante el servicio.

14.40 Con base en los datos proporcionados en la tabla 14.3, obtenga el valor aproximado de la resistencia a la fluencia de estos materiales a temperaturas de forjado en caliente. Dibuje una gráfica de barras que muestre el diá-

metro máximo de una parte forjada en caliente producida en una prensa con capacidad de 60 toneladas en función del material.

14.41 Consiga varios pernos, clavos y tornillos de diferentes tamaños. Mida el volumen de las cabezas y calcule la relación original sin soporte de longitud a diámetro para estas partes. Analice estos números en relación con lo tratado en el texto.

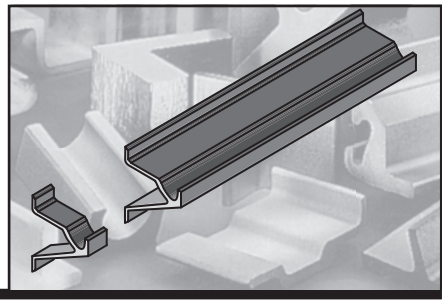
14.42 Revise la secuencia de operaciones en la producción del perno escalonado que se muestra en la figura 14.13. Si no se efectúa el paso de recalcado cónico, ¿cuáles serían las consecuencias en la parte final?

14.43 Efectúe operaciones de forja de desbaste simple en piezas de arcilla mediante una pieza plana de madera y realice observaciones sobre el ensanchamiento de las piezas en función de las secciones transversales originales de los especímenes de arcilla (por ejemplo, cuadrada o rectangular con diferentes relaciones de espesor a anchura).

14.44 Discuta sobre los posibles problemas ambientales relacionados con las operaciones descritas en este capítulo.

CAPÍTULO

15 Extrusión y estirado (trefilado) de metales



15.1 Introducción 400
15.2 El proceso de extrusión 402
15.3 Extrusión en caliente 405
15.4 Extrusión en frío 409
15.5 Defectos de la extrusión 413
15.6 Equipo para extrusión 414
15.7 El proceso de estirado *(trefilado)* 415
15.8 Prácticas de estirado 416
15.9 Defectos del estirado y esfuerzos residuales 419
15.10 Equipo para estirado 419

EJEMPLO:

15.1 Cálculo de la fuerza de extrusión en caliente 404
15.2 Manufactura de un disipador de calor de aluminio 408
15.3 Parte extruida en frío 411

En este capítulo se examinan los fundamentos de la extrusión y el estirado (trefilado) y sus aplicaciones en la manufactura. En particular, se describe lo siguiente:

- Características de la extrusión directa, indirecta e hidrostática.
- Fuerzas comprendidas en la extrusión en función de los parámetros del material y del procesamiento.
- Prácticas de extrusión y diseño de matrices para evitar defectos comunes.
- Estirado (trefilado) de barra, alambres y tubería.
- Diseño de matrices para la integridad de los productos.

Partes típicas fabricadas mediante extrusión y estirado (trefilado): Piezas grandes con una amplia variedad de secciones transversales constantes, barras redondas, flechas, barras para maquinaria y aplicaciones de trenes de potencia automovilísticos, escaleras de aluminio, tubos contráctiles, alambre para diversas aplicaciones eléctricas y mecánicas.

Procesos alternativos: Maquinado, metalurgia de polvos y fundición.

15.1 Introducción

La extrusión y el estirado (trefilado) tienen numerosas aplicaciones en la manufactura de productos continuos y discretos a partir de una gran variedad de metales y aleaciones. En la **extrusión**, una palanquilla cilíndrica se fuerza a través de un dado o matriz (fig. 15.1) de manera similar a como se aprieta el tubo de la pasta dental o se extruye Play-Doh® (una masa para niños) en varias secciones transversales en una prensa de juguete. Por medio de la extrusión se pueden producir una gran variedad de secciones transversales sólidas o huecas, que fundamentalmente son partes semiterminadas. Una característica de la extrusión (del latín *extrudere*, que significa "sacar por la fuerza") es que pueden ocurrir grandes deformaciones sin fracturas (ver sección 2.2.8) porque el material se somete a compresión triaxial elevada. Debido a que la geometría del dado permanece sin cambios durante la operación, por lo general los productos extruidos tienen una sección transversal constante. En el siglo XVIII, los tubos de plomo se producían por medio de extrusión. Como se describe en la sección 19.2, los plásticos se extruyen ampliamente.

Entre los productos comunes fabricados mediante extrusión se encuentran los rieles para puertas corredizas, los marcos de ventanas, la tubería de diversas secciones transversales, las escaleras de aluminio y numerosas formas estructurales y arquitectónicas. Los extrudidos se pueden cortar a las longitudes deseadas, que después se convierten en partes discretas, como soportes, engranes y ganchos para ropa (fig. 15.2). Los mate-

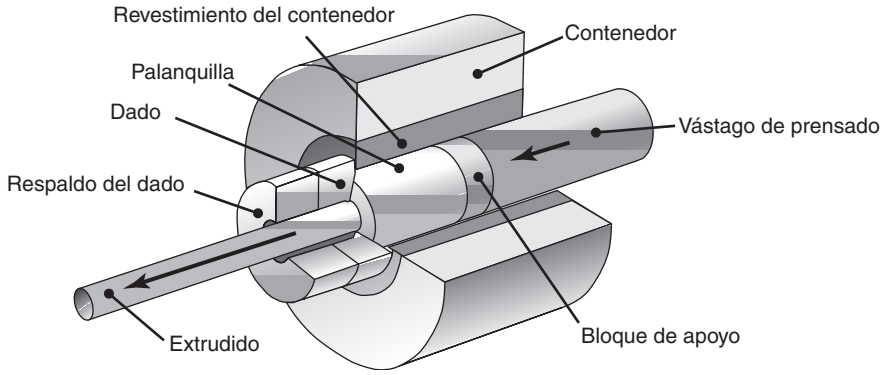


FIGURA 15.1 Esquema del proceso de extrusión directa.

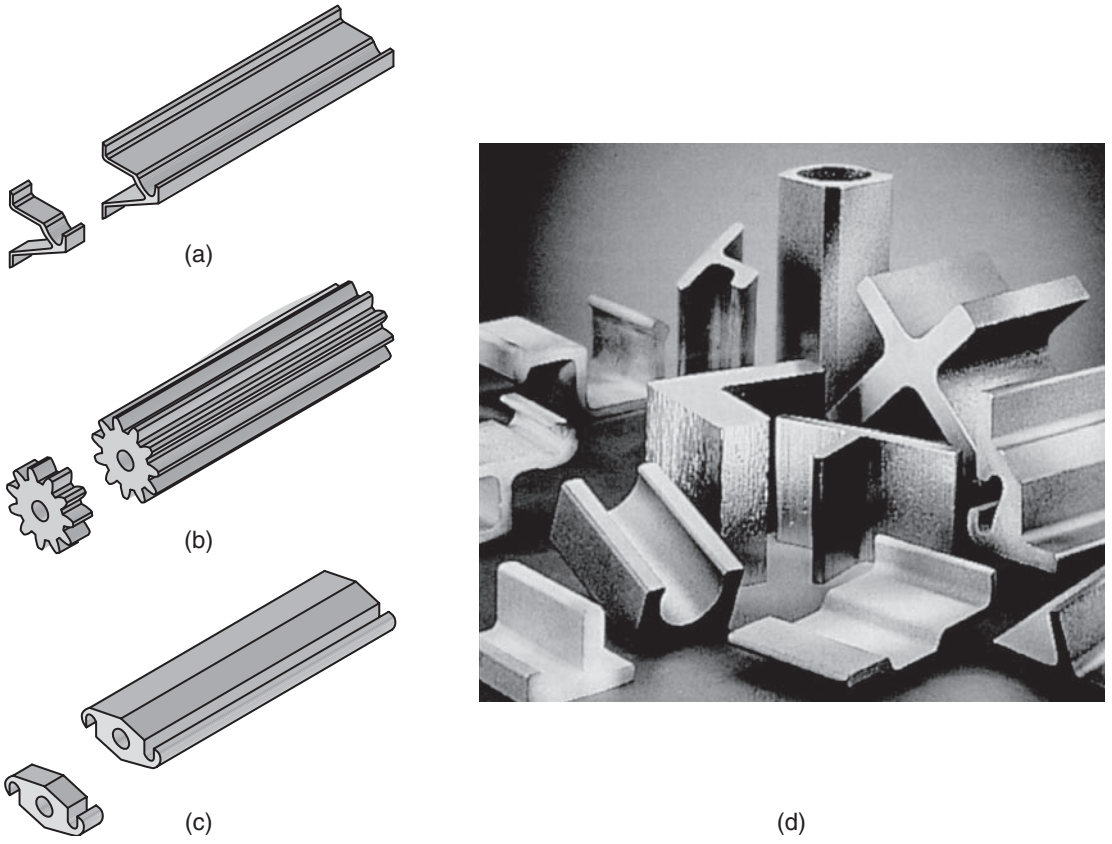


FIGURA 15.2 Extrudidos y ejemplos de productos fabricados mediante el corte de extrudidos. *Fuente*: Cortesía de Plymouth Extruded Shapes.

riales comúnmente extruidos son el aluminio, cobre, acero, magnesio y plomo; también se pueden extruir otros metales y aleaciones, con diferentes niveles de dificultad.

Debido a que en la extrusión existe una cámara, cada palanquilla se extruye de manera individual, así que éste es un proceso por lotes o semicontinuo. La extrusión puede ser económica tanto para corridas de producción grandes como para las cortas. Por lo general, los costos del herramental son bajos, en particular para producir secciones transversales simples y sólidas.

Dependiendo de la ductilidad del material, la extrusión se puede efectuar a temperatura ambiente o elevada. Con frecuencia, la extrusión a temperatura ambiente se combina con operaciones de forjado, en cuyo caso se conoce como **extrusión en frío** (ver sección 14.4). Tiene aplicaciones importantes, incluyendo sujetadores y componentes para automóviles, bicicletas, motocicletas, maquinaria pesada y equipo de transporte.

El **estirado** (**trefilado**) es una operación desarrollada entre los años 1000 y 1500 d.C., en la que la sección transversal de una barra sólida, alambrón o tubería se reduce o cambia de forma al pasarla a través de un dado. Las barras estiradas se utilizan para flechas, husillos y pequeños pistones y como materia prima para sujetadores (como remaches, tornillos y pernos). Además de las barras redondas, se pueden estirar varios perfiles.

La distinción entre los términos **barra** y **alambre** es arbitraria, ya que la barra tiene una sección transversal mayor a la del alambre. En la industria, por lo general el alambre se define como barra que se ha estirado (trefilado) a través de un dado, por lo menos una vez. El estirado de alambres implica diámetros más pequeños que el estirado de barras, con tamaños inferiores a 0.01 mm (0.0005 pulgada) para hilo magnético, e incluso menores para su uso en fusibles de muy baja corriente.

15.2 El proceso de extrusión

Existen tres tipos básicos de extrusión. En el proceso más común (conocido como **extrusión directa** o **en avance**), se coloca una palanquilla en una *cámara* (contenedor) y se fuerza a través de la abertura de un dado mediante el accionamiento hidráulico de un pistón (vástago o punzón de presión), como se muestra en la figura 15.1. La abertura del dado puede ser redonda o tener diversas formas, lo que depende de la forma extruida deseada. La función del bloque de apoyo o ficticio es proteger la punta del vástago de presión, sobre todo en la extrusión en caliente. Otros tipos de extrusión son la indirecta, la hidrostática y la de impacto.

En la extrusión **indirecta** (también conocida como invertida o retroextrusión), el dado se mueve hacia la palanquilla no extruida (fig. 15.3a). En la extrusión **hidrostática** (fig. 15.3b), la palanquilla tiene un diámetro más pequeño que la cámara (que se llena con un fluido) y la presión se transmite a la palanquilla por medio de un pistón. A diferencia de la extrusión directa, no existe fricción a vencer en las paredes del contenedor, porque la palanquilla se encuentra estacionaria con respecto al mismo. Un tipo menos común de extrusión es la *extrusión lateral* (o de *lado*) (fig. 15.3c).

Como se puede ver en la figura 15.4, las variables geométricas en la extrusión son el ángulo del dado (α) y la relación del área transversal de la palanquilla con la del producto extruido (A_o/A_f), conocida como **relación de extrusión** (R). Otras variables son la

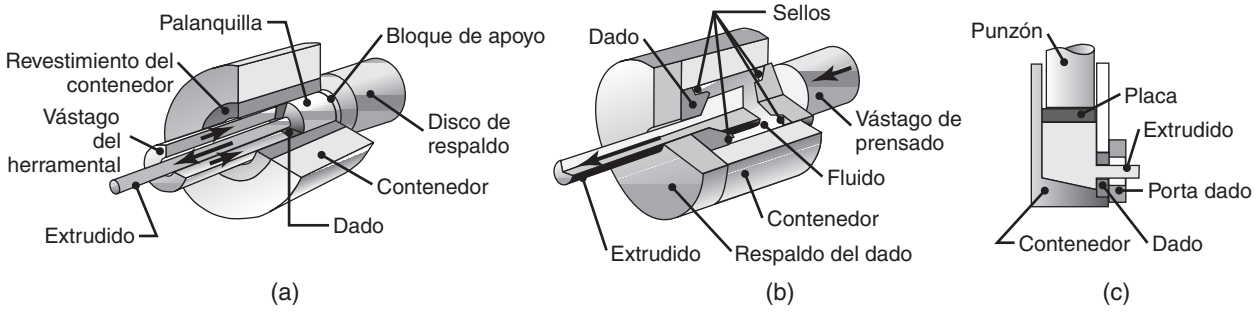


FIGURA 15.3 Tipos de extrusión: *(a)* indirecta, *(b)* hidrostática; *(c)* lateral.

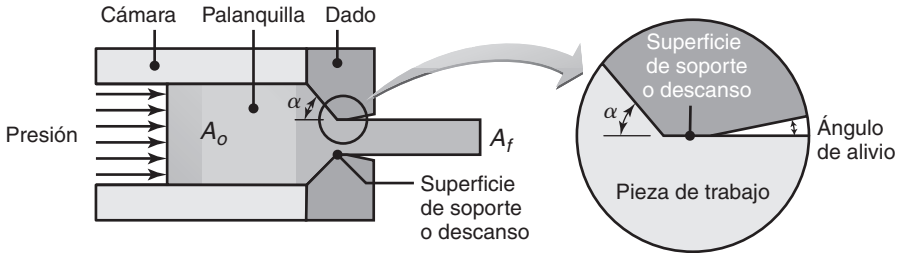


FIGURA 15.4 Variables del proceso en extrusión directa. Todos, el ángulo del dado, la reducción en la sección transversal, la velocidad de extrusión, la temperatura de la palanquilla y la lubricación, afectan la presión de la extrusión.

temperatura de la palanquilla, la velocidad a la que avanza el pistón y el tipo de lubricante utilizado.

Fuerza de extrusión. La fuerza requerida para la extrusión depende de *(a)* la resistencia del material de la palanquilla, *(b)* la relación de extrusión, *(c)* la fricción entre la palanquilla y las superficies de la cámara y el dado, y *(d)* las variables del proceso, como la temperatura de la palanquilla y la velocidad de extrusión. La *fuerza de extrusión* (*F*) se puede estimar a partir de la fórmula:

$$F = A_o k \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right) \tag{15.1}$$

en la que k es la **constante de extrusión** (que se determina de manera experimental), y A_o y A_f son las áreas de la palanquilla y del producto extruido, respectivamente. De este modo, el valor de k en la ecuación 15.1 es una medida de la resistencia del material que se extruye y las condiciones de fricción. En la figura 15.5 se dan los valores de k de diversos metales para una gama de temperaturas de extrusión.

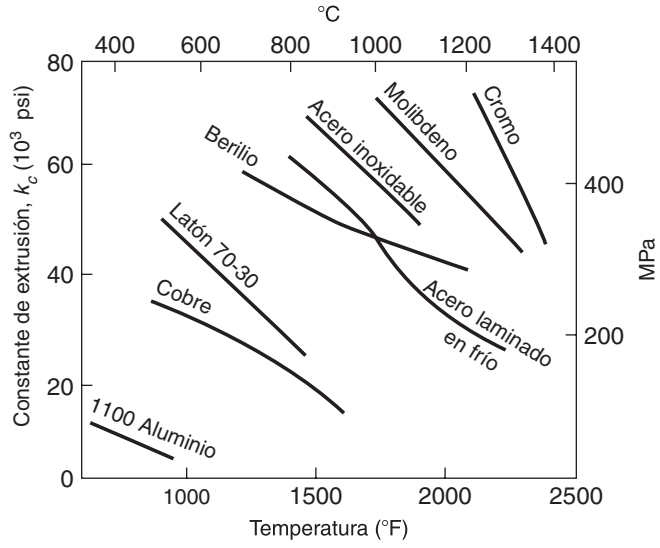


FIGURA 15.5 Constante de extrusión k de diversos metales a diferentes temperaturas. *Fuente:* P. Loewenstein.

EJEMPLO 15.1 Cálculo de la fuerza de extrusión en caliente

Una palanquilla redonda hecha de latón 70-30 se extruye a una temperatura de 1250 °F (675 °C). Su diámetro es de 5 pulgadas (125 mm) y el diámetro de la extrusión es de 2 pulgadas (50 mm). Calcúlese la fuerza de extrusión requerida.

Solución La fuerza de extrusión se calcula mediante la ecuación 15.1, en la que la constante de extrusión (k) se obtiene de la figura 15.5. Para este material, $k = 35{,}000$ psi (250 MPa) a la temperatura de extrusión determinada. Por lo tanto,

$$F = \pi(2.5)^2(35{,}000)\ln\left[\frac{\pi(2.5)^2}{\pi(1.0)^2}\right] = 1.26 \times 10^6 \text{ lb}$$

$$= 630 \text{ toneladas} = 5.5 \text{ MN}$$

(Ver en la sección 15.6 las capacidades de las prensas de extrusión.)

Flujo del metal en la extrusión. El patrón de flujo del metal en la extrusión, como en otros procesos de formado, es importante por su influencia en la calidad y las propiedades mecánicas del producto extruido. Este patrón se determina con base en el principio básico de que la energía se minimiza en cualquiera de los procesos citados. El material fluye longitudinalmente, de modo muy similar al flujo de un fluido incompresible en un canal; por lo tanto, los productos extruidos tienen una estructura de granos alargada (orientación preferida). La sección 15.5 describe la manera en que el flujo inapropiado del metal puede producir varios defectos en el producto extruido durante la extrusión.

Una técnica común para investigar el patrón de flujo consiste en seccionar la palanquilla redonda longitudinalmente a la mitad y después marcar una cara con un patrón de rejilla cuadrada. Las dos mitades se colocan juntas dentro de la cámara y se extruyen. Luego se separan y se estudian en forma individual. En la figura 15.6 se muestran los patrones de flujo comunes obtenidos mediante esta técnica para el caso de extrusión directa con *dados rectos* (ángulo del dado de 90°). El patrón de flujo es función de diversas variables, incluyendo la fricción.

En la leyenda de la figura 15.6 se describen las condiciones en que ocurren estos patrones de flujo. Obsérvese las **zonas de metal muerto** en las figuras 15.6b y c, en las que el metal se encuentra básicamente estacionario en las esquinas. Esta situación es similar al estancamiento del flujo de un fluido en los canales que tienen ángulos agudos o vueltas. Por ejemplo, el aluminio suele extruirse en caliente, con dados rectos y sin nin-

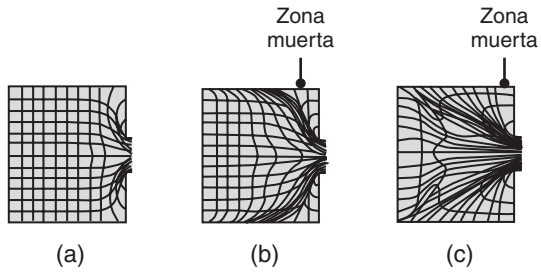


FIGURA 15.6 Tipos de flujo metálico en la extrusión con dados rectos o a 90°. *(a)* Patrón de flujo obtenido a baja fricción o en extrusión indirecta. *(b)* Patrón obtenido con alta fricción en las interfaces de la palanquilla y la cámara. *(c)* Patrón obtenido con alta fricción o con enfriamiento de las regiones exteriores de la palanquilla dentro de la cámara. Este tipo de patrón, que se observa en metales cuya resistencia aumenta con rapidez al disminuir la temperatura, provoca un defecto conocido como defecto (o extrudido) tipo tubo.

guna lubricación. La superficie brillante, satinada, es resultado del flujo del material por la interfaz con la zona de metal muerto.

Parámetros del proceso. Debido a que tienen alta ductilidad, el aluminio forjable, el cobre, el magnesio y sus aleaciones, los aceros comunes y los inoxidables, se extruyen con relativa facilidad en diversas formas. También pueden extruirse otros metales (como el titanio y los metales refractarios), pero sólo con cierta dificultad y considerable desgaste del dado.

En la práctica, las relaciones de extrusión (R) van por lo general de 10 a 100. Pueden ser mayores en aplicaciones especiales (400 para metales no ferrosos más blandos), o inferiores en materiales menos dúctiles, aunque la relación tiene que ser por lo menos 4 para deformar plásticamente el material a través de toda la masa de la pieza de trabajo. Es común que los productos extruidos presenten una longitud menor a 7.5 m (25 pies) debido a la dificultad de manejar magnitudes más grandes, pero pueden tener una longitud hasta de 30 m (100 pies). Las velocidades del pistón varían hasta 0.5 m/s (100 pies/min). En general, son preferibles velocidades inferiores para aluminio, magnesio y cobre, con velocidades superiores para aceros, titanio y aleaciones refractarias. Es común que las tolerancias dimensionales en la extrusión se encuentren en el intervalo de ± 0.25-2.5 mm ($\pm 0.01 - 0.1$ pulgada) y se incrementen con el aumento de la sección transversal.

La mayoría de los productos extruidos, en particular los que tienen secciones transversales pequeñas, requieren enderezado y torcido. Esto suele realizarse mediante el estirado y el torcido de dichos productos en un estirador hidráulico equipado con mandíbulas. Un ángulo del dado hace que una pequeña parte del extremo de la palanquilla quede en la cámara tras concluir la operación. Esta parte (conocida como desperdicio o *extremo tope*) se elimina recortando la extrusión a la salida del dado y extrayendo el desperdicio de la cámara. De manera alternativa, se puede colocar otra palanquilla o bloque de grafito en la cámara para extruir la pieza que queda de la extrusión anterior.

En la **extrusión coaxial** o de **revestimiento** se extruyen juntas palanquillas coaxiales, siempre que la resistencia y ductilidad de los dos metales sean compatibles. Un ejemplo es el revestimiento de cobre con plata. Los *extrudidos escalonados* se producen extruyendo la palanquilla parcialmente en un dado y después en uno o más dados mayores (ver también *extrusión en frío*, sección 15.4). La extrusión lateral (fig. 15.3c) se utiliza para revestir cable o recubrir el cable eléctrico con plástico.

15.3 Extrusión en caliente

Para metales y aleaciones que carecen de suficiente ductilidad a temperatura ambiente (o para reducir las fuerzas requeridas), la extrusión se efectúa a temperaturas elevadas (tabla 15.1). Como en todas las demás operaciones de trabajado en caliente, la extrusión en caliente tiene requisitos especiales debido a las altas temperaturas de operación. Por ejemplo, el desgaste de un dado puede ser excesivo, y el enfriamiento de las superficies de la palanquilla caliente (en la cámara más fría) y del dado puede provocar una deformación muy poco uniforme (fig. 15.6c). Para reducir el enfriamiento de la palanquilla y prolongar la vida del dado, los dados de extrusión se pueden precalentar, como se hace en las operaciones de forjado en caliente.

Cuando la palanquilla está caliente, desarrolla una capa de óxido, a menos que se caliente en un horno de atmósfera inerte. Esta capa puede ser abrasiva (ver sección 33.2) y afectar el patrón de flujo del material. También da como resultado un producto extruido que puede ser inaceptable cuando se requiere un buen acabado superficial. Para evitar la formación de capas de óxido en el producto extruido en caliente, el bloque de apoyo colocado delante del pistón (fig. 15.1) se fabrica de un diámetro más pequeño que el contenedor, y en éste se queda, en consecuencia, un cascarón delgado (*costra*) que está constituido principalmente por la capa exterior oxidada de la palanquilla. Después se extrae la costra de la cámara.

TABLA 15.1

Intervalos característicos de temperaturas de extrusión para diversos metales y aleaciones

	°C
Plomo	200–250
Aluminio y sus aleaciones	375–475
Cobre y sus aleaciones	650–975
Aceros	875–1300
Aleaciones refractarias	975–2200

Diseño de los dados y matrices. El diseño del dado requiere considerable experiencia, como puede apreciarse al revisar la figura 15.7. Las *matrices en escuadra (dados de corte*) se utilizan en la extrusión de metales no ferrosos, en particular aluminio. Las matrices en escuadra desarrollan zonas de metal muerto, que a su vez forman un "ángulo de dado" (ver figs. 15.6b y c) a lo largo del cual fluye el material en el área de deformación. Estas zonas producen extrudidos con terminados brillantes, debido al bruñido que ocurre conforme el material fluye sobre la superficie del "ángulo de dado".

La *tubería* se extruye a partir de una palanquilla sólida o hueca. Por lo general, el espesor de la pared se limita a 1 mm (0.040 pulgada) para el aluminio, 3 mm (0.125 pulgada) para los aceros al carbono y 5 mm (0.20 pulgada) para los aceros inoxidables. Cuando se utilizan palanquillas sólidas, el pistón se equipa con un mandril que perfora un orificio en la palanquilla. También pueden extruirse así palanquillas con un orificio previamente perforado. Debido a la fricción y severidad de la deformación, los extrudidos de paredes delgadas son más difíciles de producir que los de paredes gruesas.

Las *secciones transversales huecas* (fig. 15.8a) se pueden extruir con métodos de cámara de soldadura y utilizando diversos dados conocidos como **dados de araña, dados tipo ojo de buey** y **dados tipo puente** (fig. 15.9b). Durante la extrusión, el metal se divide y fluye alrededor de los soportes del mandril interno en forma de filamentos. (Esta condición es muy similar a la del flujo de aire alrededor de un auto en movimiento y que se reúne corriente abajo, o del agua que fluye alrededor de grandes rocas en un río y que se reúne posteriormente.) Los filamentos que se extruyen se vuelven a soldar bajo las altas presiones existentes en la cámara de soldado antes de salir a través de la matriz. Las superficies resoldadas tienen buena resistencia porque no se exponen al ambiente, que de lo contrario desarrollaría óxidos en ellas inhibiendo la soldadura apropiada. Sin embargo, el proceso de la cámara de soldado es adecuado sólo para el aluminio y algunas de sus alea-

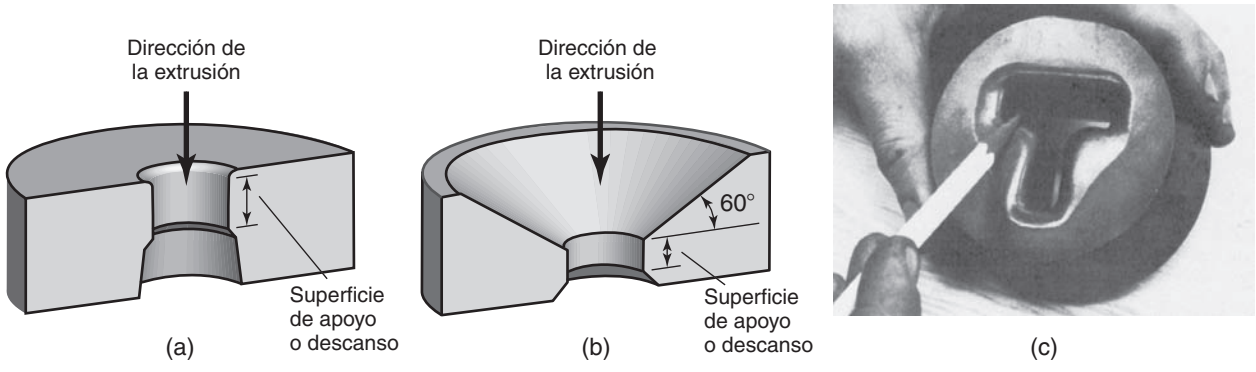


FIGURA 15.7 Configuraciones comunes de dados de extrusión: *(a)* dado para metales no ferrosos; *(b)* dado para metales ferrosos; *(c)* dado para extrusión en forma de T fabricado de acero para dados o matrices para trabajo en caliente y utilizado con vidrio fundido como lubricante. *Fuente*: © Cortesía de LTV Steel Company.

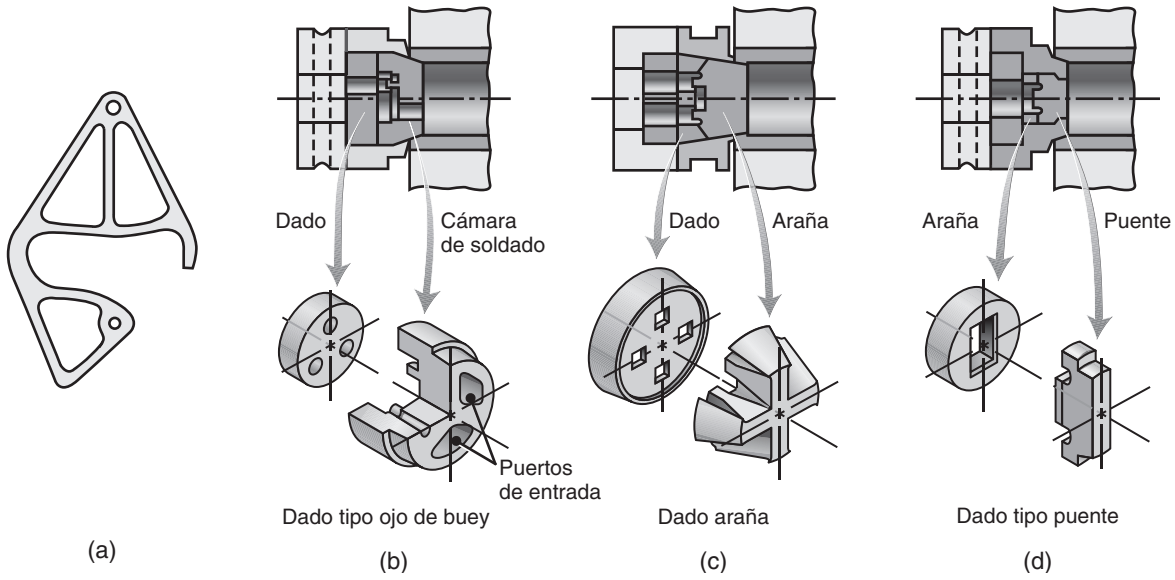


FIGURA 15.8 *(a)* Seguro para escalera de aluminio 6063-T6 extruido para escaleras de extensión de aluminio. Esta parte tiene 8 mm (5/16 pulgada) de espesor y se corta con una sierra a partir de la pieza extruida (ver fig. 15.2). *(b)* a *(d)* Componentes de diversos dados para extrusión de formas huecas intrincadas. *Fuente: (b)* a *(d)* K. Laue y H. Stenger.

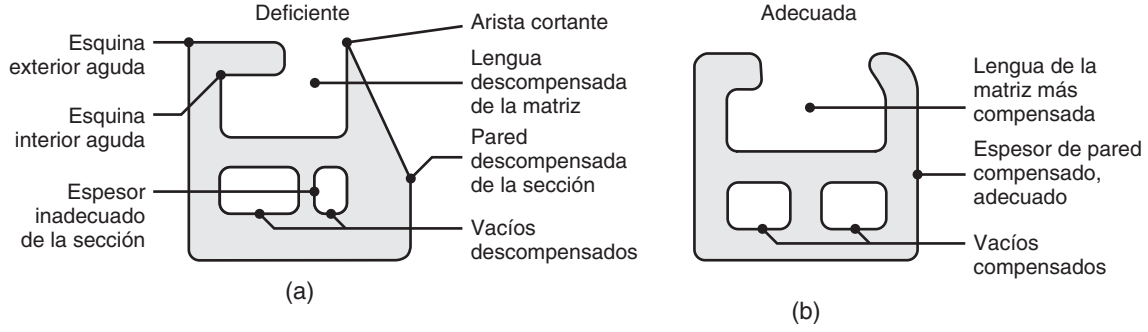


FIGURA 15.9 Ejemplos de secciones transversales deficiente y adecuada para extrusión. Obsérvese la importancia de eliminar las esquinas agudas y de mantener uniformes los espesores de las secciones. *Fuente*: J. G. Bralla (ed.), *Handbook of Product Design for Manufacturing*. New York: McGraw-Hill Publishing Company, 1986. Uso con permiso.

ciones, debido a su capacidad para desarrollar una soldadura resistente bajo presión (como se describe en la sección 30.2). Por supuesto que no se pueden utilizar lubricantes, porque evitan la resoldadura del metal dentro del dado.

En la figura 15.9 se ilustran los lineamientos para el diseño apropiado del dado para extrusión. Obsérvese *(a)* la importancia de la simetría de una sección transversal, *(b)* la prevención de esquinas puntiagudas, y *(c)* la prevención de cambios extremos en las dimensiones del dado dentro de la sección transversal.

Materiales para dados y matrices. Por lo general, como materiales para dados se utilizan los aceros para dados y matrices para trabajado en caliente (sección 5.7). Se pueden aplicar revestimientos (como el zirconio parcialmente estabilizado) a los dados para prolongar su vida. Los dados de zirconio parcialmente estabilizado (sección 8.2.2) tam-

bién se usan para extrusión en caliente de tubos y barras; sin embargo, no son los más adecuados si se desea fabricar dados para extrusiones complejas, debido a los severos gradientes de esfuerzo desarrollados en el dado que pueden producir fallas prematuras.

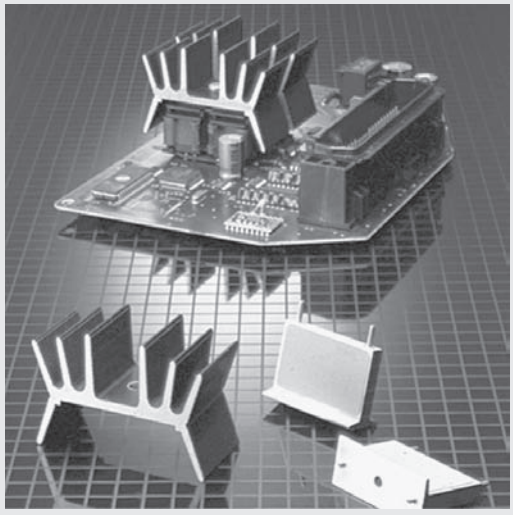
Lubricación. La lubricación es importante en la extrusión en caliente por sus efectos sobre *(a)* el flujo del material durante la extrusión, *(b)* el acabado y la integridad de la superficie, *(c)* la calidad del producto, y *(d)* las fuerzas de extrusión. El *vidrio* (sección 8.4) es un excelente lubricante para aceros simples e inoxidables y para metales y aleaciones de alta temperatura. En un proceso desarrollado en la década de 1940, conocido como **proceso Séjournet** (llamado así en honor de J. Séjournet), se coloca un soporte circular de vidrio en la cámara a la entrada del dado. La palanquilla caliente conduce calor a dicho soporte, por medio del cual comienza a fundirse como una delgada capa de vidrio que actúa como lubricante en la interfaz del dado conforme avanza la extrusión. Antes de colocar la palanquilla en la cámara, su superficie cilíndrica se recubre con una capa de vidrio en polvo para desarrollar una delgada capa lubricante en la interfaz de la palanquilla y la cámara.

En el caso de los metales que tienden a adherirse al contenedor y al dado, la palanquilla se puede recubrir con un contenedor de pared delgada fabricado con un metal más blando y de resistencia inferior, como el cobre o acero dulce. Este procedimiento se conoce como **encamisado** o **enlatado**. Además de actuar como interfaz de baja fricción, esta camisa evita que el ambiente contamine la palanquilla. Además, si el material de la palanquilla es tóxico o radioactivo, la camisa evita que contamine el ambiente. Esta técnica también se puede utilizar para extruir polvos de metales reactivos (sección 17.3).

EJEMPLO 15.2 Manufactura de un disipador de calor de aluminio

El aluminio se utiliza ampliamente para transferir calor a las aplicaciones de enfriamiento y calentamiento debido a su muy alta conductividad térmica. De hecho, con base en la relación peso-costo, ningún otro material conduce calor de manera tan económica.

Para las aplicaciones de disipación de calor, como las de la industria electrónica, se prefieren las extrusiones en caliente del aluminio. Por ejemplo, en la figura 15.10a



(a)

FIGURA 15.10 *(a)* Extrusión de aluminio utilizada como disipador de calor para una tarjeta de circuitos impresos. *Fuente:* Cortesía de Aluminum Extruders Council.



(b)

FIGURA 15.10 (*Continuación*) *(b)* Dado y perfiles resultantes del disipador de calor. *Fuente*: Cortesía de Aluminum Extruders Council.

se muestra un disipador de calor utilizado para eliminar calor de un transformador en una tarjeta de circuitos impresos. Por lo general, estos disipadores se diseñan con un gran número de aletas cuyo objetivo es maximizar el área de la superficie y se evalúan desde un punto de vista termodinámico mediante simulaciones por computadora. El maquinado, forjado y laminado de estas aletas es muy difícil y costoso. Sin embargo, el herramental para extrusión en caliente se puede producir mediante maquinado por descarga eléctrica, de manera que este proceso es favorable en términos económicos.

En la figura 15.10b se muestra un dado y la sección transversal extruida en caliente, adecuada para servir como disipador de calor. Las formas mostradas pueden producirse mediante una operación de fundición; sin embargo, es preferible la extrusión, pues no se presenta porosidad interna y la conductividad térmica es ligeramente mayor.

15.4 Extrusión en frío

Desarrollada en la década de 1940, la *extrusión en frío* es un término general que con frecuencia denota una *combinación* de operaciones, como la *extrusión* y el *forjado* direc-

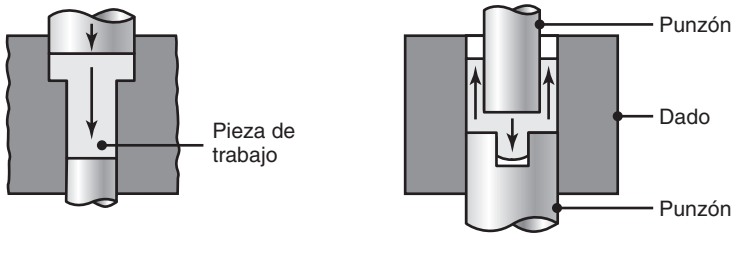


FIGURA 15.11 Dos ejemplos de extrusión en frío. Las flechas delgadas indican la dirección de flujo del metal durante la extrusión.

to e indirecto (fig. 15.11). La extrusión en frío se utiliza ampliamente para componentes de automóviles, motocicletas, bicicletas y aparatos eléctricos, y en equipo de transporte y agrícola.

Este proceso utiliza trozos de metal cortados de barras, alambres o placas terminadas en frío o laminadas en caliente. Los trozos de diámetros menores a 40 mm (1.5 pulgadas) se cizallan (*cortan*) y, de ser necesario, se escuadran sus extremos mediante procesos como recalcado, maquinado o rectificado; los trozos de diámetros mayores se maquinan a partir de barras en longitudes específicas. Se pueden fabricar partes extruidas en frío que pesan hasta 45 kg (100 libras) y que tienen longitudes hasta de 2 m (80 pulgadas), aunque la mayoría de estas partes pesan mucho menos. También pueden extruirse en frío trozos de metales en polvo (preformas).

La *fuerza* (F) en la extrusión en frío se puede estimar a partir de la fórmula:

$$F = 1.7 A_o Y_{\text{prom}} \varepsilon \tag{15.2}$$

en la que A_o es el área transversal de la pieza bruta, Y_{prom} el esfuerzo de flujo promedio del metal y ε la deformación real a la que se somete la pieza con base en su área transversal original y final; es decir, $\ln(A_o/A_f)$. Por ejemplo, supóngase que un trozo de metal redondo de 10 mm de diámetro y producido con un metal con $Y_{\text{prom}} = 50{,}000$ psi se reduce a un diámetro final de 7 mm por medio de extrusión en frío. La fuerza sería:

$$F = 1.7(\pi)(10^2/4)\ (50{,}000)\ [\ln(10/7)^2] = 4.8 \times 10^6 \text{lb} = 2140 \text{ toneladas cortas}^{\text{N. del RT.}}$$

N. del RT. Una tonelada corta (TC) equivale a 2000 lb.

La extrusión en frío tiene las siguientes ventajas sobre la extrusión en caliente:

- Mejores propiedades mecánicas como resultado del endurecimiento por trabajo, siempre que el calor generado por la deformación plástica y la fricción no recristalicen el metal extruido.
- Buen control de las tolerancias dimensionales, reduciendo la necesidad de operaciones de maquinado o acabado posteriores.
- Mejor acabado superficial, en parte debido a la falta de una capa de óxido, y siempre que la lubricación sea eficaz.
- Velocidades y costos de producción que son competitivos respecto de otros métodos de producción de la misma parte, como el maquinado. Algunas máquinas son capaces de producir más de 2000 partes por hora.

Sin embargo, la magnitud de los esfuerzos en los herramentales de extrusión en frío es muy elevada (en particular con piezas de trabajo de acero y de aleaciones especiales), pues son del orden de la dureza del material de la pieza de trabajo. Por lo general, la dureza del punzón varía entre 60 y 65 HRC y la del dado entre 58 y 62 HRC. Los punzones son un componente crítico, ya que deben poseer no sólo suficiente resistencia, sino también suficiente rigidez y resistencia al desgaste y a la falla por fatiga.

La *lubricación* es crítica, en particular con los aceros, pues cabe la posibilidad de que se adhieran (*agarroten*) entre la pieza de trabajo y los herramentales (en caso de separación del lubricante). El medio más efectivo de lubricación es la aplicación de un *recubrimiento de conversión de fosfato* en la pieza de trabajo, seguido de un recubrimiento de jabón o cera, como se describe en la figura 34.9.

El diseño de los herramentales y la selección apropiada de los materiales para herramientas y dados son cruciales para el éxito de la extrusión en frío. También son importantes la selección y el control del material de la pieza de trabajo respecto de su calidad, la precisión de las dimensiones del trozo metálico y la condición de su superficie. Se han desarrollado diversas aleaciones especiales (en particular para aplicaciones críticas que requieren alto rendimiento), que son adecuadas para varias operaciones de extrusión en frío y formado en caliente con buenas propiedades, tolerancias dimensionales y a bajo costo.

EJEMPLO 15.3 Parte extruida en frío

En la figura 15.12 se muestra un producto común extruido en frío, similar al componente metálico de una bujía para automóvil. Primero se cizalla el extremo de un segmento de barra redonda (fig. 15.12, izquierda). Después se extruye en frío (fig. 15.12, al centro) mediante una operación similar a la mostrada en la figura 15.11, pero con un orificio ciego. Luego se punzona y se extrae el material en el fondo de dicho orificio, produciendo la pequeña pieza metálica mostrada. Obsérvese los diámetros de esta pieza y del orificio al final de la parte seccionada, respectivamente.

Realizar una investigación sobre el flujo de material durante la deformación del trozo de metal evita defectos y lleva a mejorar el diseño del punzón y del dado. Además, por lo general, la parte se secciona en el plano medio, después se pule y se ataca para presentar el flujo de granos, como se muestra en la figura 15.13 (ver también fig. 14.11).



FIGURA 15.12 Pasos de producción de una bujía extruida en frío. *Fuente*: Cortesía de National Machinery Company.

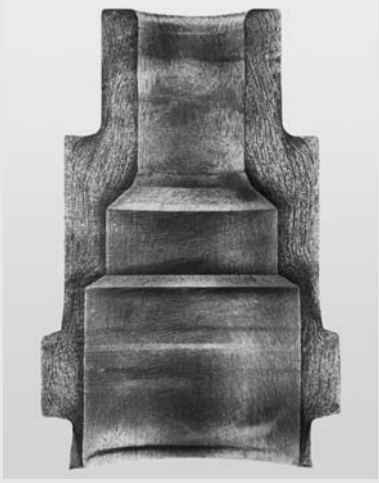


FIGURA 15.13 Sección transversal de la parte metálica de la figura 15.12 que muestra el patrón de flujo de los granos. *Fuente*: Cortesía de National Machinery Company.

15.4.1 Extrusión por impacto

La *extrusión por impacto* es similar a la extrusión indirecta y con frecuencia el proceso se incluye en la categoría de extrusión en frío. El punzón desciende con rapidez sobre la pieza bruta (trozo de metal), que se extruye hacia atrás (fig. 15.14). Debido al volumen constante, el espesor de la sección tubular extruida es función de la holgura entre el punzón y la cavidad de la matriz.

En las figuras 15.15a y b se muestran productos comunes fabricados con este proceso. Otros ejemplos de extrusión por impacto son la producción de tubos plegables (similares a los utilizados para la pasta de dientes), soportes ligeros, partes automotrices y pequeños recipientes a presión. La mayoría de los metales no ferrosos pueden extruirse por impacto en prensas verticales y a altas velocidades de producción de hasta dos piezas por segundo.

El diámetro máximo de las piezas producidas es de alrededor de 150 mm (6 pulgadas). El proceso de extrusión por impacto puede producir secciones tubulares de pared delgada, algunas con relaciones espesor-diámetro hasta de 0.005. Por consiguiente, son importantes la simetría de la parte y la concentricidad del pistón y de la pieza bruta.

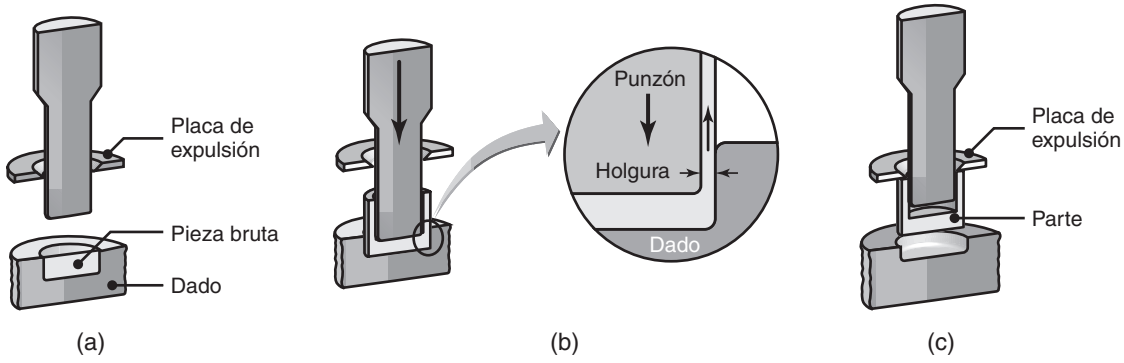


FIGURA 15.14 Esquema del proceso de extrusión por impacto. Las partes extruidas se expulsan mediante el uso de una placa de expulsión, ya que tienden a adherirse al punzón.

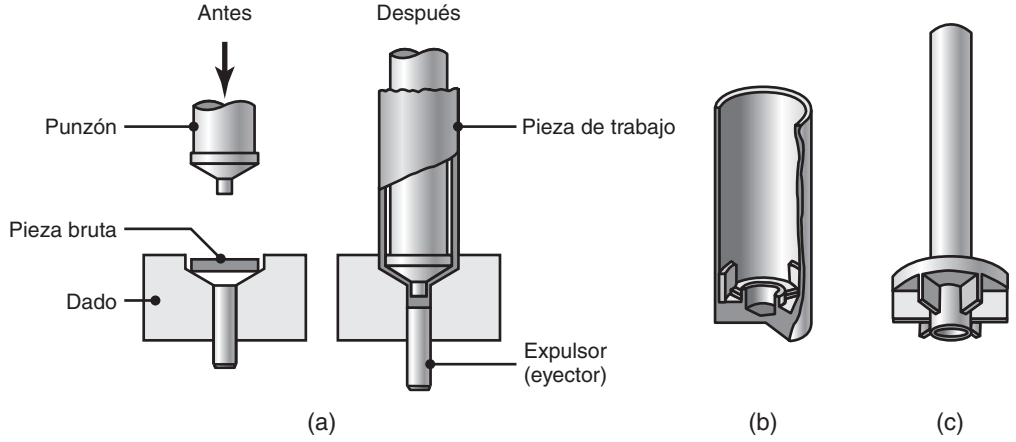


FIGURA 15.15 *(a)* Extrusión por impacto de un tubo plegable mediante el *proceso Hooker*. *(b)* y *(c)* Dos ejemplos de productos fabricados mediante extrusión por impacto. Estas partes también se pueden fabricar mediante fundición, forjado o maquinado. La elección del proceso depende de los materiales utilizados, las dimensiones de la parte y el espesor de pared y las propiedades deseadas del producto. Las consideraciones económicas también son importantes en la selección final del proceso.

15.4.2 Extrusión hidrostática

En la *extrusión hidrostática*, la presión requerida en la cámara se suministra mediante un pistón a través de un medio fluido incompresible que rodea la palanquilla (fig. 15.3b). Por lo general, las presiones son del orden de 1400 MPa (200 ksi). La elevada presión dentro de la cámara transmite parte del fluido a las superficies del dado, donde reduce de manera significativa la fricción. Es común efectuar la extrusión hidrostática a temperatura ambiente, por lo regular mediante aceites vegetales como fluido (en particular aceite de ricino, ya que es un buen lubricante y su viscosidad no se ve muy afectada por la presión).

Por este método se pueden extruir materiales quebradizos, ya que la presión hidrostática (junto con la fricción reducida, el uso de pequeños ángulos de matrices y altas relaciones de extrusión) aumenta la ductilidad del material. También se han extruido alambres largos a partir de una palanquilla de aluminio a temperatura ambiente, con una relación de extrusión de 14,000, lo que significa que una palanquilla de 1 m se convierte en un alambre de 14 km de largo. A pesar del éxito obtenido, la extrusión hidrostática ha tenido aplicaciones industriales limitadas, debido sobre todo a la compleja naturaleza de los herramentales, la experiencia necesaria con presiones elevadas, el diseño de equipo especializado y los largos tiempos requeridos para los ciclos, todo lo cual hace que el proceso sea poco económico.

15.5 Defectos de la extrusión

Dependiendo del material de la pieza de trabajo y de las variables del proceso, los productos extruidos pueden desarrollar diversos tipos de defectos que afectarían de manera significativa su resistencia y su calidad. Algunos defectos pueden percibirse a simple vista, en tanto que otros sólo pueden detectarse mediante las técnicas descritas en la sección 36.10. Existen tres *defectos de extrusión* principales: agrietamiento de la superficie, tubo y agrietamiento interno.

Agrietamiento de la superficie. Si la temperatura de extrusión, la fricción o la velocidad son demasiado elevadas, las temperaturas de la superficie pueden aumentar considerablemente, lo que provocaría que la superficie se agrietase y desgarrase (*agrietamiento de tipo abeto* o *agrietamiento a alta velocidad*). Estas grietas son intergranulares (es decir, a lo largo de los límites de los granos; ver fig. 2.26) y por lo general provocadas por la **fragilización en caliente** (sección 1.4.2). En especial, estos defectos se presentan en aleaciones de aluminio, magnesio y zinc, aunque también pueden ocurrir en aleaciones de alta temperatura. Esta situación se puede evitar si se reducen la temperatura de la palanquilla y la velocidad de extrusión.

La superficie también puede agrietarse a temperaturas inferiores, lo que se ha atribuido a la adhesión periódica del producto extruido a lo largo de la cara del dado. Debido a su apariencia similar a la de la superficie de una vara tipo bambú, se le conoce como **defecto tipo bambú**. Cuando el producto que se está extruyendo se adhiere temporalmente a la cara *del dado* (ver fig. 15.7), la presión de extrusión aumenta con rapidez. Poco después el producto avanza de nuevo y se libera la presión. De este modo, el ciclo se repite de modo continuo, produciendo grietas circunferenciales periódicas en la superficie.

Tubo. El tipo de patrón de flujo del metal en la extrusión mostrada en la figura 15.6c tiende a acumular los óxidos e impurezas de la superficie en el centro de la palanquilla, de manera parecida a la de un embudo. Este defecto se conoce como *tubo, tubo de escape* o *cola de pescado*. Es posible que un producto extruido sufra este tipo de defecto hasta en un tercio de su longitud, por lo que debe cortarse como desperdicio. Se puede minimizar la cavidad por contracción si se modifica el patrón de flujo para que sea más uniforme, por ejemplo, mediante el control de la fricción y reduciendo al mínimo los gradientes de temperatura. Otro método consiste en maquinar la superficie de la palanquilla antes de la extrusión para eliminar escamas e impurezas de la superficie. Estas últimas también se pueden eliminar mediante ataque químico de los óxidos de la superficie antes de la extrusión.

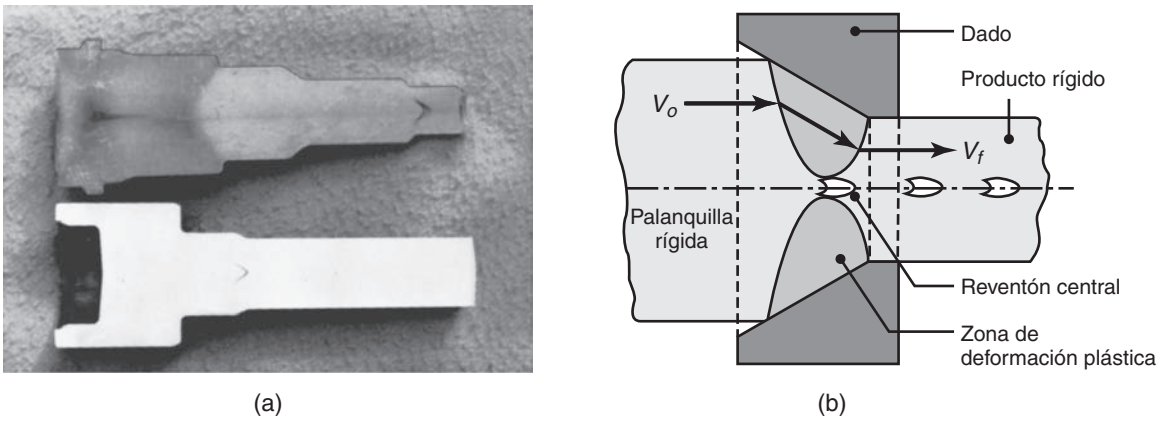


FIGURA 15.16 *(a)* Agrietamiento en forma de V invertida (reventón central) en barras de acero redondas extruidas. Si los productos no se inspeccionan, los defectos internos pueden continuar sin ser detectados y provocar fallas durante el servicio de la parte. Este defecto también puede desarrollarse en el estirado (trefilado) de barras, alambres y tubos. *(b)* Esquema de las zonas rígida y plástica en la extrusión. La tendencia al agrietamiento en forma de Chevron o de "V" invertida aumenta si las dos zonas plásticas no se encuentran una a la otra. Obsérvese que la zona plástica se puede hacer más grande disminuyendo el ángulo de la matriz o aumentando la reducción de la sección transversal (o ambas). *Fuente*: B. Avitzur.

Agrietamiento interno. El centro del producto extruido puede desarrollar grietas, conocidas como *agrietamiento central*, *reventón central*, *fractura de punta de flecha* o *agrietamiento tipo Chevron o en forma de V invertida* (fig. 15.16a). Estas grietas se atribuyen a un estado de esfuerzo de tensión hidrostática en el eje central de la zona de deformación en la matriz (fig. 15.16b), situación similar a la región de formación del cuello en una probeta de tensión (ver fig. 2.22). Estas grietas también se han observado en la extrusión y el rechazado de tubos (ver figs. 16.43b y c); aparecen en las superficies internas de los tubos. La tendencia al agrietamiento central *(a)* aumenta con el incremento del ángulo del dado; *(b)* aumenta al incrementarse la cantidad de impurezas, y *(c)* disminuye al reducirse la relación de extrusión y la fricción.

15.6 Equipo para extrusión

El equipo básico para extrusión es una *prensa hidráulica horizontal* (fig. 15.17). Estas prensas (ver también fig. 14.17) son apropiadas para extrusión porque se pueden controlar la carrera y la velocidad de la operación, dependiendo de la aplicación en particular. Son capa-

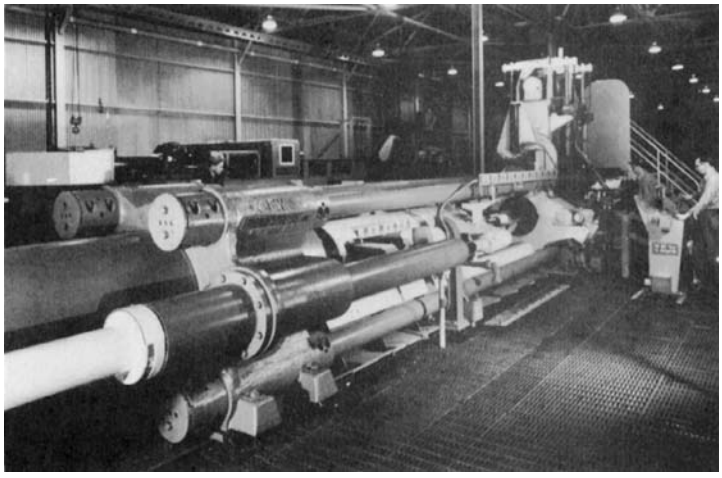


FIGURA 15.17 Vista general de una prensa de extrusión hidráulica de 9 MN (1000 toneladas). *Fuente*: Cortesía de Jones & Laughlin Steel Corporation.

ces de aplicar una fuerza constante en una carrera larga. Por consiguiente, se pueden utilizar palanquillas largas y aumentar así la velocidad de producción. Se han construido prensas hidráulicas con una capacidad de fuerza en el pistón hasta de 120 MN (14,000 toneladas), en particular para la extrusión en caliente de palanquillas de diámetros grandes.

Es común utilizar *prensas hidráulicas verticales comunes* para la extrusión en frío. En general, tienen menos capacidad que las usadas para extrusión en caliente, pero ocupan menos espacio de piso. También se emplean prensas mecánicas de *junta de manivela* o *junta articulada* para la extrusión en frío y para la extrusión por impacto, a fin de producir pequeños componentes en grandes cantidades. Las operaciones de etapas múltiples, en las que el área transversal se reduce por medio de varias operaciones individuales, se realizan en prensas diseñadas especialmente.

15.7 El proceso de estirado (trefilado)

En el *estirado* se reduce o cambia la sección transversal de una barra o alambre largo, en general jalándola (de ahí el término estirado) a través de un dado conocido como *dado de estirado* (fig. 15.18). Por lo tanto, la diferencia entre el estirado (trefilado) y la extrusión es que en ésta el material se empuja a través de un dado, mientras que en el estirado se jala a través de él. Los productos de barra y alambre abarcan una muy amplia gama de aplicaciones, incluyendo redondos para flechas de transmisión de potencia y movimiento, componentes de máquinas y estructurales, piezas brutas para pernos y remaches, alambre eléctrico, cables, miembros estructurales con carga de tensión, electrodos de soldadura, resortes, sujetadores para papel, rayos para ruedas de bicicleta e instrumentos musicales de cuerda.

Las variables principales de procesamiento en el estirado son similares a las de la extrusión; es decir, la reducción del área transversal, el ángulo del dado, la fricción a lo largo de las interfaces del dado y la pieza de trabajo, así como la velocidad de estirado. El ángulo del dado influye en la fuerza de estirado y la calidad del producto estirado.

Fuerza de estirado. La expresión para la *fuerza de estirado* (F) bajo condiciones *ideales y sin fricción* es similar a la de la extrusión. Se determina mediante la expresión

$$F = Y_{\text{prom}} A_f \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right) \tag{15.3}$$

en la que Y_{prom} es el esfuerzo real promedio del material en el hueco del dado. Puesto que debe realizarse más trabajo para vencer la fricción, la fuerza aumenta con el incremento de fricción. Además, debido a la deformación no uniforme que ocurre dentro de la zona del dado, también se requiere energía adicional (conocida como *trabajo redundante de deformación*). No obstante que se han desarrollado varias ecuaciones para estimar la fuerza (como se describe de manera más detallada en textos avanzados), una fórmula útil que incluye la fricción y el trabajo redundante es:

$$F = Y_{\text{prom}} A_f \left[\left(1 + \frac{\mu}{\alpha}\right) \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right) + \frac{2}{3}\alpha\right] \tag{15.4}$$

en donde α es el ángulo del dado en radianes.

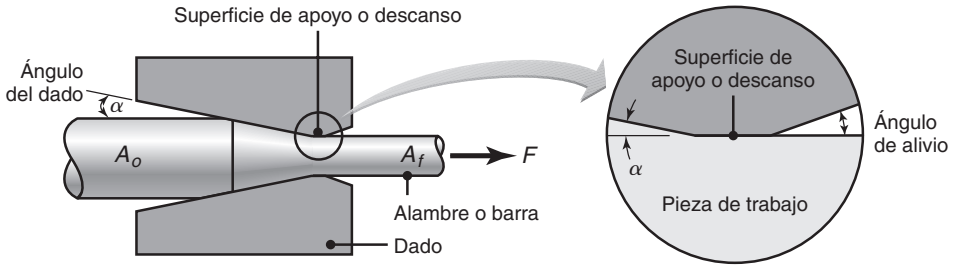


FIGURA 15.18 Variables de proceso en el estirado de alambre. Todo, el ángulo de la matriz, la reducción en el área transversal por pase, la velocidad del estirado, la temperatura y la lubricación, afecta la fuerza de estirado (F).

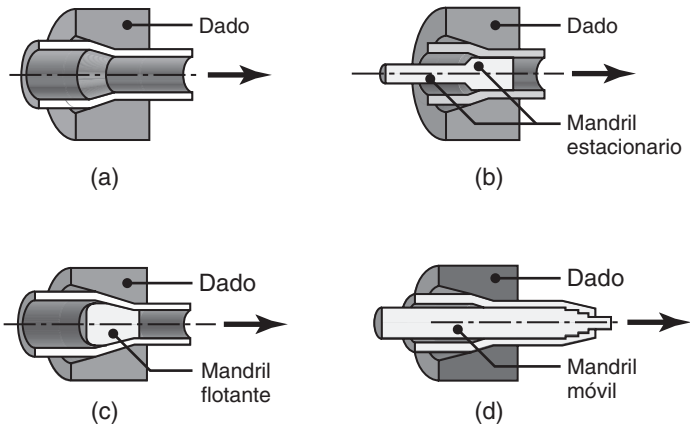


FIGURA 15.19 Ejemplos de operaciones de estirado de un tubo, con mandril interno y sin él. Obsérvese que se puede producir una variedad de diámetros y espesores de pared del mismo tubo inicial (que se ha fabricado mediante otros procesos).

Como se puede ver en estas ecuaciones, la fuerza de estirado aumenta al incrementarse la reducción. Sin embargo, tiene que limitarse la magnitud de la fuerza, porque cuando el esfuerzo de tensión alcanza el esfuerzo de fluencia del metal que se está estirando, la pieza de trabajo cede y finalmente se rompe. Se puede demostrar que, en teoría y sin fricción, la reducción máxima en el área transversal por pase es de 63%. Así que, por ejemplo, una barra de 10 mm de diámetro puede reducirse (como máximo) a un diámetro de 6.1 mm en un solo pase sin que se rompa.

Se puede demostrar que, para cierta reducción de diámetro y cierta condición de fricción, existe un *ángulo óptimo del dado* en el que la fuerza de estirado es mínima. Esto no significa que el proceso deba efectuarse en este ángulo óptimo, porque existen otras consideraciones de calidad en los productos.

Estirado de otras formas. Se pueden producir varias secciones transversales sólidas mediante el estirado a través de dados con diferentes perfiles. El diseño apropiado del dado y la selección adecuada de la secuencia de reducción por pase requieren bastante experiencia para garantizar el flujo apropiado del material en el dado, reducir los defectos internos o externos y mejorar la calidad de la superficie.

El espesor de pared, el diámetro o la forma de los tubos que se han producido por extrusión u otros procesos descritos en este libro se pueden reducir más mediante procesos de *estirado de tubos* (fig. 15.19). Los tubos de diámetros grandes, hasta de 0.3 m (12 pulgadas), pueden estirarse por medio de estas técnicas. Para estas operaciones existen mandriles con diversos perfiles.

Los *dados en forma de cuña* se utilizan para el estirado de cintas planas y sólo se usan en aplicaciones específicas. Sin embargo, el principio de este proceso es el mecanismo básico de deformación del **planchado**, que se emplea ampliamente en la fabricación de latas de aluminio para bebidas, como se muestra en la figura 16.31.

15.8 Práctica de estirado

Como en todos los procesos de trabajado de los metales, el éxito del estirado requiere la selección cuidadosa de los parámetros del proceso. En el estirado, la reducción de área transversal por pase llega hasta casi 45%. Por lo general, cuanto más pequeña es la sección transversal inicial, más pequeña será la reducción por pase. Es común estirar alambres finos a una reducción de 15% a 25% por pase, y los tamaños mayores, de 20% a

45%. Las reducciones de más de 45% pueden provocar la separación del lubricante, deteriorando el acabado superficial. A pesar de que la mayor parte del estirado se realiza a temperatura ambiente, el estirado de secciones grandes sólidas o huecas puede efectuarse a temperaturas elevadas para reducir las fuerzas.

También se puede hacer una leve reducción (**pase de dimensionado**) en barras para mejorar el acabado superficial y la precisión dimensional. Sin embargo, debido a que sólo deforman las capas de la superficie, por lo general estas reducciones leves producen deformación muy poco uniforme del material y su microestructura. Por lo tanto, las propiedades del material varían según su localización en la sección transversal.

Obsérvese en la figura 15.18 que la punta de una barra o alambre debe tener una sección transversal reducida para que se alimente a través de la abertura del dado y se jale. Por lo general, esto se realiza *estampando* la punta de la barra o alambre de manera similar a la mostrada en las figuras 14.15a y b; a esta operación se le conoce como *punteado*. Las velocidades de estirado dependen del material y de la reducción del área transversal. Éstas pueden variar de 1 a 2.5 m/s (200 a 500 pies/min) para secciones gruesas, hasta 50 m/s (165 pies/s) para alambre muy fino, como el usado en electromagnetos. Debido a que el producto no tiene tiempo suficiente para disipar el calor generado, las temperaturas pueden aumentar sustancialmente a altas velocidades de estirado y perjudicar la calidad del producto.

Los alambres de cobre y latón estirados se designan conforme a su *temple* (como 1/4 de dureza, 1/2 de dureza, etc.), debido al endurecimiento por trabajo. Puede ser necesario un recocido intermedio entre pases para mantener una ductilidad suficiente del material durante el estirado en frío. Los alambres de acero al alto carbono para resortes e instrumentos musicales se fabrican mediante tratamiento térmico (patentado o **temple isotérmico**) del alambre estirado; la microestructura obtenida es perlita fina (ver fig. 4.11). Estos alambres tienen resistencias máximas a la tensión hasta de 5 GPa (700 ksi) y una reducción tensil del área de casi 20%.

Estirado múltiple. A pesar de que mediante el estirado se puede producir alambre muy fino, el costo resultaría muy alto. Un método empleado para aumentar la productividad consiste en estirar muchos alambres (100 o más) de modo simultáneo, esto es, en forma *múltiple*. Los alambres se separan uno del otro mediante un material metálico adecuado con propiedades similares, pero con menor resistencia química (de manera que pueda extraerse por lixiviación de las superficies del alambre estirado).

El estirado múltiple produce alambres cuya sección transversal es poligonal más que redonda. Además de las longitudes continuas, se han desarrollado técnicas para fabricar alambre fino que se rompe o recorta a diversos tamaños y formas. Estos alambres se utilizan como plásticos eléctricamente conductivos, textiles resistentes al calor y eléctricamente conductivos, medios de filtrado, camuflaje contra radares e implantes médicos. Pueden ser tan pequeños como 4 μm (0.00016 pulgada) de diámetro y producirse a partir de materiales como el acero inoxidable, titanio y aleaciones de temperaturas elevadas.

Diseño de los dados. En la figura 15.20 se muestran los rasgos característicos de un dado común para estirado. Los ángulos del dado van de 6° a 15°. Sin embargo, obsérvese que en un dado típico existen dos ángulos (de entrada y de aproximación). El diseño básico para este tipo de dados se ha desarrollado durante muchos años de ensayo y error. El propósito de la superficie de soporte (*descanso o cara interior*) es establecer el diámetro final del producto (*dimensionado*). Además, cuando se rectifica de nuevo un dado desgastado, la cara interior mantiene la dimensión de salida de la abertura del dado.

Para el **estirado de perfiles** se requiere una serie de dados que comprende diversas etapas de deformación, a fin de producir el perfil final. Los dados se pueden hacer de una sola pieza o (según la complejidad del perfil transversal) con varios segmentos, que se mantienen unidos dentro de un anillo de sujeción. Se están implantando técnicas de diseño asistidas por computadora a fin de diseñar dados para un flujo suave de material a través de ellos, así como para minimizar los defectos. También se puede utilizar una serie de rodillos

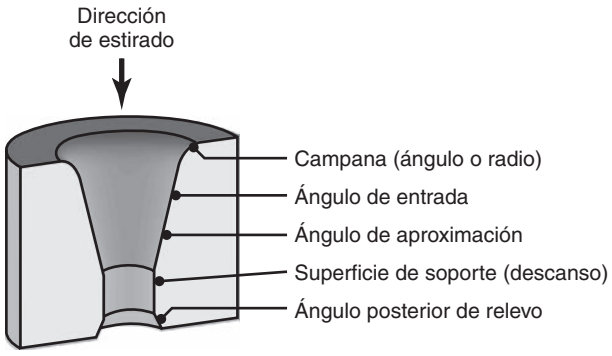


FIGURA 15.20 Terminología de un dado común utilizada para estirar una barra o un alambre redondo.

libres (locos), o de forma, para estirar barras redondas o de diversas formas. Dicho arreglo (*cabeza de turco*) es más versátil que los dados ordinarios de estirado, debido a que los rodillos se pueden ajustar a diferentes posiciones y ángulos para perfiles específicos.

Materiales para dados. Por lo general, los materiales de los dados para estirado (tabla 5.7) son aceros grado herramientas y carburos. Para el estirado en caliente se utilizan dados de acero fundido, por su alta resistencia al desgaste a temperaturas elevadas. Los dados de diamante se emplean para el estirado de alambre fino con diámetros que van de 2 μm a 1.5 mm (0.0001 a 0.06 pulgada); pueden ser de diamante monocristalino, o en forma policristalina con partículas de diamante en una matriz metálica (*compactos*). Debido a su falta de resistencia a la tensión y tenacidad, los dados de carburo y de diamante se utilizan comúnmente como **insertos** u **pastillas**, que se apoyan en un portainserto de acero (fig. 15.21).

Lubricación. La lubricación adecuada es fundamental en el estirado para mejorar la vida de los dados y el acabado superficial del producto, además de reducir las fuerzas y la temperatura del estirado. La lubricación es crítica, sobre todo en el estirado de tubos, debido a la dificultad para mantener una película de lubricante lo suficientemente gruesa en la interfaz mandril-tubo. En el estirado de barras, un método típico de lubricación utiliza recubrimientos de fosfato (ver sección 15.4).

A continuación se describen los métodos básicos de lubricación utilizados en el estirado de alambre (ver también el capítulo 33):

- **Estirado en húmedo,** en el que los dados y la barra se sumergen por completo en el lubricante.
- **Estirado en seco,** en el que la superficie de la barra a estirar se recubre con un lubricante al pasarla a través de una caja llena con lubricante (caja de aditivos).

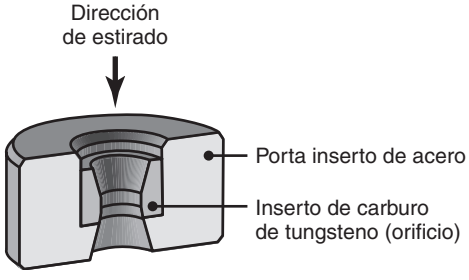


FIGURA 15.21 Inserto de matriz de carburo de tungsteno en un portainserto de acero. Los dados de diamante utilizados en el estirado de alambre delgado se soportan de manera similar.

- **Revestimiento metálico,** en el que la barra o el alambre se recubre con un metal blando, como cobre o estaño, que actúa como lubricante sólido.
- **Vibración ultrasónica** de los dados y los mandriles, en el que las vibraciones reducen las fuerzas, mejoran el acabado superficial y la vida del dado, y permiten reducciones más grandes por pase sin rompimientos.

15.9 Defectos del estirado y esfuerzos residuales

Los defectos típicos en una barra o un alambre estirado son similares a los observados en la extrusión, en particular el agrietamiento central (ver fig. 15.15). Otro tipo principal de defecto en el estirado son los **traslapes**, raspaduras o dobleces longitudinales en el material que se pueden abrir durante operaciones posteriores de formado (como recalcado, cabeceado, laminación de roscas o doblado de barra o alambre) y pueden provocar serios problemas en el control de calidad. Muchos otros defectos de la superficie (como raspaduras y marcas de dado) también pueden originarse de la selección inadecuada de los parámetros del proceso, lubricación deficiente o una condición deficiente del dado.

Dado que se someten a deformación irregular durante el estirado, por lo general los productos estirados en frío tienen *esfuerzos residuales*. Para reducciones leves, de sólo un pequeño porcentaje, los esfuerzos residuales de la superficie longitudinal son de compresión (en tanto que el centro se encuentra a tensión) y por lo tanto se mejora la resistencia a la fatiga. Por el contrario, las reducciones mayores inducen esfuerzos de tensión de la superficie (en tanto que el centro se encuentra a compresión). Los esfuerzos residuales pueden ser significativos y causar agrietamiento por esfuerzo-corrosión de la parte durante cierto periodo. Además, hacen que el componente se *combe* si posteriormente se retira una capa de material (ver fig. 2.30), ya sea por rasurado, maquinado o rectificado.

Las barras y los tubos que no son suficientemente rectos (o se suministran en rollo) pueden enderezarse pasándolos a través de un arreglo de rodillos colocados en diferentes ejes, proceso similar al nivelado por rodillos (ver fig. 13.7).

15.10 Equipo para estirado

A pesar de que existen diversos diseños, el equipo para estirado es básicamente de dos tipos: banco de estirado y de tambor.

El **banco de estirado** contiene un dado simple y su diseño es similar al de una larga máquina horizontal de ensayos de tensión (fig. 15.22). La fuerza de estirado la propor-

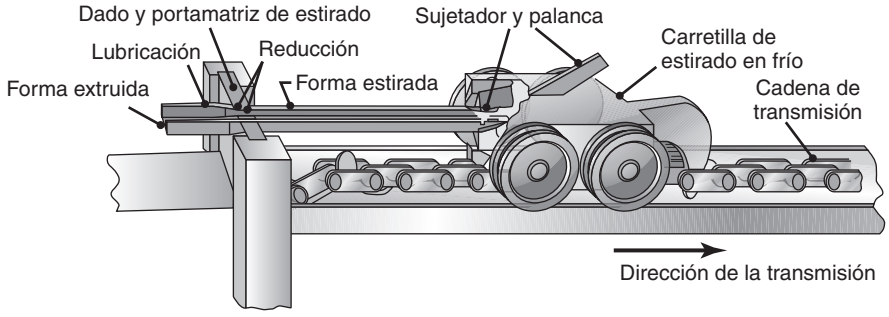


FIGURA 15.22 Estirado en frío de un canal extruido en un banco de estirado para reducir su sección transversal. Por este método se estiran tramos individuales de barras rectas o de secciones transversales.

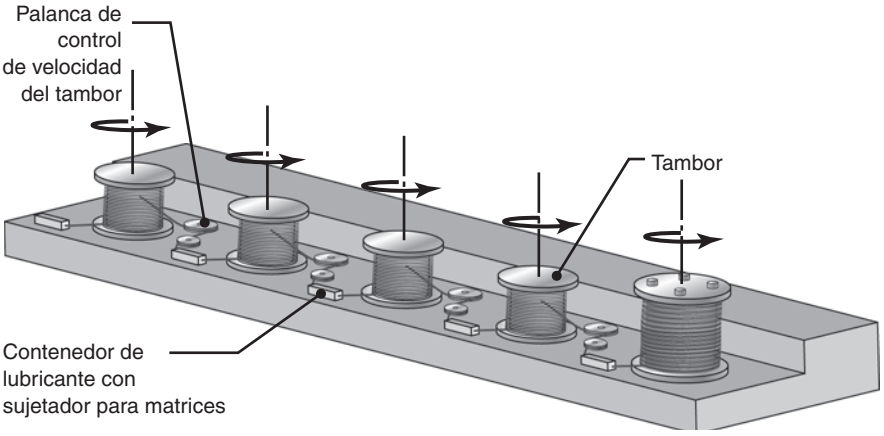


FIGURA 15.23 Ilustración de estirado de alambre de etapas múltiples, utilizadas comúnmente para producir alambre de cobre para cableado eléctrico. *Fuente*: H. Auerswald.

ciona una transmisión de cadena o se acciona hidráulicamente. Los bancos de estirado se utilizan para el estirado de una sola longitud de barras y tubos rectos con diámetros mayores a 20 mm (0.75 pulgada) y longitudes hasta de 30 m (100 pies). Las capacidades de las máquinas alcanzan 1.3 MN (300 klb) de fuerza de jalado con velocidades que van de 6 a 60 m/min (20 a 200 pies/min).

Las barras y el alambre muy largos (de muchos kilómetros) y el alambre de secciones transversales más pequeñas, por lo general de menos de 13 mm (0.5 pulgadas), se estiran por medio de un **tambor** giratorio (**polea grande** o **cabrestante,** fig. 15.23). La tensión en esta configuración proporciona la fuerza requerida para estirar el cable, por lo general mediante matrices múltiples (*estirado compuesto*).

RESUMEN

- La extrusión es el proceso en el que se fuerza una palanquilla a través de un dado para reducir su sección transversal o producir diversas secciones transversales sólidas o huecas. Por lo general, este proceso se efectúa a temperaturas elevadas para reducir las fuerzas y mejorar la ductilidad del material.
- Factores importantes en la extrusión son el diseño del dado, la relación de extrusión, la temperatura de la palanquilla, la lubricación y la velocidad de extrusión. Aunque el término "extrusión en frío" se aplica a la extrusión a temperatura ambiente, también es el nombre dado a una combinación de operaciones de extrusión y forjado. La extrusión en frío es capaz de producir económicamente partes discretas de diversas formas, con buenas propiedades mecánicas y tolerancias dimensionales.
- El estirado de barras, alambres y tubos comprende básicamente el proceso de jalar el material a través de un dado, o una serie de dados o matrices compuestas. Las secciones transversales de la mayoría de los productos estirados son redondas, aunque también se pueden estirar otras formas. El estirado de productos tubulares para reducir su diámetro o su espesor requiere por lo general mandriles internos.
- El diseño de los dados, la reducción del área transversal por pase y la selección de materiales para matrices y lubricantes son parámetros importantes para fabricar productos estirados de alta calidad, con un buen acabado superficial. Tanto en la extrusión como en el estirado pueden desarrollarse defectos externos e internos (agrietamiento en forma de Chevron o "V" invertida). Su minimización o prevención depende sobre todo del ángulo del dado, la reducción por pase y la calidad del material de la pieza de trabajo.

TÉRMINOS CLAVE

Agrietamiento central
Agrietamiento de alta velocidad
Agrietamiento de tipo abeto
Agrietamiento de tipo Chevron en forma de "V" invertida
Alambre
Banco de estirado
Barra
Cabeza de turco
Cabrestante
Constante de extrusión
Costura
Dado corte
Dado de araña
Dado tipo ojo de buey
Dado tipo puente
Defecto de tubo
Defecto tipo bambú
Defectos de extrusión
Encamisado
Enlatado
Estirado
Estirado múltiple
Extrusión
Extrusión en frío
Extrusión hidrostática
Extrusión por impacto
Pase de dimensionado
Patentado (temple isotérmico)
Planchado
Polea grande
Proceso Séjournet
Relación de extrusión
Zona de metal muerto

BIBLIOGRAFÍA

Altan, T., Ngaile, G. y Shen, G. (eds.), *Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications*, ASM International, 2004.

ASM Handbook, Vol. 14: *Forming and Forging*, ASM International, 1988.

Blazynski, T. Z., *Plasticity and Modern Metal-forming Technology*, Elsevier, 1989.

Hosford, W. F. y Caddell, R. M., *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*, 2a. ed., Prentice Hall, 1993.

Inoue, N. y Nishihara, M. (eds.), *Hydrostatic Extrusion: Theory and Applications*, Elsevier, 1985.

Lange, K. (ed.), *Handbook of Metal Forming*, McGraw-Hill, 1985.

Laue, K. y Stenger, H., *Extrusion—Processes, Machinery, Tooling*, ASM International, 1981.

Michaeli, W., *Extrusion Dies*, 2a. ed., Hanser, 1992.

Nonferrous Wire Handbook, 2 vols. The Wire Association International, Inc., 1977 y 1981.

Sheppard, T., *Extrusion of Aluminum Alloys*, Chapman & Hall, 1997.

PREGUNTAS DE REPASO

15.1 ¿En qué se diferencia la extrusión de los procesos de laminado y forjado?

15.2 ¿Cuál es la diferencia entre extrusión y estirado?

15.3 ¿Qué es un dado de araña? ¿Para qué se utiliza?

15.4 ¿Por qué a veces los alambres se estiran de manera múltiple?

15.5 ¿Qué es una zona de metal muerto?

15.6 Defina: *(a)* revestimiento, *(b)* bloque de apoyo o ficticio, *(c)* dados de corte, *(d)* costra, y *(e)* enlatado.

15.7 ¿Por qué el vidrio es un buen lubricante en la extrusión en caliente?

15.8 Explique por qué la extrusión en frío es un proceso importante de manufactura.

15.9 ¿Qué tipos de defectos pueden ocurrir en: *(a)* la extrusión, y *(b)* el estirado?

15.10 ¿Cuál es la diferencia entre extrusión directa e inversa?

15.11 ¿Qué es un descanso o cara interna del dado de trefilado? ¿Cuál es su función en un dado?

15.12 ¿Cómo son los tubos extruidos? ¿También se pueden estirar? Explique su respuesta.

15.13 ¿Es posible extruir engranes rectos y engranes cónicos? ¿Qué procesamiento adicional sería necesario?

15.14 ¿Qué materiales se utilizan para fabricar dados para extrusión?

15.15 ¿Cuál es la diferencia entre el defecto de tubo y el defecto tipo bambú?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

15.16 Explique por qué la extrusión es un proceso por lotes o semicontinuo. ¿Cree que se puede volver un proceso continuo? Explique su respuesta.

15.17 Explique las diferentes maneras por las cuales el cambio del ángulo del dado afecta el proceso de extrusión.

15.18 El vidrio es un buen lubricante en la extrusión en caliente. ¿También utilizaría vidrio para el forjado por matriz de impresión?

15.19 ¿Cómo haría para evitar los defectos de agrietamiento central en la extrusión? Explique por qué serían efectivos sus métodos.

15.20 ¿Cuál es el propósito de una placa de extracción en la extrusión por impacto?

15.21 En la tabla 15.1 se dan los intervalos de temperatura para la extrusión de diversos metales. Describa las posibles consecuencias de extruir a una temperatura: *(a)* por debajo, y *(b)* por encima de estos intervalos.

15.22 ¿Varía la fuerza en la extrusión directa conforme la palanquilla se vuelve más corta? Si es así, ¿por qué?

15.23 Comente el significado de los patrones de flujo de los granos, como los mostrados en la figura 15.6.

15.24 ¿En qué aplicaciones podría utilizar el tipo de partes extruidas por impacto que se muestran en la figura 15.14?

15.25 ¿Se pueden fabricar engranes de dientes rectos por medio de: *(a)* estirado, y *(b)* extrusión? ¿Se pueden fabricar los engranes helicoidales? Explique su respuesta.

15.26 Ya vimos en el capítulo 13 que aplicar tensión trasera en el laminado reduce la fuerza de laminado. ¿Qué ventajas tendría, en su caso, la aplicación de una tensión semejante en el estirado de barras y alambre? Explique su respuesta.

15.27 ¿Cómo prepararía el extremo de un alambre para que fuera posible alimentarlo a través de una matriz, de manera que se pueda comenzar una operación de estirado?

15.28 ¿Cuál es el propósito de un bloque de apoyo en la extrusión?

15.29 Describa sus observaciones en relación con la figura 15.8.

15.30 En ocasiones, el estirado de alambre de acero se realiza dentro de una envoltura de un metal blando, como cobre o plomo. ¿Por qué sería útil esta envoltura?

15.31 ¿Cuáles son las ventajas del estirado múltiple?

15.32 ¿En qué circunstancias es preferible la extrusión indirecta a la extrusión directa?

15.33 ¿Por qué la lubricación es perjudicial cuando se extruye con un dado tipo ojo de buey?

15.34 ¿Cuál es el propósito de un revestimiento de contenedor en la extrusión directa? (Ver fig. 15.1).

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

15.35 Estime la fuerza requerida para la extrusión de latón 70-30 a 700 °C, si el diámetro de la palanquilla es de 125 mm y la relación de extrusión es 20.

15.36 Suponiendo un proceso ideal de estirado, ¿cuál es el diámetro final más pequeño al que se puede estirar una barra de 100 mm de diámetro?

15.37 Si incluye la fricción en el problema 15.36, ¿sería diferente el diámetro final? Explique su respuesta.

15.38 Calcule la fuerza de extrusión para una palanquilla redonda de 200 mm de diámetro, hecha de acero inoxidable y extruida a 1000 °C para un diámetro de 50 mm.

15.39 Demuestre que para un material plástico perfecto con un esfuerzo de fluencia (Y) y en condiciones sin fricción, la presión (p) en extrusión directa es

$$p = Y \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right)$$

15.40 Demuestre que para las mismas condiciones indicadas en el problema 15.39, el esfuerzo de estirado (σ_d) en el estirado de alambre es

$$\sigma_d = Y \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right)$$

15.41 Grafique las ecuaciones dadas en los problemas 15.39 y 15.40 en función del porcentaje de reducción del área de la pieza de trabajo. Describa sus observaciones.

15.42 Una operación de extrusión planeada comprende acero a 1000 °C con un diámetro inicial de 120 mm y un diámetro final de 20 mm. Existen dos prensas para la operación, una con capacidad de 20 MN y la otra con capacidad de 10 MN. ¿Es suficiente la prensa más pequeña para esta operación? Si no es así, ¿qué recomendaciones haría para permitir el uso de la prensa más pequeña?

15.43 Un alambrón hecho de un material perfectamente plástico con un esfuerzo de fluencia de 30,000 psi se está estirando de un diámetro de 0.1 a 0.07 pulgada en un dado de estirado de 15°. Considérese que el coeficiente de fricción es 0.1. Utilizando las ecuaciones 15.3 y 15.4, estime la fuerza de estirado requerida. Comente las diferencias en su respuesta.

15.44 Utilice el problema 15.43, pero para acero inoxidable 304 (ver la tabla 2.3).

15.45 Suponga que es un instructor que cubre los temas descritos en este capítulo y está haciendo un examen sobre los diversos aspectos para poner a prueba los conocimientos de los estudiantes. Elabore dos problemas cuantitativos y proporcione las respuestas.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

15.46 Suponga que es director técnico de asociaciones comerciales de: *(a)* extrusores, y *(b)* operaciones de estirado de barra y alambre. Prepare un folleto técnico para clientes potenciales que indique todas las ventajas de estos procesos, respectivamente.

15.47 Suponga que falta el resumen de este capítulo. Escriba un resumen de una página sobre los aspectos importantes del proceso de estirado de alambre.

15.48 Revise la literatura técnica y haga una lista detallada de los pasos de fabricación comprendidos en la manufactura de agujas hipodérmicas metálicas comunes.

15.49 En la figura 15.2 se muestran ejemplos de partes discretas que pueden producirse cortando extrudidos como piezas individuales. Nombre otros productos que se pueden fabricar de manera similar.

15.50 Estudie la literatura técnica y explique cómo se pueden aplicar vibraciones externas al estirado de alambre para reducir la fricción. También comente las posibles direcciones de vibración, como longitudinal o torsional.

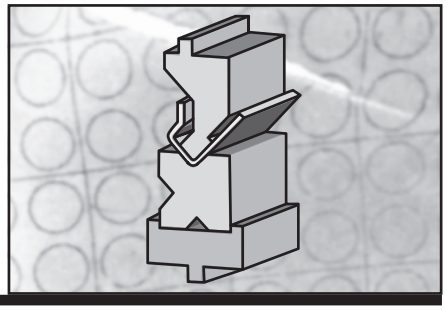
15.51 Un juguete popular para niños es una prensa de extrusión en miniatura que utiliza una pasta o masa blanda para producir diversas formas. Consiga dicho juguete y demuestre los defectos superficiales que se pueden desarrollar.

15.52 En el estudio de caso 14.2 sobre soportes de suspensiones en el capítulo 14, se indicaba que había una mejora significativa del costo utilizando forjas en lugar de extrusiones. Liste y explique las razones por las que considera que fueron posibles estos ahorros en los costos.

15.53 Se indicó que en el estirado múltiple, los alambres producidos tenían una sección transversal poligonal más que redonda. Produzca algunas piezas delgadas de arcilla redonda, o consiga espagueti cocido, sujételas todas juntas y comprímalas radialmente sobre un soporte adecuado, de manera similar a apretarse el cinturón. Comente las formas producidas.

CAPÍTULO

16 Proceso de formado de hojas metálicas



16.1 Introducción 424
16.2 Cizallado 425
16.3 Características y formabilidad de las hojas metálicas 435
16.4 Pruebas de formabilidad para hojas metálicas 437
16.5 Doblado de hojas, placas y tubos 440
16.6 Operaciones diversas de doblado y otras relacionadas 445
16.7 Embutido profundo 451
16.8 Formado con hule 460
16.9 Rechazado 461
16.10 Formado superplástico 463
16.11 Procesos especializados de formado 465
16.12 Manufactura de estructuras metálicas tipo panal 470
16.13 Consideraciones de diseño en el formado de hojas metálicas 471
16.14 Prensas de formado de hojas metálicas 474
16.15 Economía de las operaciones de formado de hojas metálicas 476

EJEMPLOS:

16.1 Cálculo de la fuerza de punzonado 428
16.2 Hoja metálica soldada a la medida para aplicaciones automotrices 431
16.3 Manufactura de fuelles 450
16.4 Manufactura de latas para alimentos y bebidas 458
16.5 Aplicaciones del formado superplástico/unión por difusión 465

ESTUDIO DE CASO:

16.1 Manufactura de platillos musicales 468

En este capítulo se describen las características importantes de las hojas metálicas y de los procesos de manufactura empleados para producir numerosos productos laminados. Los temas cubiertos incluyen:

- Propiedades materiales específicas de las hojas metálicas que afectan su formabilidad.
- Las operaciones de cizallado en las que se cortan piezas en bruto a partir de grandes hojas y cintas.
- Varias operaciones de doblado para hojas, placas y tubos.
- Los fundamentos de las operaciones de formado, entre ellas el formado por estirado, con hule, por martillado, abombado, rechazado y superplástico.
- El embutido profundo y planchado para la producción de contenedores de pared delgada.
- Diseño y consideraciones económicas para el formado de las hojas metálicas.

Productos comúnmente fabricados mediante el formado de hojas metálicas: carrocerías automotrices, muebles de oficina, artículos electrodomésticos, fuselajes para aviones, tractocamiones, tanques de combustible y artículos de cocina.

Procesos alternativos: fundición a presión en matriz (o dado) (partes relativamente pequeñas, con paredes delgadas), termoformado.

16.1 Introducción

PLos productos fabricados con **hojas metálicas** están a nuestro alrededor. Incluyen una amplia gama de objetos de consumo e industriales, como latas para bebidas, artículos de cocina, archiveros, escritorios metálicos, aparatos electrodomésticos, carrocerías automotrices, tractocamiones y fuselajes para aviones (fig. 16.1). El formado de hojas data del año 5000 a.C., cuando se fabricaron utensilios domésticos y joyería mediante el martillado y estampado de oro, plata y cobre. En comparación con las fabricadas por fundición y por forjado, las partes de hojas metálicas ofrecen las ventajas de su ligereza y versatilidad.

Como se describe a lo largo de este capítulo, existen numerosos procesos para hacer partes con hojas metálicas. Sin embargo, el término **trabajo de prensado** o **formado por prensado** se utiliza comúnmente en la industria para describir las operaciones generales de formado de hojas, ya que se realizan en *prensas* (descritas en las secciones 14.8



(a) (b)

FIGURA 16.1 Ejemplos de partes de hojas metálicas. *(a)* Partes estampadas, *(b)* partes producidas mediante rechazado. *Fuente: (a)* Cortesía de Williamsburg Metal Spinning & Stamping Corp.

y 16.14) mediante juegos de matrices o dados. A las partes producidas en las prensas con hojas metálicas se les llama *estampados* (de la palabra *estampa*, usada por primera vez alrededor del año 1200 d.C., que significa "forzar hacia abajo" o "machacar"). Obsérvese que éste es un término similar a *forjado* o *fundición*, que suelen emplearse para describir partes producidas mediante esos procesos individuales utilizando matrices o moldes, respectivamente.

El acero al bajo carbono es la hoja metálica de mayor uso por su bajo costo y sus características de resistencia y formabilidad, en general buenas. El aluminio es el material que más se utiliza al transformar las hojas metálicas en latas para bebidas, empaques, utensilios de cocina y aplicaciones para resistencia a la corrosión. Los materiales metálicos que más se aplican en aeronaves y naves espaciales son el aluminio y el titanio, aunque han sido reemplazados de manera creciente con materiales compósitos, como se señala en los capítulos 9 y 19.

En este capítulo primero se describen los métodos por medio de los cuales se cortan piezas en bruto de grandes rollos de hojas metálicas, que después se procesan para darles las formas deseadas mediante una amplia variedad de métodos. Este capítulo también incluye discusiones acerca de las características de las hojas metálicas, las técnicas empleadas para determinar su formabilidad y la construcción de diagramas de límites de formado. Se describen además todos los procesos importantes de formado de hojas y el equipo utilizado para fabricar productos de láminas metálicas (como se indica en la tabla 16.1).

16.2 Cizallado

Para fabricar una parte con una hoja metálica, se retira una *pieza en bruto* de dimensiones adecuadas de una hoja más grande (por lo general un rollo) mediante el *cizallado*. Esta lámina se corta sometiéndola a esfuerzos de corte con un punzón y una matriz (fig. 16.2a). En las figuras 16.2b y c se muestran las características típicas de las orillas cizalladas de la hoja y de la masa restante, respectivamente. Nótese que estas orillas no son lisas ni perpendiculares al plano de la hoja.

Por lo general, el cizallado se inicia con la formación de grietas en las orillas superior e inferior de la pieza de trabajo (en los puntos *A* y *B*, y *C* y *D* de la fig. 16.2a). Al fi-

TABLA 16.1

Características generales de los procesos de formado de hojas metálicas (en orden alfabético)

Proceso de formado	Características
Embutido	Partes de poca o mucha profundidad con formas relativamente simples, altas capacidades de producción, costos elevados de herramental y equipo.
Por explosión	Hojas (láminas) grandes con formas relativamente simples, bajos costos de herramental pero con costos elevados de mano de obra, producción de cantidades pequeñas, tiempos largos de ciclo.
Por pulso magnético	Operaciones de formado de poca profundidad, abombado y repujado en hojas de resistencia relativamente baja, requiere herramental especial.
Martillado	Contornos de poca profundidad en hojas grandes, flexibilidad de operación, costos de equipo generalmente elevados, el proceso también se utiliza para enderezar partes formadas.
Laminado	Partes largas con secciones transversales constantes simples o complejas, buen acabado superficial, altas capacidades de producción, costos elevados de herramental.
Con hule	Embutido y repujado de formas simples o relativamente complejas, superficie de la hoja protegida mediante membranas de hule, flexibilidad de operación, bajos costos de herramental.
Rechazado	Partes asimétricas pequeñas o grandes, buen acabado superficial, bajos costos de herramental, pero los costos de mano de obra pueden ser elevados, a menos que se automatice la operación.
Estampado	Incluye una amplia variedad de operaciones, como punzonado, troquelado, repujado, doblado, rebordeado y acuñado; las formas simples o complejas se forman a altas capacidades de producción; los costos del herramental y del equipo pueden ser altos, pero el costo de la mano de obra es bajo.
Estiramiento	Partes grandes con contornos poco profundos, producción en cantidades bajas, costos elevados de mano de obra, los costos del herramental y del equipo aumentan con el tamaño de la pieza.
Superplástico	Formas complejas, detalles finos y tolerancias dimensionales cerradas, tiempos largos de formado (de ahí que las capacidades de producción sean bajas), las partes no son adecuadas para uso en alta temperatura.

nal, estas grietas se encuentran una con otra y ocurre la separación completa. Las *superficies* rugosas *de fractura* se deben a estas grietas; las *superficies pulidas*, lisas y brillantes en el orificio y en la masa son el resultado del contacto y roce de la orilla cizallada contra las paredes del punzón y de la matriz, respectivamente.

Los principales parámetros del proceso de cizallado son:

- La forma del punzón y de la matriz.
- La velocidad del punzonado.
- La lubricación.
- La **holgura** (*c*) entre el punzón y la matriz.

La holgura es un factor importante para determinar la forma y calidad de la orilla cizallada. Al aumentar la holgura, la zona de deformación (fig. 16.3a) se vuelve más grande y la orilla cizallada más rugosa. La hoja tiende a ser jalada hacia la región de la holgura, y el perímetro, u orillas de la zona cizallada, se torna más rugoso. A menos que dichas orillas sean aceptables tal como se producen, pueden requerirse operaciones secundarias a fin de hacerlas más lisas (lo que incrementa el costo de producción).

La calidad de la orilla se mejoraría aumentando la velocidad del punzón; ésta puede llegar a ser de 10 a 12 m/s (30 a 40 pies/s). Como se muestra en la figura 16.3b, los ejes cizallados pueden sufrir un severo trabajado en frío debido a los grandes esfuerzos de corte involucrados. El endurecimiento por trabajo de las orillas reduce su ductilidad y daña la formabilidad de la hoja durante las operaciones posteriores, como el doblado y el estirado.

La relación del área bruñida contra las zonas rugosas a lo largo de la orilla cizallada *(a)* aumenta al incrementarse la ductilidad de la hoja metálica, y *(b)* disminuye al au-

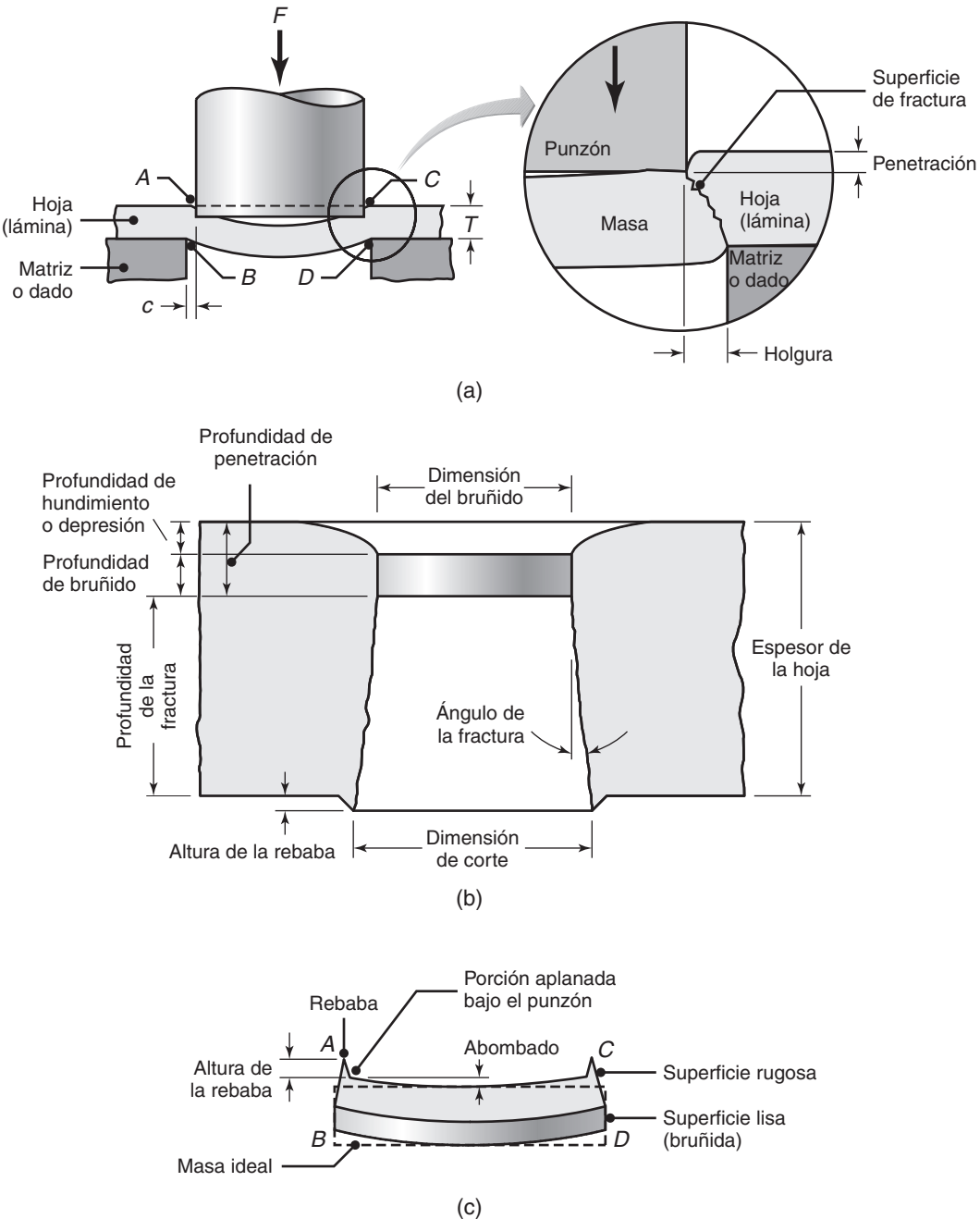


FIGURA 16.2 *(a)* Esquema del cizallado con un punzón y una matriz, indicando algunas de las variables del proceso. Rasgos característicos de: *(b)* orificio punzonado; *(c)* la masa. (*Nota:* las escalas de *(b)* y *(c)* son diferentes).

mentar el espesor y la holgura de la hoja. La extensión de la zona de deformación en la figura 16.3 depende de la velocidad de punzonado. Si ésta se incrementa, el calor generado por la deformación plástica se confina a un área cada vez más pequeña. En consecuencia, la zona cizallada es más angosta y la superficie cizallada más lisa, además de que muestra menos formación de rebabas. Una **rebaba** o filo es una orilla o reborde delgado, como se muestra en las figuras 16.2b y c. Su altura aumenta al incrementarse la

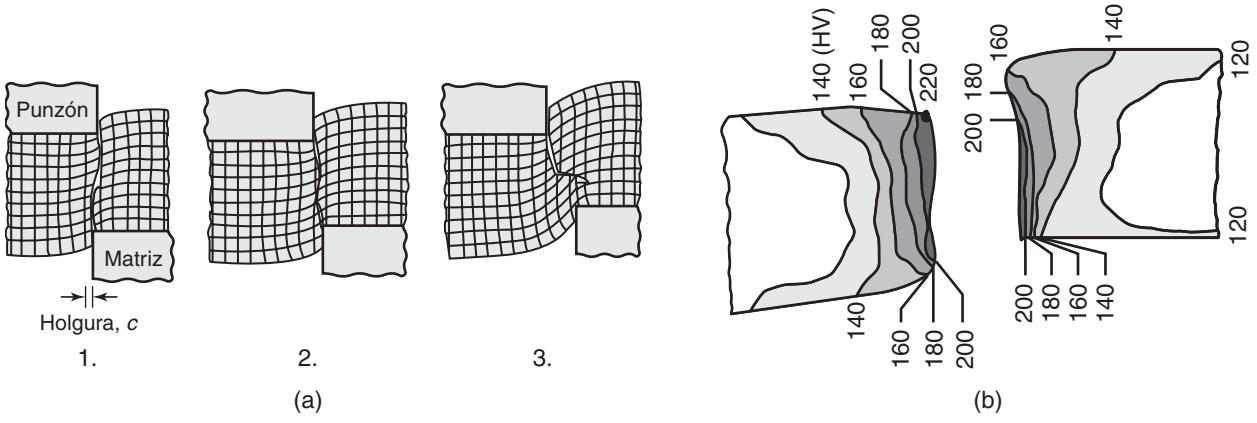


FIGURA 16.3 *(a)* Efecto de la holgura, *c*, entre el punzón y la matriz en la zona de deformación cizallada. Conforme aumenta la holgura, el material tiende a jalarse dentro de la matriz más que a cizallarse. En la práctica, las holguras por lo general varían entre 2% y 10% del espesor de la hoja. *(b)* Contornos de microdureza (HV) para acero AISI 1020 laminado en caliente de 6.4 mm (0.25 pulgada) de espesor en la región cizallada. *Fuente:* H. P. Weaver y K. J. Weinmann.

holgura y ductilidad de la hoja metálica. Las orillas gastadas de las herramientas contribuyen en gran medida a la formación de rebabas, cuya altura, forma y tamaño pueden afectar significativamente las operaciones posteriores de formado. En la sección 26.8 se describen varios procesos de **rebabeo**.

Fuerza de punzonado. La fuerza requerida para punzonar es fundamentalmente producto de la resistencia al corte o cortante de la hoja metálica y el área total cizallada a lo largo de la periferia. La *fuerza máxima de punzonado* (*F*) se puede estimar mediante la ecuación

$$F = 0.7TL(\text{UTS}) \tag{16.1}$$

donde T es el espesor de la hoja, L la longitud total cizallada (como el perímetro de un orificio) y UTS la resistencia última o máxima a la tensión del material. Al aumentar la holgura, disminuyen la fuerza de punzonado y el desgaste de punzones y matrices. Los efectos de la forma del punzón y de la matriz sobre las fuerzas de punzonado se describen en la sección 16.2.3.

Sin embargo, la fricción entre el punzón y la pieza de trabajo puede aumentar de manera significativa la fuerza de punzonado. Más aún, aparte de esta última se requiere otra fuerza para retirar el punzón de la hoja durante su carrera de retorno. Esta segunda fuerza, que tiene dirección opuesta a la fuerza de punzonado, es difícil de estimar por los muchos factores involucrados en la operación.

EJEMPLO 16.1 Cálculo de la fuerza de punzonado

Estímese la fuerza requerida para punzonar un orificio de 1 pulgada (25.4 mm) de diámetro a través de una hoja aleada de titanio Ti-6Al-4V, recocida, de 1/8 de pulgada (3.2 mm) de espesor, a la temperatura ambiente.

Solución La fuerza se estima a partir de la ecuación 16.1, donde el UTS para esta aleación se encuentra en la tabla 6.10, es decir, 1000 MPa o 140,000 psi. Entonces:

$$F = 0.7\left(\frac{1}{8}\right)(\pi)(1)(140{,}000) = 38{,}500 \text{ lb} = 19.25 \text{ tons} = 0.17 \text{ MN}$$

16.2.1 Operaciones de cizallado

Las operaciones más comunes de cizallado son el **punzonado**, donde la masa cizallada se desecha (fig. 16.4a) o puede utilizarse con algún otro propósito, y el **troquelado**, donde la masa es la parte a utilizar y el resto es desecho. Las operaciones descritas a continuación y en el resto de este capítulo suelen efectuarse en máquinas de control numérico computarizado, con portaherramientas de cambio rápido. Dichas máquinas son útiles sobre todo para fabricar prototipos de partes producidas con hojas metálicas que requieren varias operaciones para su elaboración.

Corte por matriz. Ésta es una operación de cizallado que consiste en los siguientes procesos básicos (fig. 16.4b):

- **Perforado:** es el punzonado de varios orificios en una hoja.
- **Seccionado:** con él se cizalla la hoja en dos o más piezas.
- **Muescado:** consiste en el retiro de piezas (o diferentes formas) de los orillas.
- **Pestañado o lanceteado:** con él se deja una ceja sin retirar material.

Las partes producidas por estos procesos tienen diferentes usos, en particular al ensamblarse con otros componentes. Las hojas metálicas perforadas con diámetros de orificios que van de 1 mm (0.040 pulgada) a 75 mm (3 pulgadas) se usan como filtros, mallas, guardas para maquinaria, en ventilación, para abatir el ruido y reducir peso en partes fabricadas y estructuras. Se punzonan en plegadoras o manivelas (ver fig. 14.17a) a velocidades tan altas como 30,000 orificios por minuto, utilizando matrices y equipo especial.

Troquelado fino. Mediante el *troquelado fino* se pueden producir orillas muy lisas y a escuadra (fig. 16.5a). En la figura 16.5b se muestra el diseño de una matriz básica. Un aguijón o sujetador con forma de V sujeta firme y mecánicamente la hoja en su lugar y evita el tipo de distorsión del material mostrado en las figuras 16.2b y 16.3. El proceso de troquelado fino, que se desarrolló en la década de 1960, comprende holguras del orden de 1% del espesor de la hoja y puede variar de 0.5 mm a 13 mm (0.02 a 0.5 pulgada) en la mayoría de los casos. Las tolerancias dimensionales son de +/−0.05 mm (0.002 pulgada) y menos de +/−0.025 mm (0.001 pulgada) en el caso de perpendicularidad de la orilla.

Ranurado. Las operaciones de cizallado se pueden efectuar mediante un par de cuchillas circulares, semejantes a las de un abrelatas (fig. 16.6). En el *ranurado*, las cuchillas siguen tanto una línea recta como una trayectoria circular o curva. Normalmente una orilla ranurada tiene una rebaba, que se puede doblar sobre la superficie de la hoja laminándola (aplanándola) entre dos rodillos. Si no se ejecutan en forma apropiada, las operaciones de ranurado pueden provocar diferentes distorsiones de las orillas cizalladas.

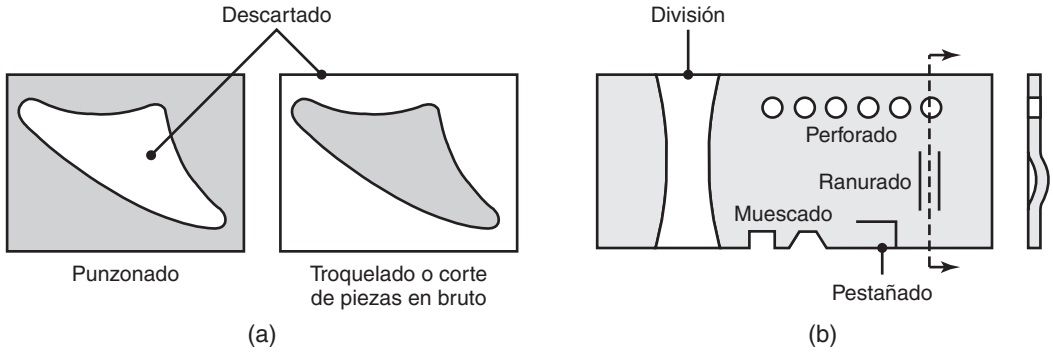
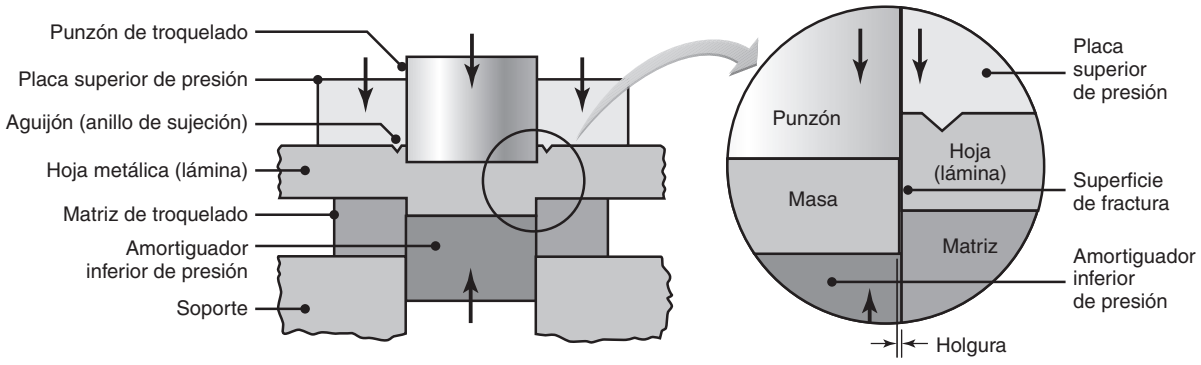


FIGURA 16.4 *(a)* Punzonado (penetrado) y troquelado. *(b)* Ejemplos de diferentes operaciones de corte con matrices en hojas metálicas.



(a)



(b)

FIGURA 16.5 *(a)* Comparación de orillas cizalladas producidas mediante técnicas de troquelado convencional (izquierda) y fino (derecha). *(b)* Esquema de una configuración para troquelado fino. *Fuente:* Cortesía de Feintool U. S. Operations.

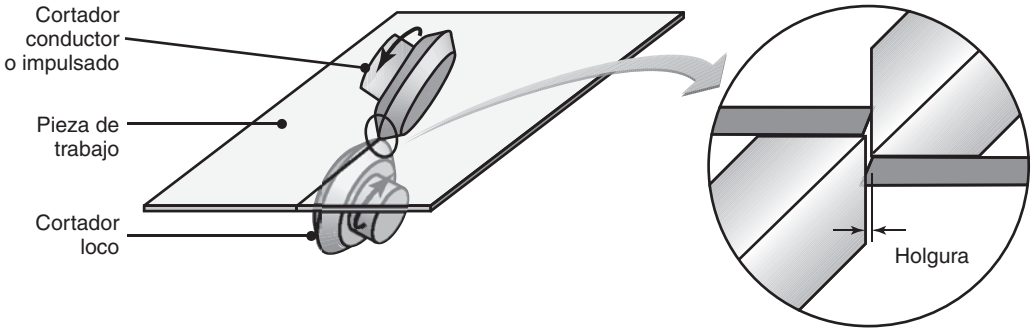


FIGURA 16.6 Ranurado con cuchillas rotativas. Este proceso es similar al de abrir latas.

Reglas de acero (suajes). Los metales blandos (al igual que el papel, la piel y el hule) se pueden troquelar con una *regla de acero (suaje)*. Este tipo de matrices constan de una delgada cinta de acero endurecido doblada con la forma que se va a producir (un concepto similar al de un cortador de galletas), que apoya su orilla sobre una base plana de madera. La matriz se presiona contra la hoja que descansa en la superficie plana y la cizalla a lo largo de la forma de la regla de acero.

Niblado o perforado. En el *niblado*, una máquina llamada *nibladora* mueve con rapidez un punzón recto pequeño arriba y abajo dentro de una matriz. A través de la separación, se alimenta una hoja y se le practican muchos orificios traslapados. Mediante controles manuales o automáticos es posible cortar hojas a lo largo de cualquier trayectoria deseada. Además de su flexibilidad, una ventaja del niblado es que pueden produ-

cirse ranuras y muescas intrincadas, como las que se muestran en la figura 16.4b, utilizando punzones estándar. El proceso es económico para pequeños lotes de producción porque no se requieren matrices especiales.

Desechos del cizallamiento. La cantidad de desecho (*pérdida por recorte*) generada en las operaciones de cizallado puede ser significativa y llegar hasta 30% en estampados grandes (ver tabla 40.3). El desecho puede constituir un porcentaje importante del costo de la manufactura y se reduciría de modo sustancial mediante el arreglo eficiente de las formas en la hoja a cortar (**anidado**, ver fig. 16.51). Se han desarrollado técnicas de diseño asistido por computadora para minimizar el desecho en las operaciones de cizallado.

16.2.2 Láminas en bruto soldadas a la medida

En los procesos de formado de hojas metálicas que se tratarán en este capítulo, por lo general la lámina en bruto es una hoja de una pieza y de un mismo espesor cortada a partir de una hoja larga. Una variación importante de estas condiciones es la *soldadura a tope mediante rayo láser* (ver sección 30.7), de dos o más piezas de hoja metálica con diferentes formas y espesores. Debido a los pequeños espesores involucrados, es importante alinear las hojas en forma apropiada antes de soldarlas. Luego, al ensamble soldado se le da la forma final (ver ejemplo 16.2).

Esta técnica se está volviendo cada vez más importante, sobre todo para la industria automotriz. Debido a que ahora cada parte de una pieza puede tener un espesor, grado, recubrimiento u otra propiedad diferente, las láminas en bruto soldadas a la medida poseen las propiedades requeridas en las distintas ubicaciones de la lámina en bruto. El resultado es:

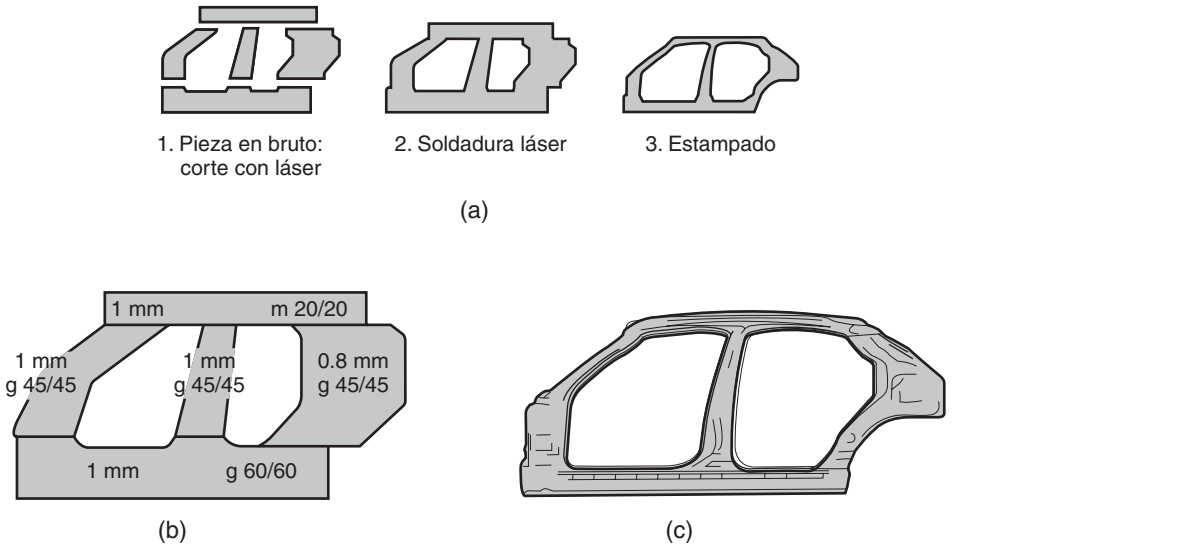
- Una reducción del desecho.
- Eliminación de la necesidad de soldadura por puntos adicional (es decir, durante la manufactura de la carrocería).
- Mejor control de las dimensiones.
- Mejora de la productividad.

EJEMPLO 16.2 Hoja metálica soldada a la medida para aplicaciones automotrices

En la figura 16.7 se muestra un ejemplo del uso de las hojas metálicas soldadas a la medida en las carrocerías automotrices. Obsérvese que primero se cortan (troquelan) cinco láminas en bruto diferentes, lo que comprende el uso de corte mediante rayos láser. Estas láminas se sueldan a tope con el láser y después se estampan para darles la forma final. Cuatro de ellas tienen 1 mm de espesor, y una, 0.8 mm. Así, pueden adaptarse para la aplicación específica, no sólo por lo que se refiere a la forma y el espesor, sino también por el uso de hojas de diferente calidad, con recubrimientos o sin ellos.

Las técnicas de soldadura láser están muy desarrolladas; en consecuencia, las uniones soldadas son muy robustas y confiables. La creciente tendencia a soldar y formar piezas de hojas metálicas permite una flexibilidad significativa en el diseño del producto, rigidez estructural, formabilidad y comportamiento ante el choque de un automóvil. También hace posible el uso de diferentes materiales en un componente, así como ahorros de peso y reducción de costos en materiales, desechos, equipo, ensamble y mano de obra.

Existen mayores aplicaciones para este tipo de producción en las compañías automotrices. En los diversos componentes mostrados en la figura 16.8 se utilizan las ventajas ya descritas. Por ejemplo, obsérvese en la figura 16.8b que la resistencia y rigidez requeridas para el soporte del amortiguador de impacto se obtienen al soldar una pieza redonda sobre la superficie de la hoja grande. El espesor de la hoja en tales componentes es variable (según su ubicación y contribución a dichas características, como rigidez y resistencia) y, por ende, posibilita ahorros significativos de peso sin pérdida de resistencia y rigidez estructural.



Leyenda

g 60/60 (45/45)	Hoja de acero aleado galvanizada en caliente. Cantidad de zinc: 60/60 (45/45) g/m^2.
m 20/20	Hoja de acero con doble capa de aleación hierro-zinc electrodepositadas. Cantidad de zinc: 20/20 g/m^2.

FIGURA 16.7 Producción de la pieza lateral exterior de una carrocería automotriz mediante soldado a tope con rayo láser y estampado. *Fuente:* M. Geiger y T. Nakagawa.

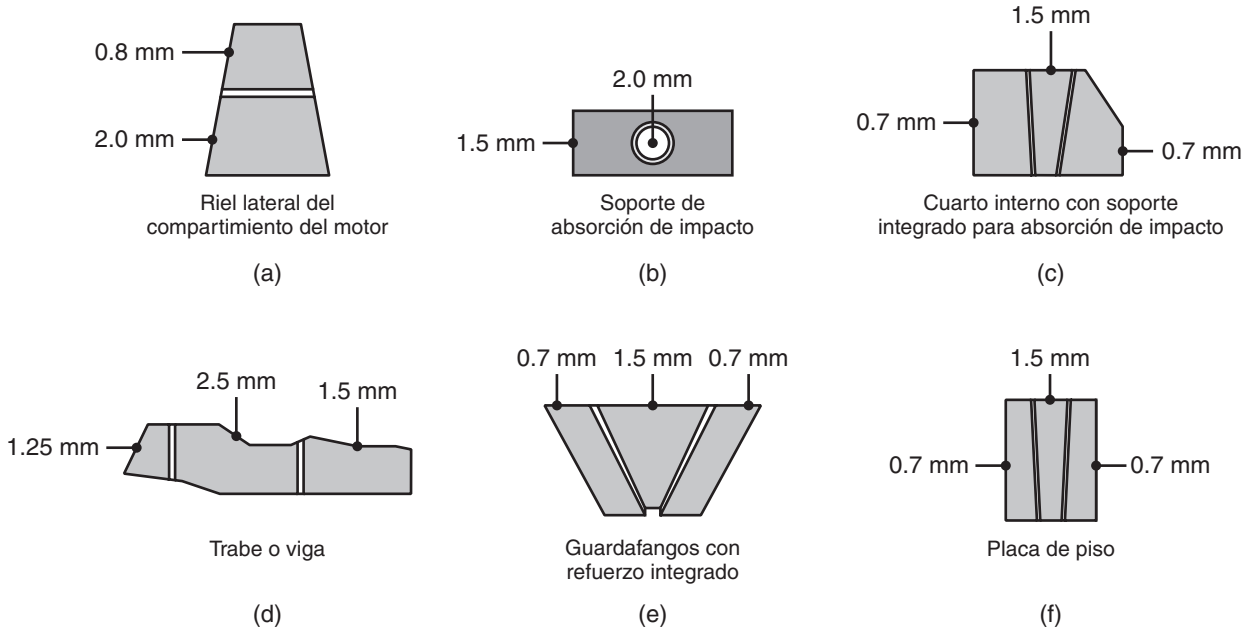


FIGURA 16.8 Ejemplos de componentes de carrocería automotriz soldados a tope con rayo láser y estampados. *Fuente:* M. Geiger y T. Nakagawa.

16.2.3 Características y tipo de las matrices o dados para cizallado

En esta sección se describen las características y los tipos de diversas matrices para cizallado.

Holgura. Debido a que la formabilidad de la pieza cizallada puede ser afectada por la calidad de las orillas cizalladas, es importante controlar la holgura. La holgura apropiada depende de:

- El tipo de material y su tipo de temple.
- El espesor y el tamaño de la lámina en bruto.
- Su proximidad a las orillas de otras orillas cizalladas o a los bordes de la pieza en bruto original.

Por lo general, las holguras varían entre 2% y 8% del espesor de la hoja, aunque pueden ser tan pequeñas como 1% (por ejemplo, en el troquelado fino), o tan grandes como 30%. Cuanto más pequeña sea la holgura, mejor será la calidad de la orilla. Si el borde cizallado es rugoso y no es aceptable, se puede someter a un proceso llamado **rasurado** (fig. 16.9a), donde se recorta el material adicional de la orilla, como se muestra también en la figura 21.3.

Como lineamientos generales: *(a)* las holguras para los materiales blandos son menores que para los más duros; *(b)* cuanto más gruesa sea la hoja, más grande será la holgura; y *(c)* al disminuir la relación de diámetro del orificio a espesor de la hoja, la holgura debe ser mayor. Al usar holguras grandes, hay que poner atención en la rigidez y alineación de las prensas, las matrices y su preparación.

Forma del punzón y de la matriz (dado). En la figura 16.2a se observa que las superficies del punzón y de la matriz son planas. Debido a que se cizalla al mismo tiempo todo el espesor, la fuerza de punzonado aumenta con rapidez durante el cizallamiento. La ubicación de las regiones que se están cizallando puede controlarse en cualquier instante, en particular *biselando* (o generando un chaflán en) las superficies del punzón y de la matriz (fig. 16.10). Esta forma es similar a la de algunos punzones para papel, lo que puede observarse mirando de cerca la punta del mismo. El biselado es particularmente adecuado para cizallar hojas gruesas porque reduce la fuerza al principio de la carrera. También disminuye el nivel de ruido de la operación, ya que ésta es más suave.

En la figura 16.10c se observa que la punta del punzón es simétrica, y en la figura 16.10d que la matriz es simétrica; esto es, no existen fuerzas laterales actuando sobre el punzón para causar distorsión. Por el contrario, el punzón de la figura 16.10b tiene un co-

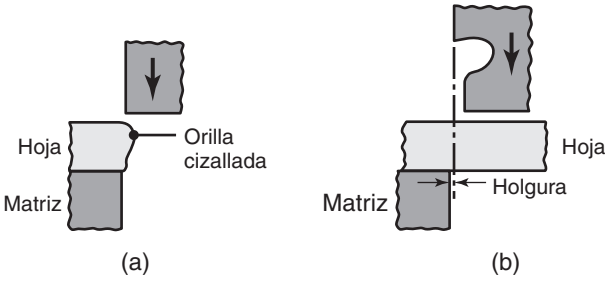


FIGURA 16.9 Esquemas del proceso de rasurado. *(a)* Rasurado de una orilla cizallada. *(b)* Cizallado y rasurado combinados en un golpe.

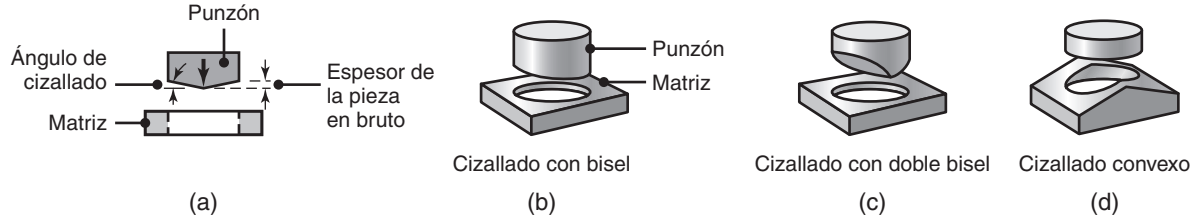


FIGURA 16.10 Ejemplos del uso de los ángulos de cizallado en punzones y matrices.

no simple, por lo que se somete a una fuerza lateral. En consecuencia, las configuraciones del punzón y de la prensa en este último caso deben tener la suficiente rigidez lateral para que no produzcan un orificio mal colocado ni permitan que el punzón golpee la orilla de la matriz inferior (como podría pasar en los puntos *B* o *D* en la fig. 16.2a), provocando daños.

Matrices compuestas. Se pueden realizar varias operaciones en la misma hoja con un solo recorrido de una estación con una *matriz* (o *dado*) *compuesta* (fig. 16.11). Por lo común, dichas operaciones combinadas se limitan a formas relativamente simples, ya que *(a)* el proceso es de alguna manera lento, y *(b)* el costo de producción de estas matrices se eleva con rapidez en comparación con aquéllas para operaciones individuales de cizallamiento, sobre todo en el caso de matrices complejas.

Matrices progresivas. Las partes cuya elaboración requiere múltiples operaciones se pueden fabricar con grandes capacidades de producción en *matrices progresivas*. La hoja metálica se alimenta como cinta en rollo y se realiza una operación diferente (como punzonado, troquelado y muescado) en la misma estación de la máquina con cada recorrido de una serie de punzones (fig. 16.11c). En la figura 16.11d se muestra una parte fabricada en matrices progresivas: una pieza redonda que soporta la punta metálica de las latas de aerosol.

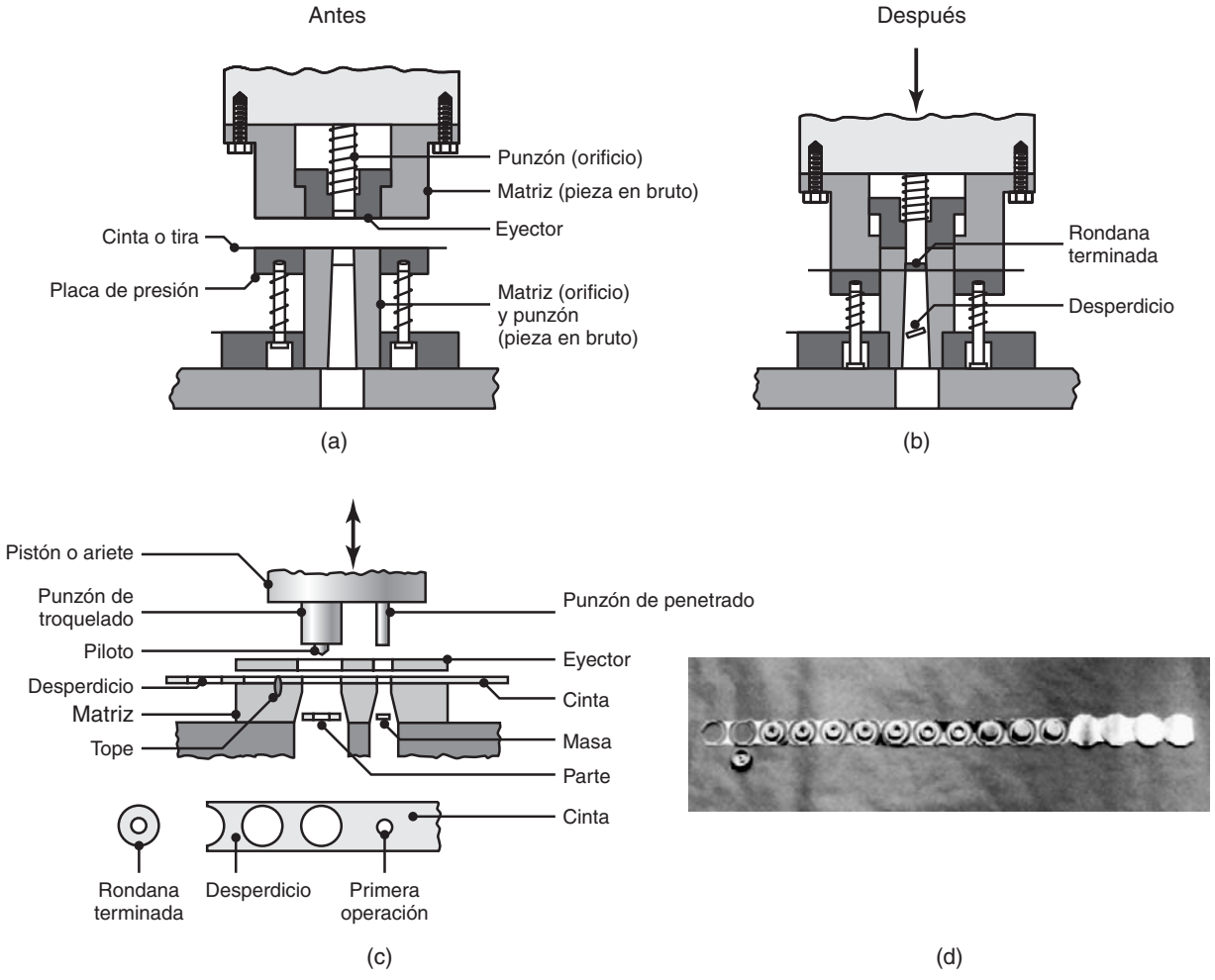


FIGURA 16.11 Esquemas: *(a)* antes, y *(b)* después del troquelado de una rondana común en una matriz compuesta. Obsérvese los movimientos de separación de la matriz (para el troquelado) y del punzón (para punzonar el orificio en la rondana). *(c)* Esquema de la fabricación de una rondana en una matriz progresiva. *(d)* Formado de la pieza superior de una lata de aerosol en una matriz progresiva. Nótese que la parte se mantiene sujeta a la cinta hasta que se termina la última operación.

Matrices de transferencia. En la configuración de una *matriz de transferencia*, la hoja metálica pasa por diferentes operaciones en distintas estaciones de la máquina, las cuales se arreglan a lo largo de una línea recta o en una trayectoria circular. Después de cada paso, la parte se transfiere a la siguiente estación para operaciones posteriores.

Materiales para herramental y matrices. En general, los materiales para herramentales y matrices de cizallado son aceros para herramental (para grandes capacidades de producción) y carburos (ver tabla 5.7). La lubricación es importante si se pretende reducir el desgaste de la herramienta y de la matriz, además de mejorar la calidad de la orilla.

16.2.4 Métodos diversos para corte de hojas metálicas

Existen diversos métodos para cortar hojas y, particularmente, placas:

- El **corte con rayo láser** es un proceso importante (sección 26.7) que suele utilizarse con equipo controlado por computadora para cortar una gran variedad de formas de manera consistente, en diversos espesores y sin el uso de matrices. El corte con rayo láser también se puede combinar con el punzonado y el cizallado. Estos procesos cubren gamas diferentes y complementarias. Las partes con características distintas se pueden producir mejor mediante uno u otro proceso. Ya se han desarrollado y construido máquinas combinadas que incorporan ambas capacidades (ver también ejemplo 27.1).
- El **corte con chorro de agua a presión** es un proceso de corte efectivo con muchos materiales metálicos y no metálicos (sección 27.8).
- Corte con **sierra cinta**: este método es un proceso de remoción de viruta.
- El **aserrado por fricción** comprende un disco u hoja que se frota contra la lámina o placa a altas velocidades superficiales (sección 24.5).
- El **corte por flama** es otro método común, específico para placas gruesas; se utiliza ampliamente en la construcción de embarcaciones y en componentes estructurales pesados.

16.3 Características y formabilidad de las hojas metálicas

Una vez que se corta una lámina en bruto de una hoja o rollo más grande, se le dan diferentes formas mediante varios procesos que se describirán en el resto de este capítulo. Ahora revisaremos brevemente las características de las hojas metálicas que tienen efectos importantes en estas operaciones de formado, como se indica en la tabla 16.2.

Elongación. Los procesos de formado de hojas metálicas raramente comprenden extensión uniaxial sencilla, como el del ensayo de tensión. Sin embargo, las observaciones de dicho ensayo son útiles y necesarias para entender el comportamiento de los metales en estas operaciones. En la sección 2.2 se vio que un espécimen sometido a tensión primero sufre una **elongación uniforme**, y que cuando la carga excede su resistencia máxima a la tensión, aquél comienza a formar un cuello, por lo que la elongación ya no es uniforme.

En el formado de hojas el material suele estirarse, por lo que es deseable una elongación uniforme elevada para que tenga buena formabilidad. El esfuerzo real al que se inicia la formación del cuello es numéricamente igual al *exponente de endurecimiento por esfuerzo* (n) que se muestra en la ecuación 2.8; entonces, un valor elevado de n indica una elongación grande y uniforme (ver también tabla 2.3). La formación del cuello puede ser *localizada* o *difusa*, dependiendo de la *sensibilidad a la velocidad de deformación* (m) del material; esta relación se da en la ecuación 2.9. Cuanto mayor sea el valor de m, más difuso se volverá el cuello. Un cuello difuso es deseable en las operaciones de formado de las hojas. Además de la elongación uniforme y la formación del cuello, la

TABLA 16.2

Características importantes de los metales en las operaciones de formado de hojas (láminas)

Característica	Importancia
Anisotropía (normal) Elongación	Determina la capacidad de la hoja (lámina) metálica para estirarse sin formar cuellos y sin romperse; son deseables un exponente de endurecimiento por deformación (n) y un exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación (m) elevados.
Elongación de punto de fluencia	Las depresiones parecidas a flamas (también llamadas bandas de Lüder o deformaciones por estirado) que comúnmente se observan en la superficie de la hoja, se pueden eliminar mediante laminado de revenido, pero debe darse forma a la hoja dentro de cierto tiempo después del laminado.
Anisotropía (planar)	Exhibe comportamiento diferente en diferentes direcciones planares; ocurre en las hojas laminadas en frío debido a la orientación preferida o la fibración mecánica; causa ondulación en el embutido profundo; se puede reducir o eliminar mediante recocido, pero con una resistencia menor.
Anisotropía (normal)	Determina el comportamiento de adelgazamiento de las hojas metálicas durante el estirado, importante en el embutido profundo.
Tamaño de grano	Determina la rugosidad de la superficie en las hojas metálicas estiradas, cuanto más grueso es el grano, más rugosa será la apariencia (cáscara de naranja), también afecta la resistencia del material.
Esfuerzos residuales	Originados comúnmente por la deformación no uniforme durante el formado, provoca una distorsión parcial cuando se corta, puede producir el agrietamiento por esfuerzo-corrosión, se reducen o eliminan mediante el relevado de esfuerzos.
Recuperación elástica	Debido a la restitución elástica de las hojas deformadas plásticamente después de la carga, provoca distorsión de la pieza y pérdida de precisión dimensional, se puede controlar mediante técnicas como el sobredoblado y el apoyo del punzón.
Arrugado	Causado por los esfuerzos de compresión en el plano de la hoja, puede ser objetable, dependiendo de su extensión, puede ser útil para impartir rigidez a las partes al incrementar su módulo de sección, se puede controlar mediante un diseño apropiado del herramental y de la matriz.
Calidad de las orillas cizalladas	Depende del proceso utilizado; las orillas pueden ser rugosas, no a escuadra, y contener grietas, esfuerzos residuales y una capa endurecida por trabajo, que son todos dañinos para la formabilidad de la hoja; la calidad de las orillas se puede mejorar mediante troquelado fino, reduciendo la holgura, rasurando y con mejoras en el diseño del herramental y de la matriz y con lubricación.
Condición superficial de la hoja	Depende de la práctica de laminado de la hoja; es importante en el formado de las hojas y puede causar desgarramiento y una calidad superficial deficiente.

elongación total de la probeta (en términos de la correspondiente a la longitud de galga de 50 mm) también es un factor significativo en la formabilidad de metales en hojas.

Elongación del punto de fluencia. Los aceros al bajo carbono y algunas aleaciones de aluminio-magnesio muestran un comportamiento denominado *elongación del punto de fluencia*, que tiene puntos de fluencia superior e inferior (fig. 16.12a). Este comportamiento produce las **bandas de Lüder** (también llamadas *marcas de esfuerzo por estiramiento* o *gusanos*) en la hoja (fig. 16.12b). Éstas son depresiones alargadas en la superficie de la hoja, como las que se pueden ver en el fondo de las latas que contienen productos domésticos comunes (fig. 16.12c). Tales marcas serían objetables en el producto final porque el abultamiento en la superficie podría degradar la apariencia y causar dificultades en las operaciones posteriores de recubrimiento y pintura.

El método usual para evitar estas marcas consiste en eliminar o reducir la elongación del punto de fluencia disminuyendo el espesor de la hoja de 0.5% a 1.5% mediante el laminado en frío (**laminado de temple** o **superficial**). Sin embargo, debido al envejecimiento por deformación, la elongación del punto de fluencia reaparece después de algunos días a temperatura ambiente, o luego de unas horas a temperaturas más elevadas. Para evitar este fenómeno, que es indeseable, el material debe formarse dentro de cierto límite de tiempo (que depende del tipo de acero).

Anisotropía. Un factor que influye en el formado de hojas metálicas es la *anisotropía* (*direccionalidad*) de las mismas. Cabe recordar que la anisotropía se adquiere durante el proceso termomecánico de la lámina y que hay dos tipos de ella: la *anisotropía cristalográfica* (orientación preferencial de los granos) y la *fibración mecánica* (alineación de las impurezas, inclusiones y huecos a través del espesor de la hoja). La importancia de este aspecto se analiza en la sección 16.4.

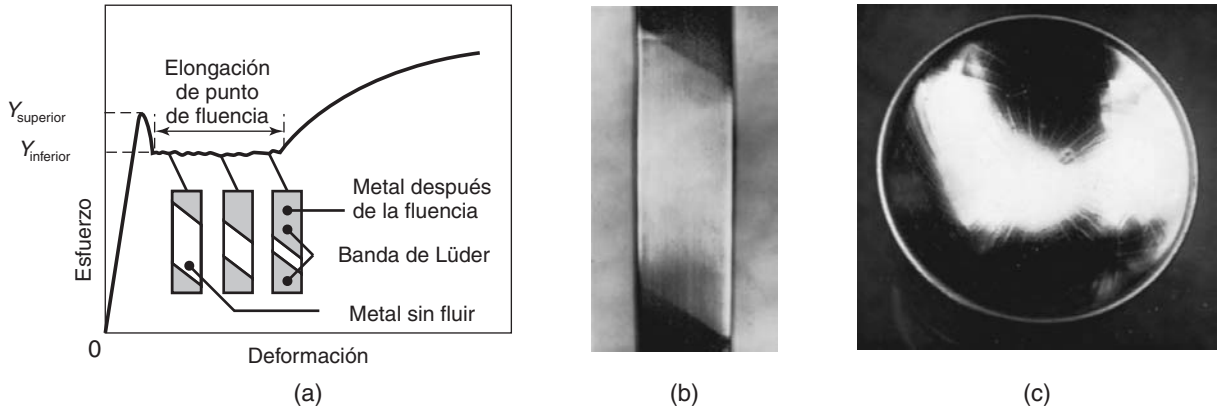


FIGURA 16.12 *(a)* Elongación de punto de fluencia en un espécimen de hoja (lámina) metálica. *(b)* Bandas de Lüder en una hoja de acero de bajo carbono. *(c)* Deformaciones por estirado en el fondo de una lata de acero para productos domésticos. *Fuente: (b)* Cortesía de Caterpillar Inc.

Tamaño de grano. Como se señaló en la sección 1.4, el tamaño de grano afecta las propiedades mecánicas y la apariencia superficial de la parte formada *(cáscara de naranja)*. Cuanto menor sea el tamaño de grano, más fuerte será el metal; y cuanto más grueso sea el grano, más rugosa será la apariencia superficial. Para operaciones de formado de hojas metálicas se prefiere un tamaño de grano 7 de ASTM (tabla 1.1).

Resistencia al mellado de las hojas metálicas. Por lo común, las melladuras se presentan en los automóviles, artículos electrodomésticos y muebles de oficina. Las fuerzas dinámicas de los objetos en movimiento que golpean la hoja metálica causan las melladuras. Por ejemplo, en las partes automotrices características las velocidades de impacto llegan a ser de 45 m/s (150 pies/s). Por ello, el *esfuerzo dinámico de fluencia* (esfuerzo de fluencia a altas velocidades de deformación), más que el esfuerzo estático de fluencia, es el parámetro significativo de la resistencia.

Las fuerzas dinámicas tienden a causar melladuras *localizadas*, mientras que las fuerzas estáticas tienden a *difundir* el área mellada. Este fenómeno puede demostrarse al tratar de mellar una pieza de una hoja metálica plana, primero empujando un martillo con punta de bola contra ella y después golpeándola con el martillo. Obsérvese cuán localizada puede ser la melladura en el último caso. Se ha encontrado que la *resistencia al mellado* de las partes de hojas metálicas *(a)* aumenta al incrementarse el espesor de la hoja y su esfuerzo de fluencia, y *(b)* disminuye al aumentar su módulo elástico y la rigidez general de la pieza. En consecuencia, las piezas rígidamente sujetas por sus bordes tienen una baja resistencia al mellado debido a su mayor rigidez.

16.4 Pruebas de formabilidad para hojas metálicas

La **formabilidad de las hojas metálicas** es de gran interés tecnológico y económico. Por lo general se define como la capacidad de la hoja metálica para sufrir el cambio de forma deseado sin fallar, ya sea mediante la formación de un cuello, agrietamiento o desgarramiento. Como se verá en el resto de este capítulo, las hojas metálicas (dependiendo en parte de su geometría) pueden sufrir dos modos básicos de deformación: (1) *estirado* y (2) *embutido*. Existen dos distinciones importantes entre ambos modos, y se utilizan distintos parámetros para determinar la formabilidad en estas diferentes condiciones. A continuación se describirán los métodos que suelen utilizarse para predecir la formabilidad.

Pruebas de copa (acopamiento o ahuecamiento). Las primeras pruebas desarrolladas para predecir la formabilidad fueron las pruebas de copa (fig. 16.13a). En la *prueba Erichsen*, la hoja del espécimen se sujeta entre dos matrices planas, circulares, y se

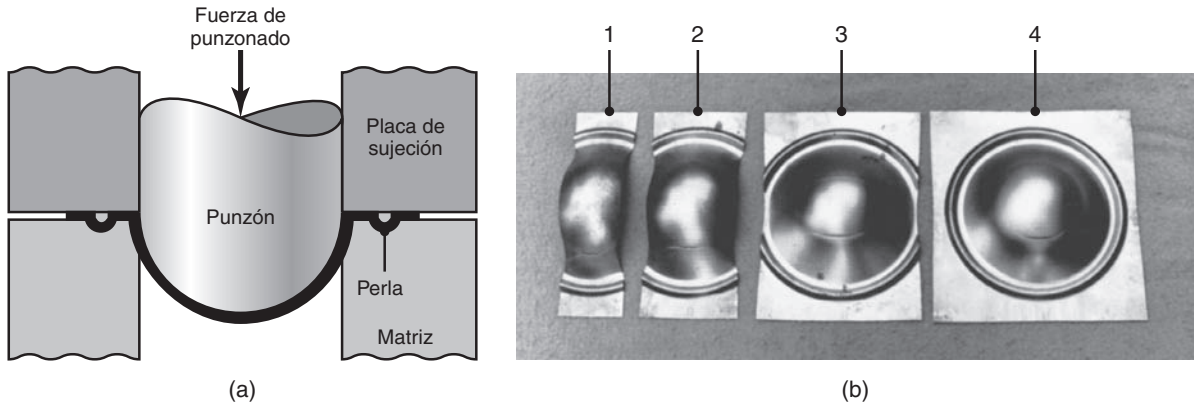


FIGURA 16.13 *(a)* Prueba de formado de depresión (copa) (prueba Erichsen) para determinar la formabilidad de las hojas metálicas. *(b)* Resultados de la prueba de abombado en hojas metálicas de diferentes anchos. El espécimen del lado izquierdo se somete, básicamente, a tensión simple; el del extremo derecho se somete a un estiramiento biaxial equilibrado. *Fuente*: Cortesía de Inland Steel Company.

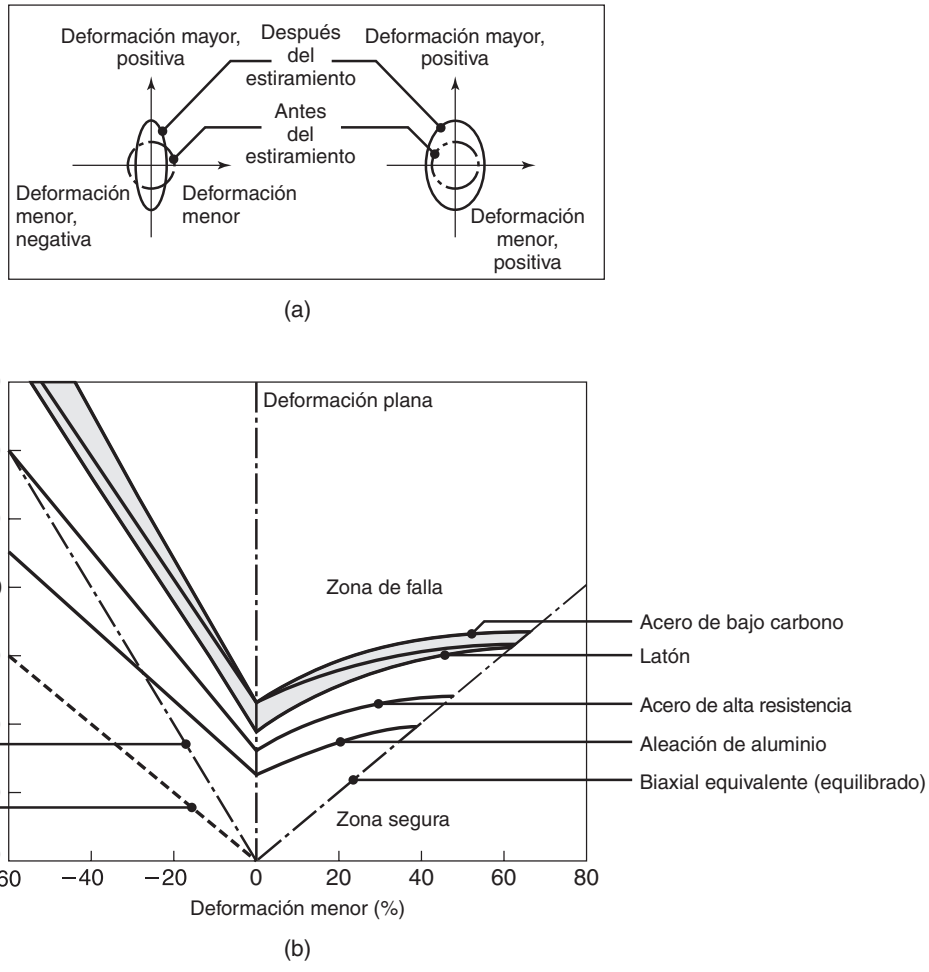


FIGURA 16.14 *(a)* Deformaciones en patrones deformados de rejillas circulares. *(b)* Diagramas de límites de formado (FLD) para diferentes hojas metálicas. Aunque la deformación mayor siempre es positiva (estiramiento), la deformación menor puede ser positiva o negativa. R es la anisotropía normal de la hoja, como se describió en la sección 16.4. *Fuente:* S. S. Hecker y A. K. Ghosh.

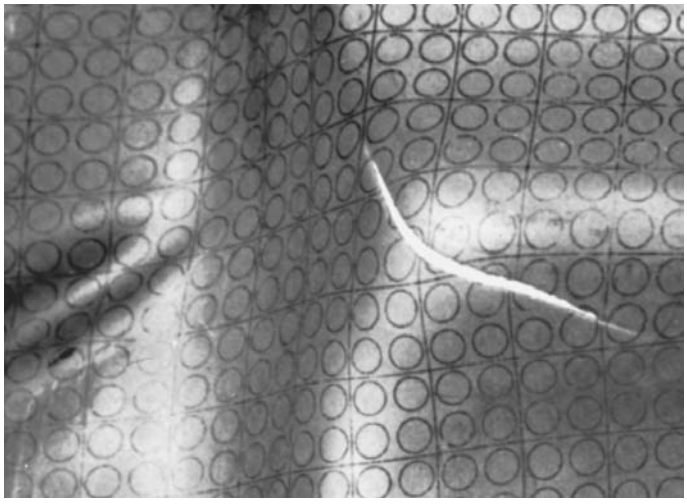


FIGURA 16.15 Deformación de un patrón de rejilla y rasgado de una hoja metálica durante el formado. Los ejes mayor y menor de los círculos se utilizan para determinar las coordenadas en el diagrama de límites de formado de la figura 16.14b. *Fuente:* S. P. Keeler.

fuerza una bola de acero o un punzón redondo sobre la hoja hasta que comienza a aparecer una grieta en el espécimen estirado. La *profundidad de punzonado* (*d*) a la que ocurre la falla es una medida de la formabilidad de la hoja. Aunque es fácil realizar esta prueba y otras similares, no se simulan las condiciones exactas de las operaciones de formado real, de ahí que no sean particularmente confiables, sobre todo para partes complejas.

Diagramas de límites de formado. Un avance importante en la prueba de formabilidad de las hojas metálicas es el desarrollo de los *diagramas de límites de formado*, como se muestra en la figura 16.4. Un diagrama de límites de formado (FLD, por sus siglas en inglés) se construye marcando primero la hoja plana con un patrón de rejilla de círculos (ver fig. 16.15), mediante técnicas electroquímicas o de fotograbado. Después se estira la lámina en bruto sobre un punzón (fig. 16.13a) y se observa y mide la deformación de los círculos en las regiones donde ocurrió la falla (*formación de cuellos* y *rasgado*). Aunque suelen tener un diámetro de 2.5 mm a 5 mm (0.1 a 0.2 pulgada), los círculos deben hacerse tan pequeños como sea práctico para mejorar la precisión de la medición.

Con el propósito de desarrollar un estiramiento desigual para simular las operaciones reales de formado de las hojas, los especímenes planos se cortan con anchos variables (fig. 16.13b) y después se someten a prueba. Obsérvese que un espécimen cuadrado (a la derecha de la figura) produce un *estiramiento biaxial equivalente* (como el que se obtiene al inflar un globo), mientras que un espécimen angosto (a la izquierda de la figura) se aproxima al estado de *estiramiento uniaxial* (es decir, tensión simple). Luego de realizar una serie de ensayos en una lámina metálica en particular y a diferentes anchos, se construye un diagrama de límites de formado en el que se muestran las fronteras entre las regiones *de falla* y las *seguras* (fig. 16.14b).

Para desarrollar un diagrama de límites de formado se obtienen las deformaciones ingenieriles mayor y menor, midiendo la deformación de los círculos originales. En la figura 16.14a se observa que el círculo se ha deformado hasta convertirse en elipse, cuyo *eje mayor* representa la dirección y magnitud mayores del estiramiento. La deformación mayor es la *deformación ingenieril* en esta dirección y siempre es *positiva*, ya que la hoja se está estirando. El *eje menor* de la elipse representa la magnitud del estiramiento o contracción en la dirección *transversal*.

Sin embargo, nótese que la deformación menor puede ser *positiva* o *negativa*. Por ejemplo, si se coloca un círculo en el centro de una probeta para ensayo de tensión y después se alarga uniaxialmente (tensión simple), la probeta se estrecha al estirarse (debido al efecto de Poisson) y, por lo tanto, la deformación menor es negativa. (Este comportamiento se puede demostrar con facilidad estirando una banda de hule y observando los cambios dimensionales que sufre). En cambio, si colocamos un círculo sobre un globo y lo inflamos, las deformaciones mayor y menor son ambas positivas y de magnitud equivalente.

Al comparar las áreas de las superficies del círculo original y del círculo deformado sobre la hoja formada, también puede determinarse si el espesor de la hoja ha cambiado durante la deformación. Como en la deformación plástica el volumen permanece constante, se sabe que si el área del círculo deformado es mayor que la del círculo original, la hoja se ha vuelto más delgada. Este fenómeno se puede demostrar con facilidad inflando un globo y observando que se vuelve más translúcido conforme se estira (porque se está volviendo más delgado).

Los datos así obtenidos en los diferentes puntos de cada una de las muestras que aparecen en la figura 16.13b, se grafican después como se muestra en la figura 16.14b. Las curvas representan los límites entre las *zonas de falla* y las *zonas seguras* para cada tipo de metal, y como se puede observar, cuanto más elevada sea la curva, mejor será la formabilidad de un metal en particular. Como se esperaba, los diferentes materiales y condiciones (como los trabajados en frío o tratados térmicamente) tienen distintos diagramas de límites de formado.

Tómese como ejemplo la aleación de aluminio de la figura 16.14b: si un círculo en un punto específico de la hoja ha sufrido deformaciones mayores y menores de más 20% y menos 10%, respectivamente, no habría desgarramiento ahí. En cambio, si las deformaciones mayores y menores fueran de más 80% y menos 40%, respectivamente, en otra ubicación, existiría un desgarramiento en esa parte particular del espécimen. En la figura 16.15 se muestra un ejemplo de una parte producida con una hoja metálica formada con un patrón de rejilla. Obsérvese la deformación de los patrones circulares alrededor del desgarramiento de la hoja formada.

Es importante hacer notar, en los diagramas de límites de formado, que una deformación por compresión menor de, digamos, 20%, se asocia con una deformación mayor más grande que una deformación menor a tensión (positiva) de la misma magnitud. En otras palabras, es deseable que la deformación menor sea negativa (esto es, que la contracción ocurra en la dirección menor). En el formado de partes complejas pueden diseñarse herramentales especiales, a fin de aprovechar el efecto benéfico de las deformaciones menores negativas en la formabilidad.

El efecto del espesor de las hojas sobre los diagramas de límites de formado se refleja en la elevación de las curvas en la figura 16.14b. Cuanto más gruesa sea la hoja, más elevada será la curva de formabilidad y, por ende, más formable. En las operaciones reales de formado, una pieza en bruto gruesa tal vez no se doble tan fácilmente alrededor de radios pequeños sin agrietarse (como se indica en la sección 16.5 sobre doblado). La fricción y la lubricación en la interfaz entre el punzón y la hoja metálica también afectan los resultados de los ensayos. Con unas interfaces bien lubricadas, las deformaciones en la hoja se distribuyen de manera más uniforme sobre el punzón. De igual forma, como era de esperarse, y dependiendo del material y de su sensibilidad a muescas, rayaduras superficiales, depresiones profundas e imperfecciones, se puede reducir de modo significativo la formabilidad y de ahí llevar a un desgarramiento prematuro y a la falla de la parte.

16.5 Doblado de hojas, placas y tubos

El *doblado* es una de las operaciones industriales de formado más comunes. Basta con echar un vistazo a la carrocería de un automóvil, un electrodoméstico, un broche para papel o un archivero para apreciar a cuántas partes se les dio forma mediante el doblado. Más aún, el doblado también proporciona rigidez a la pieza al aumentar su momento de inercia. Por ejemplo, nótese cómo los corrugados, los rebordes, los canales y las costuras mejoran la rigidez de las estructuras sin agregar peso. Asimismo, obsérvese la rigidez diametral de una lata metálica con acanalado circunferencial y sin él (ver también *acanalado*).

En la figura 16.16 se muestra la terminología utilizada en el doblado de una hoja (lámina) o placa. Obsérvese que las fibras exteriores del material se encuentran a tensión, mientras que las interiores están a compresión. Debido al efecto de Poisson, la anchura de la parte (*longitud de doblado*, L) se ha vuelto más pequeña en la región exterior y más

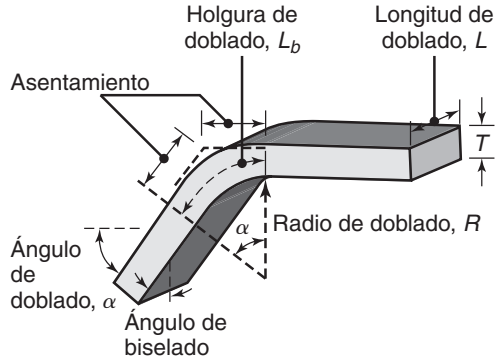


FIGURA 16.16 Terminología de doblado. Obsérvese que el radio de doblado se mide con respecto a la superficie interior de la parte doblada.



FIGURA 16.17 *(a)* y *(b)* Efecto de las inclusiones elongadas (fibrosas) en el agrietamiento, como función de la dirección de doblado con respecto a la dirección original de laminación de la hoja. *(c)* Grietas en la superficie exterior de una cinta de aluminio doblada en ángulo de 90°. Obsérvese también el estrechamiento de la superficie superior en el área doblada (debido al efecto de Poisson).

grande en la región interior que la anchura original (como se ve en la fig. 16.17c). Este fenómeno puede observarse con facilidad doblando una goma de borrar de hule rectangular para advertir sus cambios de forma.

Como se muestra en la figura 16.16, la **holgura o tolerancia de doblado** (L_b) es la longitud del *eje neutro* en el doblez y se utiliza para determinar la longitud de la lámina en bruto de una pieza que se va a doblar. Sin embargo, la posición del eje neutro depende del radio y el ángulo de doblado (como se describe en los textos de mecánica de materiales). Una fórmula aproximada para la holgura de doblado es la siguiente:

$$L_b = \alpha(R + kT) \tag{16.2}$$

donde α es el ángulo de doblez (en radianes), T el espesor de la hoja, R el radio de doblez y k una constante. En la práctica, los valores de k comúnmente varían de 0.33 (para $R < 2T$) a 0.5 (para $R > 2T$). Obsérvese que para el caso ideal, el eje neutro se encuentra en el centro del espesor de la hoja, $k = 0.5$, y, de ahí,

$$L_b = \alpha\left[R + \left(\frac{T}{2}\right)\right] \tag{16.3}$$

Radio mínimo de doblado. El radio al que aparece una grieta por primera vez en las fibras exteriores de una hoja se conoce como *radio mínimo de doblado*. Se puede de-

mostrar que la deformación ingenieril en las fibras exteriores e interiores de una hoja durante el doblado está dada por la expresión:

$$e = \frac{1}{(2R/T) + 1} \tag{16.4}$$

Entonces, al disminuir *R/T* (esto es, cuando la relación del radio de doblado se vuelve más pequeña con respecto al espesor), la deformación por tensión de las fibras exteriores aumenta y el material termina por desarrollar grietas (fig. 16.17). Por lo general, el radio de doblado se expresa (de manera recíproca) en términos del espesor como *2T*, *3T*, *4T* y así sucesivamente (ver tabla 16.3). Por ello, un radio mínimo de doblado de *3T* indica que el *radio más pequeño* al que se puede doblar la hoja sin agrietarse es de tres veces su espesor.

Existe una relación inversa entre la *capacidad de doblado* y la reducción de tensión del área del material (fig. 16.18). El *radio mínimo de doblado* (*R*) es aproximadamente:

$$R = T\left(\frac{50}{r} - 1\right) \tag{16.5}$$

TABLA 16.3

Radio mínimo de doblado para diversos metales a temperatura ambiente

	Condición	
Material	Blando	Duro
Aleaciones de aluminio	0	6*T*
Cobre berilio	0	4*T*
Latón (con bajo plomo)	0	2*T*
Magnesio	5*T*	13*T*
Aceros		
Acero inoxidable austenítico	0.5*T*	6*T*
Bajo carbono, baja aleación y HSLA	0.5*T*	4*T*
Titanio	0.7*T*	3*T*
Aleaciones de titanio	2.6*T*	4*T*

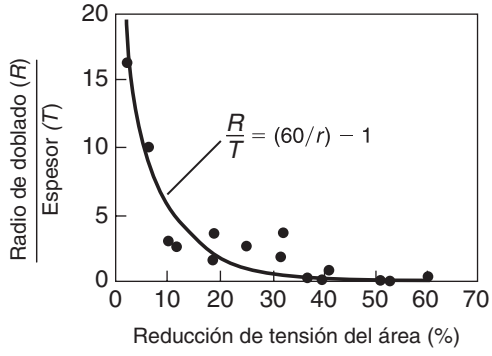


FIGURA 16.18 Relación entre el cociente *R/T* y la reducción de tensión de área para las hojas (láminas) metálicas. Obsérvese que la hoja metálica con una reducción de tensión de área de 50% puede doblarse sobre sí misma en un proceso similar al doblado de una hoja de papel sin agrietarse. *Fuente:* J. Datsko y C. T. Yang.

donde r es la reducción de tensión del área de la hoja metálica. Por lo tanto, para $r = 50$, el radio mínimo de doblado es cero; esto es, la lámina se puede doblar sobre sí misma (ver *plegado o doblez de bordes*), de manera muy similar a como se dobla una hoja de papel. Para aumentar la capacidad de doblado de los metales, podemos profundizar la reducción de tensión del área del metal calentándolo o doblándolo en un ambiente de alta presión. La capacidad de doblado también depende de las *condiciones de la orilla* de la hoja, pues como las orillas rugosas son puntos de concentración de esfuerzos, la capacidad de doblado disminuye al aumentar la rugosidad de la orilla.

Otro factor significativo en el agrietamiento de la orilla es la cantidad, forma y dureza de las *inclusiones* presentes en la hoja metálica y la cantidad de trabajado en frío que sufren las orillas durante el cizallado. Debido a que son puntiagudas, las inclusiones con forma alargada son más dañinas que las de forma globular (ver también fig. 2.23). La resistencia al agrietamiento de la orilla durante el doblado se puede mejorar mucho retirando las regiones trabajadas en frío mediante rasurado o maquinado de las orillas de la parte (ver fig. 16.9), o recociéndolas a fin de mejorar su ductilidad.

La *anisotropía* de la hoja es otro factor importante en la capacidad de doblado. El laminado en frío produce anisotropía por *orientación preferencial* o por *fibración mecánica* debido a la alineación de cualquiera de las impurezas, las inclusiones y los huecos que pudieran estar presentes, como se muestra en la figura 1.13. Antes de disponer (sobre dicha hoja) las piezas en bruto a doblar (*anidado*, ver fig. 16.51), debe tenerse cuidado de cortarlas en la dirección apropiada de una hoja laminada; sin embargo, esta opción no siempre puede ser posible en la práctica.

Recuperación elástica o restitución. Todos los materiales tienen un módulo finito de elasticidad, por lo que la deformación plástica siempre va seguida de alguna restitución elástica cuando se retira la carga (ver fig. 2.3). En el doblado, a esta restitución se le llama *rebote*, que puede observarse con facilidad si se dobla una pieza de hoja metálica o de alambre y se suelta después. La restitución no sólo se presenta en las hojas y placas planas, sino también en barras sólidas o huecas y en tubos de cualquier sección transversal. Como se hace notar en la figura 16.19, el ángulo final de doblado después de la restitución es menor que el ángulo al cual se dobló la parte, y el radio final de doblado es mayor que antes de que ocurriera el rebote.

La restitución o recuperación se puede calcular en términos de los radios R_i y R_f (fig. 16.19), como:

$$\frac{R_i}{R_f} = 4\left(\frac{R_iY}{ET}\right)^3 - 3\left(\frac{R_iY}{ET}\right) + 1 \qquad (16.6)$$

En esta fórmula se observa que la restitución elástica aumenta *(a)* al incrementarse la relación R/T y el esfuerzo de fluencia, Y, del material, y *(b)* al disminuir el módulo elástico, E.

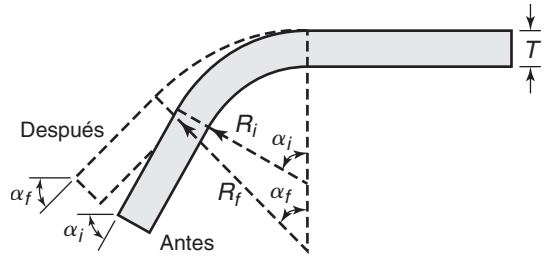


FIGURA 16.19 Recuperación elástica en el doblado. La parte tiende a recuperarse elásticamente después del doblado y el radio de doblado aumenta. En ciertas condiciones, es posible que el ángulo final de doblado sea menor que el ángulo original (recuperación elástica negativa).

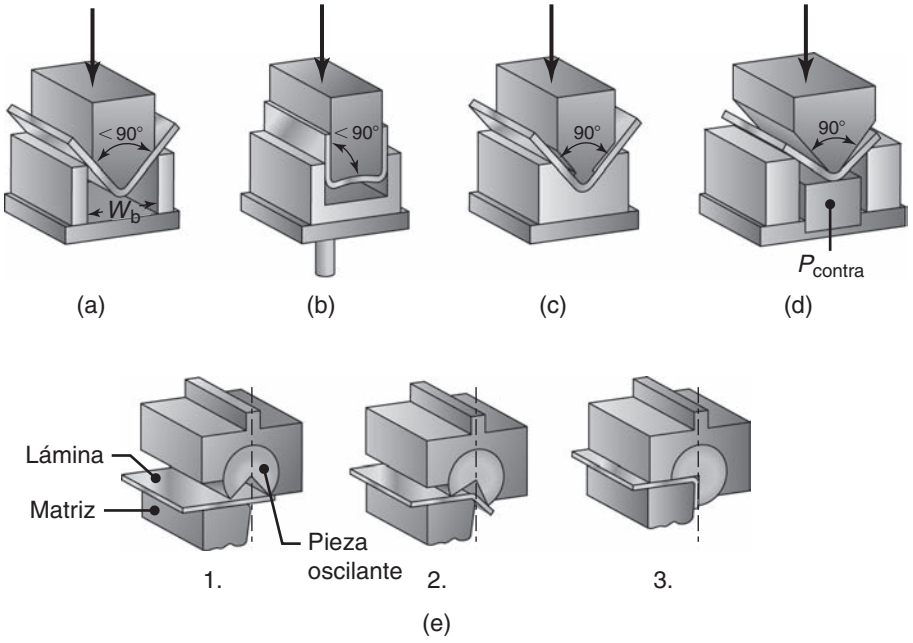


FIGURA 16.20 Métodos para reducir o eliminar la recuperación elástica en las operaciones de doblado.

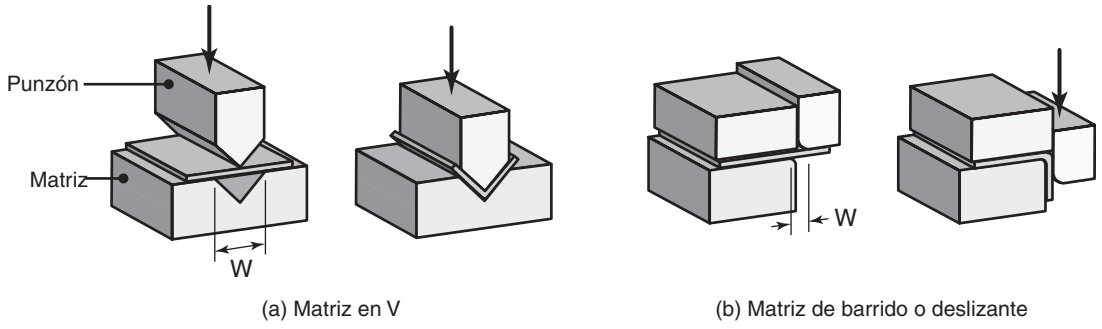


FIGURA 16.21 Operaciones comunes de doblado con matrices donde se muestra la dimensión de abertura de la matriz (W) utilizada para calcular las fuerzas de doblado.

En el doblado con matriz en V (figs. 16.20 y 16.21) incluso es posible que el material muestre *una restitución negativa*. Esta condición es causada por la naturaleza de la deformación, justo cuando el punzón termina la operación de doblado al final de la carrera. La restitución negativa no ocurre en el *doblado al aire* que se muestra en la figura 16.22a (llamado también *doblado libre*), debido a la falta de restricciones que impone la matriz en V sobre el área de doblado.

Compensación de la recuperación o restitución elástica. Por lo común, la recuperación o restitución en las operaciones de formado se compensa *sobredoblando* la parte (fig. 16.20a y b). Es posible que se necesiten varios intentos para obtener los resultados deseados. Otro método consiste en *acuñar* el área doblada sometiéndola a esfuerzos de compresión muy localizados entre la punta del punzón y la superficie de la matriz (fig. 16.20c y d), una técnica conocida como *fondear* el punzón. Otro método es el *doblado con estiramiento*, en el que la parte se somete a tensión mientras se dobla (ver también *conformado por estirado*, sección 16.6).

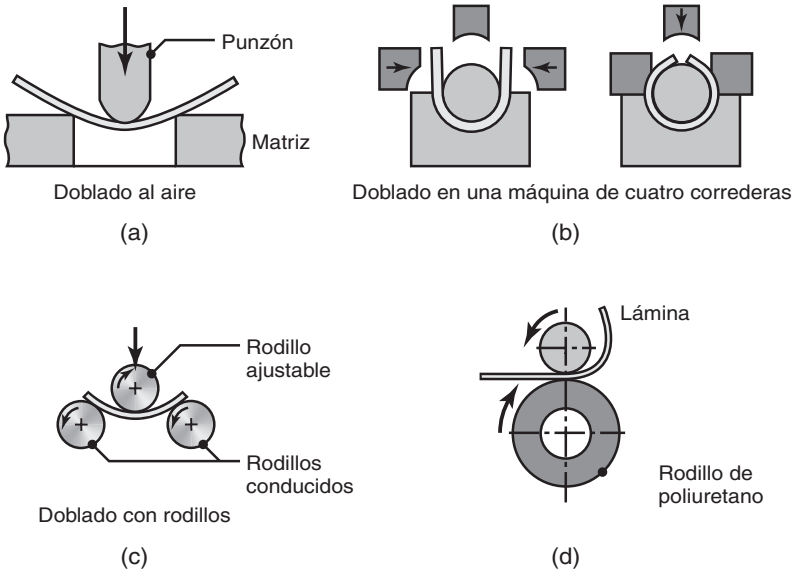


FIGURA 16.22 Ejemplos de diversas operaciones de doblado.

Fuerza de doblado. Se puede estimar la fuerza de doblado para hojas (láminas) y placas suponiendo que el proceso es el doblado simple de una viga rectangular, como se describe en los textos de mecánica de sólidos. Entonces, la fuerza de doblado es una función de la resistencia del material, la longitud (L) de doblado, el espesor (T) de la hoja y la abertura de la matriz o dado (W), como se muestra en la figura 16.21. Excluyendo la fricción, la *fuerza máxima de doblado* (P) es:

$$P = \frac{kYLT^2}{W} \tag{16.7}$$

donde el factor k varía de alrededor de 0.3 para una matriz deslizante a 0.7 para una matriz en U y a 1.3 para una matriz en V, y Y es el esfuerzo de fluencia del material.

Para una matriz en V, con frecuencia se modifica la ecuación 16.7 de la siguiente manera:

$$P = \frac{(\text{UTS})LT^2}{W} \tag{16.8}$$

donde UTS es la resistencia máxima del material. Esta ecuación se aplica bien a situaciones en las que el radio de la punta del punzón y el espesor de la hoja son relativamente pequeños comparados con la abertura de la matriz (W).

La fuerza de doblado también es función del avance del punzón en el ciclo de doblado. Aumenta de cero a un máximo y puede incluso disminuir cuando se termina el doblado. La fuerza se incrementa después de manera abrupta conforme el punzón alcanza el fondo de su carrera y la parte toca el fondo de la matriz. Sin embargo, en el doblado al aire (fig. 16.22a) la fuerza no vuelve a aumentar luego de que comienza a disminuir, ya que no encuentra resistencia en su movimiento libre hacia abajo.

16.6 Operaciones diversas de doblado y otras relacionadas

Formado en prensas plegadoras, de cortina o excéntricas. Las hojas o placas metálicas se pueden doblar fácilmente con simples soportes mediante una *prensa plegadora*. Las hojas o cintas angostas de hasta 7 m (20 pies), o incluso más largas, por lo general se doblan en una prensa de este tipo (fig. 16.23). La máquina utiliza matrices largas

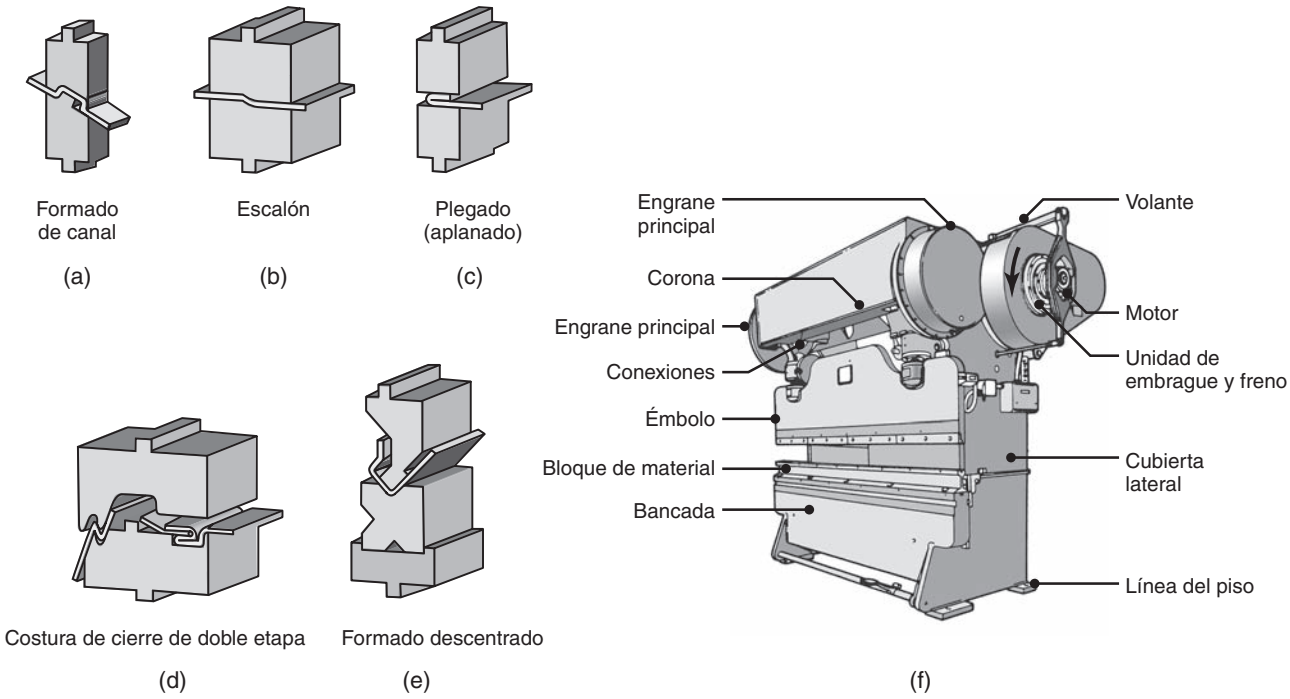


FIGURA 16.23 *(a)* a *(e)* Esquemas de diversas operaciones de doblado en una prensa de cortina. *(f)* Esquema de una prensa de cortina. *Fuente:* Cortesía de Verson Allsteel Company.

en prensas mecánicas o hidráulicas, y es particularmente adecuada para pequeños lotes de producción. Como se ve en la figura 16.23, el herramental es simple, los movimientos sólo son hacia arriba y hacia abajo y se adaptan con facilidad a una amplia variedad de formas. Además, el proceso se puede automatizar sin problemas para altos lotes de producción de bajo costo. Los *materiales para matrices* que se trabajan en prensas plegadoras pueden variar desde madera dura (para materiales de baja resistencia y pequeños lotes de producción) hasta carburos para hojas de materiales fuertes y abrasivos, y también se eligen a fin de mejorar la vida de la matriz. Sin embargo, para la mayoría de las aplicaciones, suelen utilizarse matrices de acero al carbono o de hierro gris.

Doblado en máquinas de cuatro correderas. El doblado de piezas relativamente cortas se puede efectuar en una máquina como la mostrada en la figura 16.22b, en la cual los movimientos laterales de las matrices se controlan y sincronizan con el movimiento vertical a fin de dar la forma deseada a la parte. Este proceso es útil para fabricar tubería y conduits con costura, bujes, sujetadores y diversos componentes de maquinaria.

Doblado con rodillo. En este proceso (fig. 16.22c), las placas se doblan mediante un juego de rodillos. Se pueden obtener diversas curvaturas al ajustar la distancia entre los tres rodillos. El proceso es flexible y se utiliza ampliamente con el propósito de doblar placas para aplicaciones como calderas, recipientes cilíndricos a presión y diversos miembros estructurales curvos. En la figura 16.22d se muestra el doblado de una cinta con un rodillo deformador hecho de poliuretano, que se adapta al cambio de forma conforme el rodillo duro superior presiona sobre la cinta.

Acanalado. En el *acanalado*, la periferia de la hoja metálica se dobla dentro de la cavidad de una matriz (fig. 16.24). El canal proporciona rigidez a la parte al aumentar el momento de inercia de esa sección. Igualmente, los canales mejoran la apariencia de la parte y eliminan las orillas afiladas expuestas, que pueden ser peligrosas.

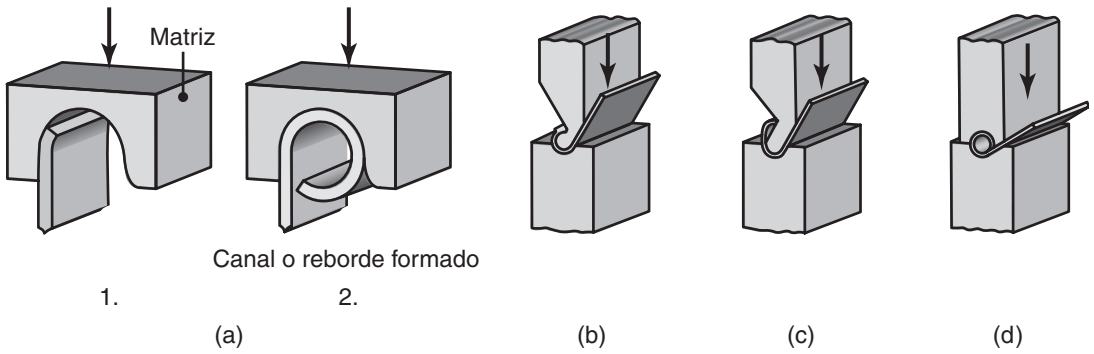


FIGURA 16.24 *a)* Formado de canales con una matriz simple. *(b)* Acanalado inicial. *(d)* Canal formado con dos matrices en una prensa de cortina.

Rebordeado. Este es un proceso de doblado de las orillas de las hojas metálicas, por lo común a 90°. En el **rebordeado por contracción** (fig. 16.25a), el borde se somete a esfuerzos circunferenciales de compresión, los cuales, si son excesivos, pueden hacer que la periferia del reborde se arrugue. La tendencia a la formación de pliegues aumenta al disminuir el radio de curvatura del reborde. En el **rebordeado por estiramiento**, la periferia del reborde se somete a esfuerzos de tensión que, si son excesivos, pueden ocasionar agrietamiento a lo largo de la periferia.

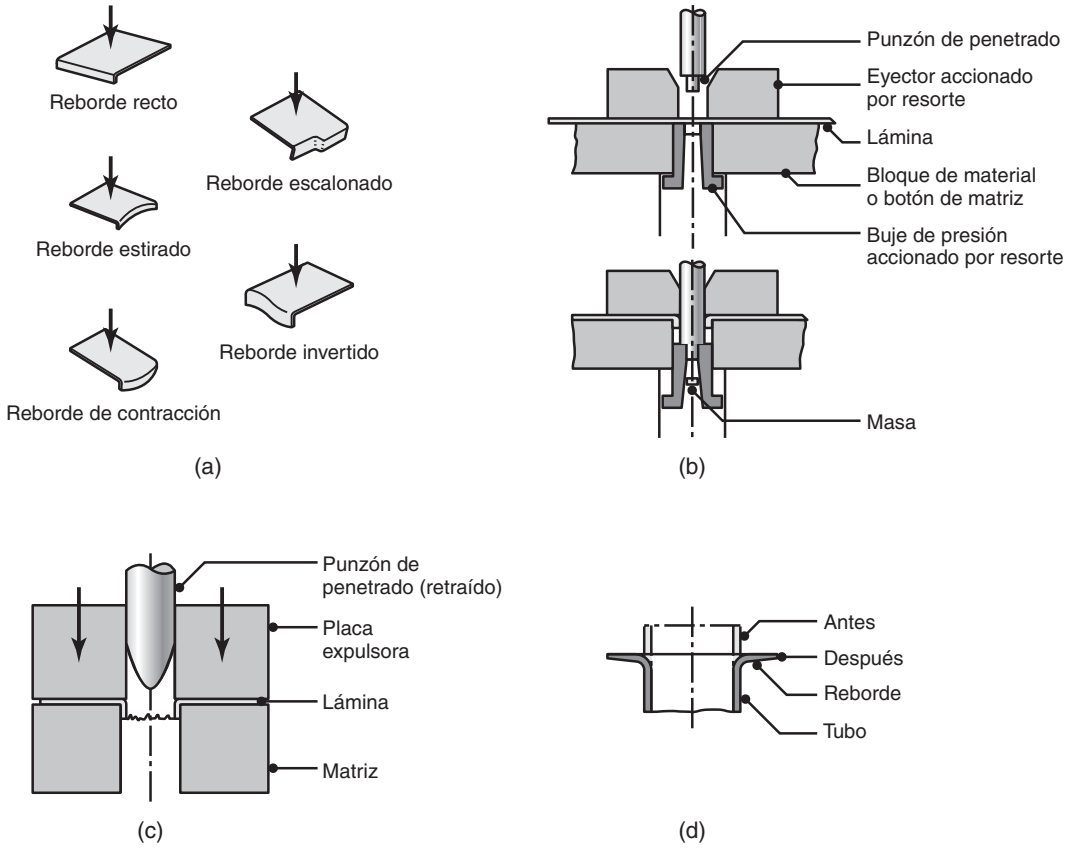


FIGURA 16.25 Diferentes operaciones de rebordeado. *(a)* Rebordes en una lámina plana. *(b)* Producción de orificios rebordeados. *(c)* Penetrado de hoja metálica para formar un reborde. En esta operación no tiene que haberse preformado un orificio antes de que descienda el punzón. Sin embargo, obsérvese las orillas rugosas a lo largo de la circunferencia del reborde. *(d)* Rebordeado de un tubo. Nótese el adelgazamiento de la orilla del reborde.

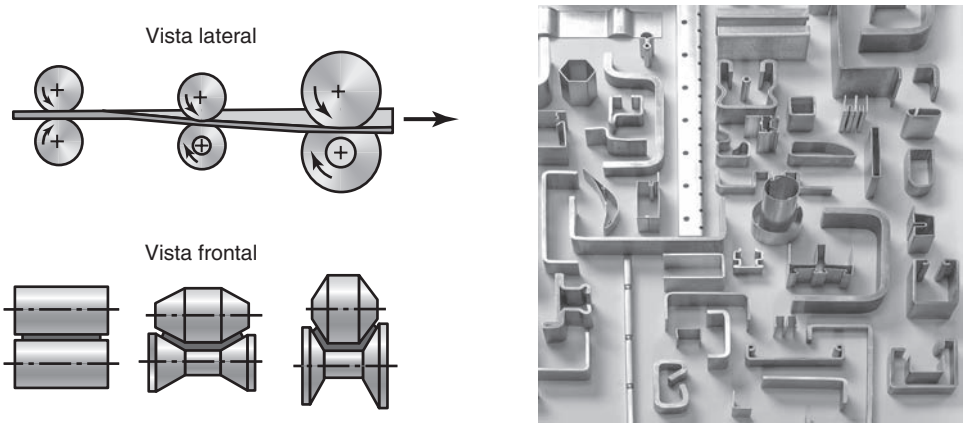


FIGURA 16.26 *(a)* Esquema del proceso de formado con rodillos. *(b)* Ejemplos de secciones transversales formadas con rodillos. *Fuente: (b)* Cortesía de Sharon Custom Metal Forming Inc.

Formado por rodillos. Este proceso, al que también se llama *formado por rodillos de contorno* o *formado por laminado en frío*, se utiliza para formar hojas metálicas de longitud continua y grandes lotes de producción. Conforme pasa a través de un conjunto de rodillos, la cinta metálica se dobla en etapas consecutivas (fig. 16.26). Después la cinta formada se cizalla en longitudes específicas y se apila de manera continua.

Los productos que suelen formarse por rodillos son los tableros, marcos para puertas y pinturas, canales, canalones, laterales, y tubos y tubería con costuras de cierre (ver sección 32.5). La longitud de la parte sólo se limita por la cantidad de material que alimenta a los rodillos desde el rollo de material. El espesor de la hoja por lo regular varía de casi 0.125 mm a 20 mm (0.005 a 0.75 pulgadas). En general, las velocidades de formado son menores a 1.5 m/s (300 pies/min), aunque pueden ser mucho mayores para aplicaciones especiales.

El diseño y la secuencia de los rodillos (que por lo común se accionan por medios mecánicos) requieren gran experiencia. Además, deben considerarse las tolerancias dimensionales y la recuperación o restitución elástica, así como el desgarramiento y pandeo de la cinta. Es común que los rodillos se fabriquen con acero al carbono o hierro gris y se recubran con cromo, a fin de dar un mejor acabado superficial al producto formado y mejorar la resistencia al desgaste de los rodillos. Se pueden utilizar lubricantes para reducir el desgaste de los rodillos, mejorar el acabado superficial y enfriar los rodillos y la hoja que se está formando.

Doblado y formado de tubos. El doblado y conformado de tubos y otras secciones huecas requiere herramental especial debido a la tendencia al pandeo y al plegado, como se observa al tratar de doblar un tubo de cobre o incluso un popote de plástico para bebidas. El método más antiguo para doblar un tubo o una tubería consiste en rellenar su interior con partículas sueltas (comúnmente, arena) y después doblarlo sobre un soporte adecuado. La función del relleno es evitar que el tubo se pandee hacia dentro; una vez doblado, se sacude y se le saca la arena. Los tubos también se pueden rellenar con diversos mandriles flexibles internos (fig. 16.27), con el mismo propósito que la arena. Debido a su menor tendencia al pandeo, un tubo relativamente grueso que se vaya a formar con un radio grande de doblado puede doblarse con seguridad sin el uso de rellenos o de insertos (ver también *hidroformado de tubos*, sección 16.8).

El formado de tubos y de formas tubulares, como los tubos de escape o de alimentación de combustible y los múltiples de escape, también se puede efectuar mediante la *presión* interna *de un fluido* (reemplazando el inserto de poliuretano), sellando los extremos por medios mecánicos. En este proceso *(hidroformado de tubos)*, la parte se expan-

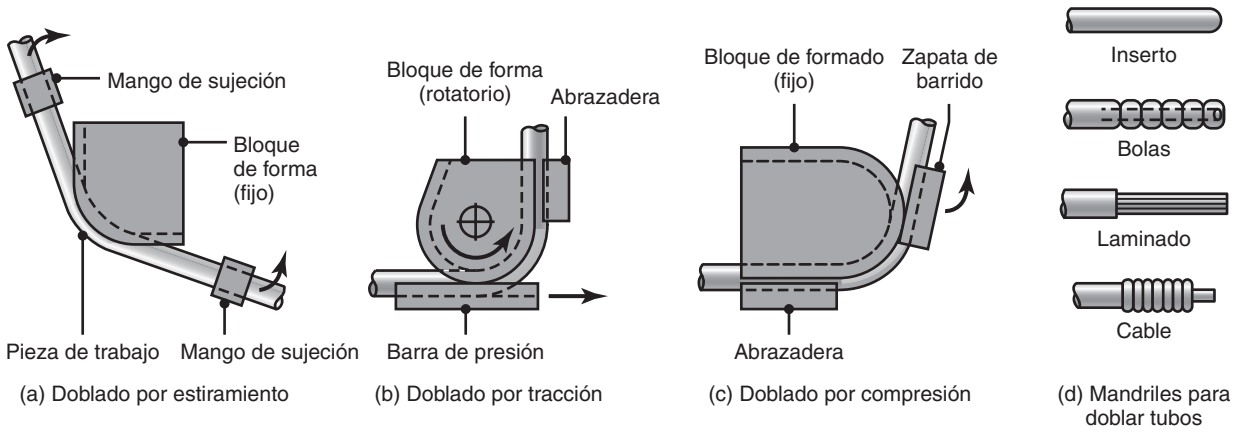


FIGURA 16.27 Métodos para doblar tubos. Con frecuencia se requieren mandriles internos o rellenar los tubos con materiales granulados, como arena, para evitar el colapso de los tubos durante el doblado. También se pueden doblar mediante una técnica que consiste en un resorte rígido de tensión helicoidal, en el que se inserta el tubo. La holgura entre el DE del tubo y el DI del resorte es pequeña, por lo que el tubo no se puede torcer y el doblado es uniforme.

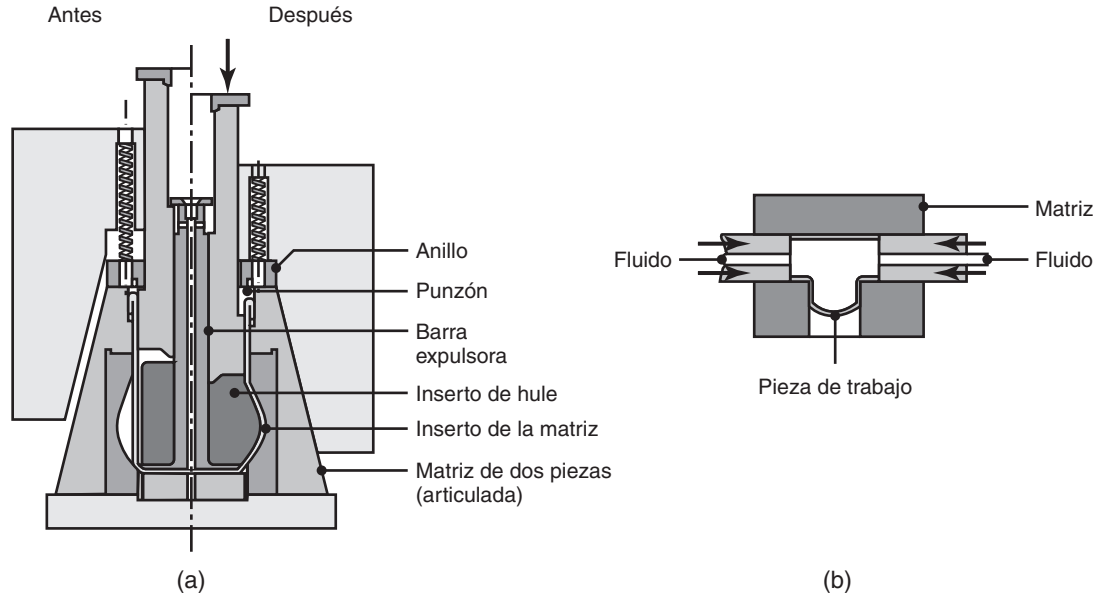


FIGURA 16.28 *(a)* Abombado de una parte tubular con un inserto flexible. Las jarras para agua se pueden fabricar mediante este método. *(b)* Producción de accesorios para plomería mediante la expansión de piezas tubulares sometidas a presión interna. Después se punzona hacia fuera el fondo de la pieza para producir una "T". *Fuente:* J. A. Schey.

de en una matriz hembra dividida, a presiones del orden de 600 MPa (90,000 psi). Después se abre la matriz para retirar la parte formada (fig. 16.28b).

Formado de orificios rebordeados, penetrado y abocardado. En el *formado de orificios rebordeados* (fig. 16.25b), primero se punzona un orificio y después se expande como un reborde. Los rebordes también pueden producirse mediante penetrado con un punzón de forma (fig. 16.25c). Los extremos de tubo se pueden rebordear además por medio de un proceso similar (fig. 16.25d). Cuando el ángulo de doblado es me-

nor a 90° (como en los accesorios con extremos cónicos), al proceso se le llama *abocardado*. En estas operaciones son importantes las condiciones de las orillas (ver fig. 16.3). Si se estira el material, se producen altos esfuerzos a la tensión a lo largo de la periferia (esfuerzos circunferenciales de tensión) que pueden provocar agrietamiento y desgarramiento del reborde.

Al aumentar la relación del diámetro del reborde con respecto al diámetro del orificio, las deformaciones se incrementan proporcionalmente. Dependiendo de la rugosidad de la orilla, existirá una tendencia al agrietamiento a lo largo de la periferia exterior del reborde. Para reducir esta posibilidad y mejorar su acabado superficial, las orillas cizalladas o punzonadas se pueden rasurar con una herramienta afilada (ver fig. 16.9).

Plegado y costura. En el proceso de *plegado* (también llamado *doblez de bordes* o *aplanamiento*), la orilla de la hoja se dobla sobre sí misma (fig. 16.23c). El plegado aumenta la rigidez de la parte, mejora su apariencia y elimina las orillas afiladas. La costura comprende la unión de dos orillas de hojas metálicas mediante el plegado (fig. 16.23d). Las costuras dobles se efectúan mediante un proceso similar utilizando rodillos con formas especiales para uniones herméticas al agua y al aire, como se necesitan en los contenedores de alimentos y bebidas.

Abombado. Este proceso implica la colocación de una parte tubular, cónica o curvilínea dentro de una matriz hembra dividida, expandiéndola después, por lo común con un inserto de poliuretano (fig. 16.28a). Luego se retrae el punzón, se regresa el inserto a su forma original (por medio de recuperación elástica total) y se retira la parte formada abriendo la matriz dividida. Productos típicos fabricados de esta manera son las jarras para café y agua, barriles de cerveza y canales en los tambores de aceite. Para partes con formas complejas, el inserto (en lugar de ser cilíndrico) puede tener otra forma a fin de aplicar mayores presiones en regiones críticas de la parte. Las ventajas de utilizar insertos de poliuretano es que son muy resistentes a la abrasión, al desgaste y a los lubricantes, además de que no dañan el acabado superficial de la parte que se está formando.

Dados o matrices segmentadas. Estas matrices consisten en segmentos individuales que se colocan dentro de la parte a formar y se expanden de manera mecánica, por lo general en la dirección radial. Después se retraen para retirar la parte formada. Las matrices segmentadas son relativamente económicas y se pueden utilizar para grandes lotes de producción.

EJEMPLO 16.3 Manufactura de fuelles

Los fuelles se manufacturan mediante un proceso de abombado, como se muestra en la figura 16.29. Una vez que el tubo se abomba en diferentes puntos equidistantes, se comprime axialmente para colapsar de manera uniforme las regiones abombadas, formando así el fuelle. El material del tubo debe ser capaz de soportar las grandes deformaciones implícitas en el proceso de colapsado sin desarrollar grietas.

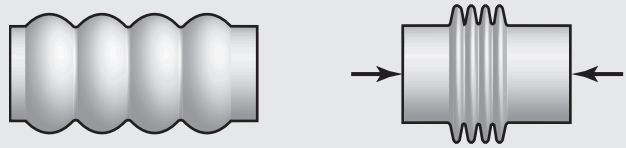


FIGURA 16.29 Pasos en la manufactura de fuelles.

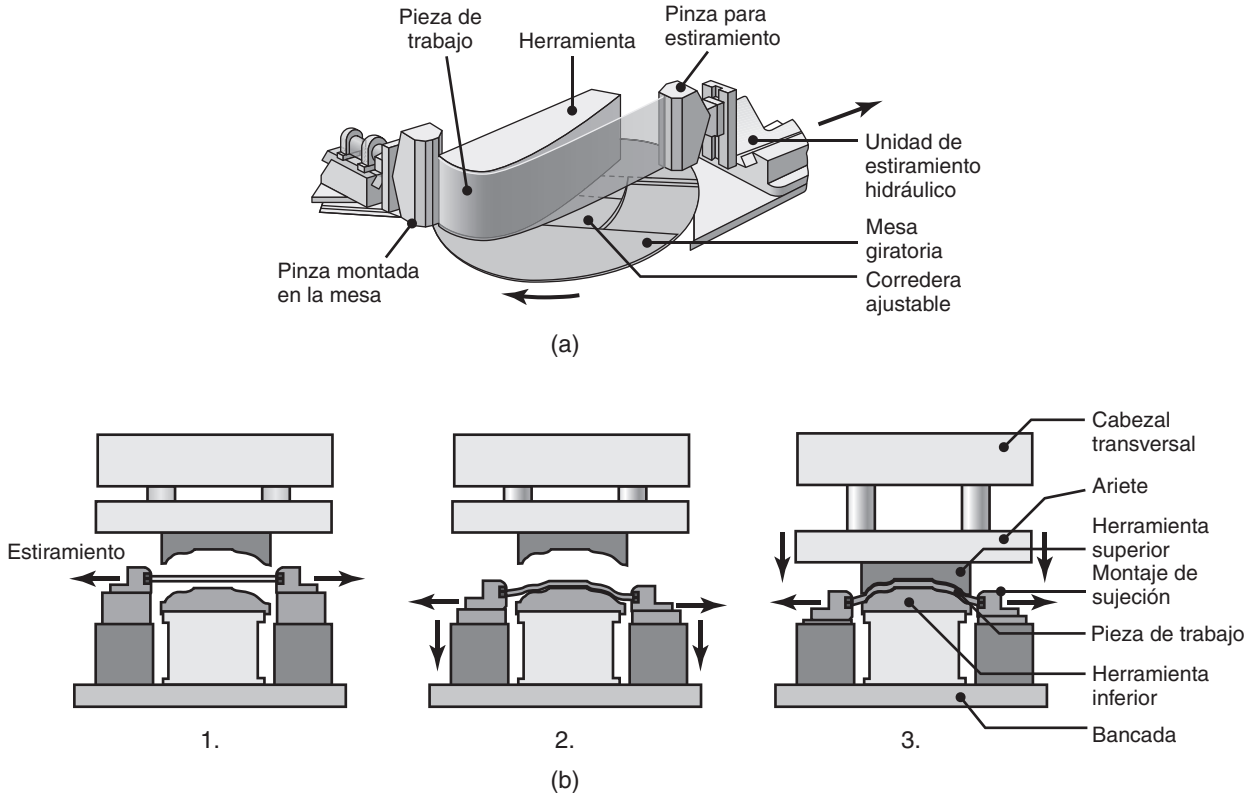


FIGURA 16.30 Esquema de un proceso de formado por estiramiento. Las cubiertas de aluminio para aeronaves se pueden fabricar mediante este método. *Fuente:* Cortesía de Ciryl Bath Co.

Conformado por estiramiento. En el *conformado por estiramiento*, la hoja metálica se sujeta por sus extremos y después se estira sobre una matriz macho (*bloque o punzón formador*). Ésta se mueve hacia arriba, hacia abajo o lateralmente, lo que depende del diseño particular de la máquina (fig. 16.30). El conformado por estiramiento se utiliza en la fabricación de tableros para cubiertas de alas de aviones, fuselajes y cascos para embarcaciones. Por ejemplo, las cubiertas de aluminio para los aviones Boeing 767 y 757 se fabrican mediante conformado por estiramiento, con una fuerza de tensión de 9 MN (2 millones de libras). Las hojas rectangulares son de 12 m $\times$ 2.5 m $\times$ 6.4 mm (40 pies $\times$ 8.3 pies $\times$ 0.25 pulgadas). Aunque este proceso suele utilizarse para la producción de bajos volúmenes, es versátil y económico, en particular para la industria aeroespacial.

En la mayoría de las operaciones, la pieza en bruto es una hoja rectangular sujeta en sus extremos más angostos y estirada a lo largo, permitiendo así que el material se contraiga a lo ancho. El control de la cantidad de estiramiento es importante para evitar el desgarre. La conformación por estirado no puede producir partes con contornos afilados o con esquinas reentrantes (depresiones sobre la superficie de la matriz). Se pueden utilizar diversos equipos accesorios junto con el conformado por estiramiento, incluyendo formado adicional con matrices macho y hembra mientras la parte se encuentra bajo tensión. Es común que las matrices para conformado por estiramiento se fabriquen con aleaciones de zinc, acero, plásticos o madera. La mayoría de las aplicaciones requiere muy poca, o ninguna, lubricación.

16.7 Embutido profundo

Muchas partes fabricadas con hojas metálicas son cilíndricas o tienen forma de caja, como recipientes y sartenes, todo tipo de contenedores para alimentos y bebidas (fig.

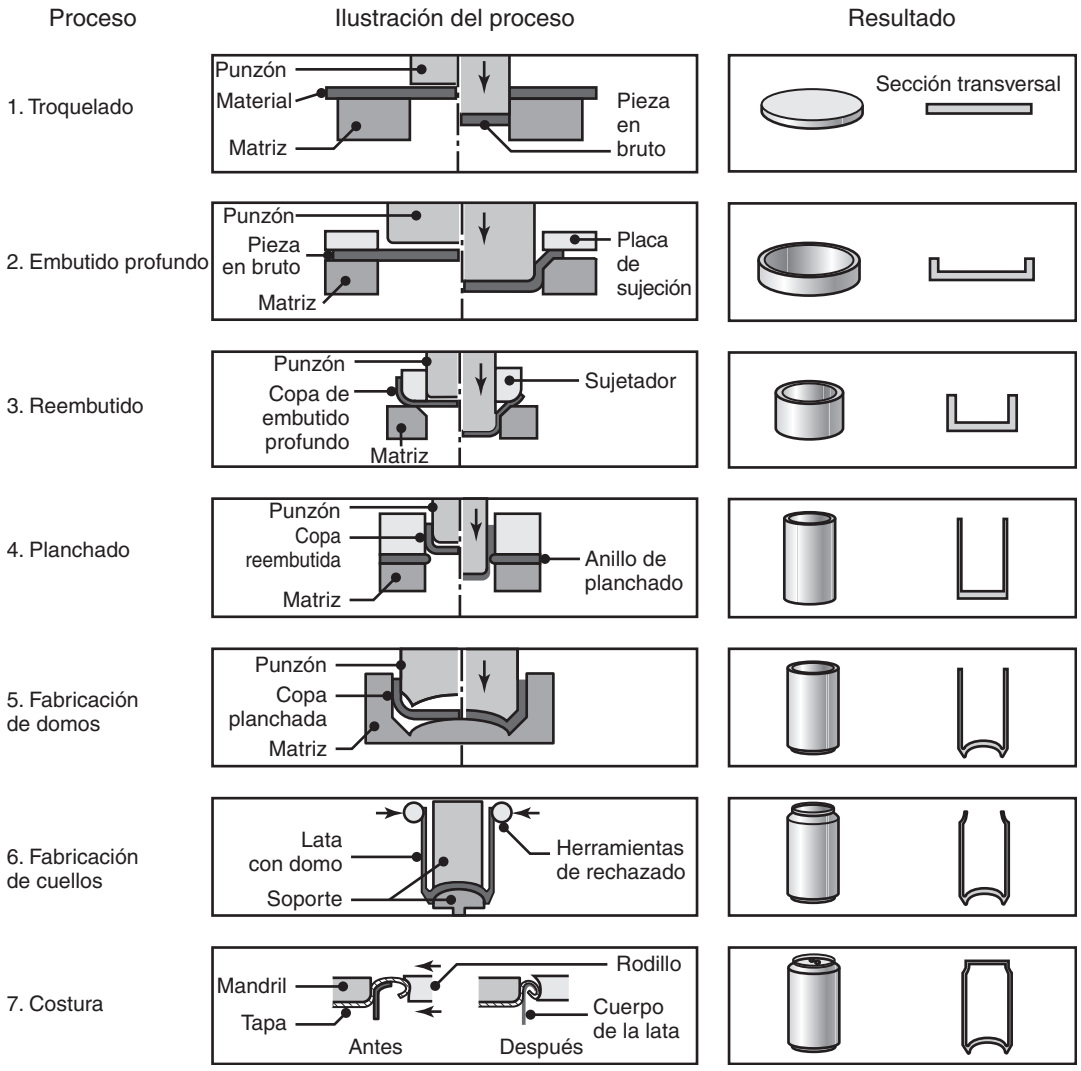


FIGURA 16.31 Procesos de formado metálico comprendidos en la manufactura de una lata de aluminio de dos piezas para bebidas.

16.31), fregaderos de acero inoxidable para cocinas, recipientes y tanques de combustible. Por lo común, dichas partes se fabrican mediante un proceso en el que un punzón impulsa una lámina metálica bruta dentro de la cavidad de una matriz (fig. 16.32a). Aunque al proceso generalmente se le llama *embutido profundo* por su capacidad para producir partes profundas, también se utiliza para fabricar partes poco profundas o que tienen una profundidad moderada.

En el proceso básico de embutido profundo, se coloca una pieza en bruto de hoja metálica redonda sobre la abertura de una matriz circular y se mantiene en su lugar con un **placa de sujeción** o *anillo de sujeción* (fig. 16.32b). El punzón baja y empuja la lámina dentro de la cavidad de la matriz, formando una copa o depresión. Las variables importantes en el embutido profundo son las propiedades de la hoja metálica, la relación del diámetro de la pieza en bruto (D_o); el diámetro del punzón (D_p); la holgura (c) entre el punzón y la matriz; el radio del punzón (R_p); la relación de la esquina de la matriz o radio de transición (R_d); la fuerza de la placa de sujeción; y la fricción y la lubricación entre todas las superficies de contacto.

Durante la operación de embutido profundo, el movimiento de la pieza en bruto dentro de la cavidad de la matriz induce esfuerzos circunferenciales de compresión en el re-

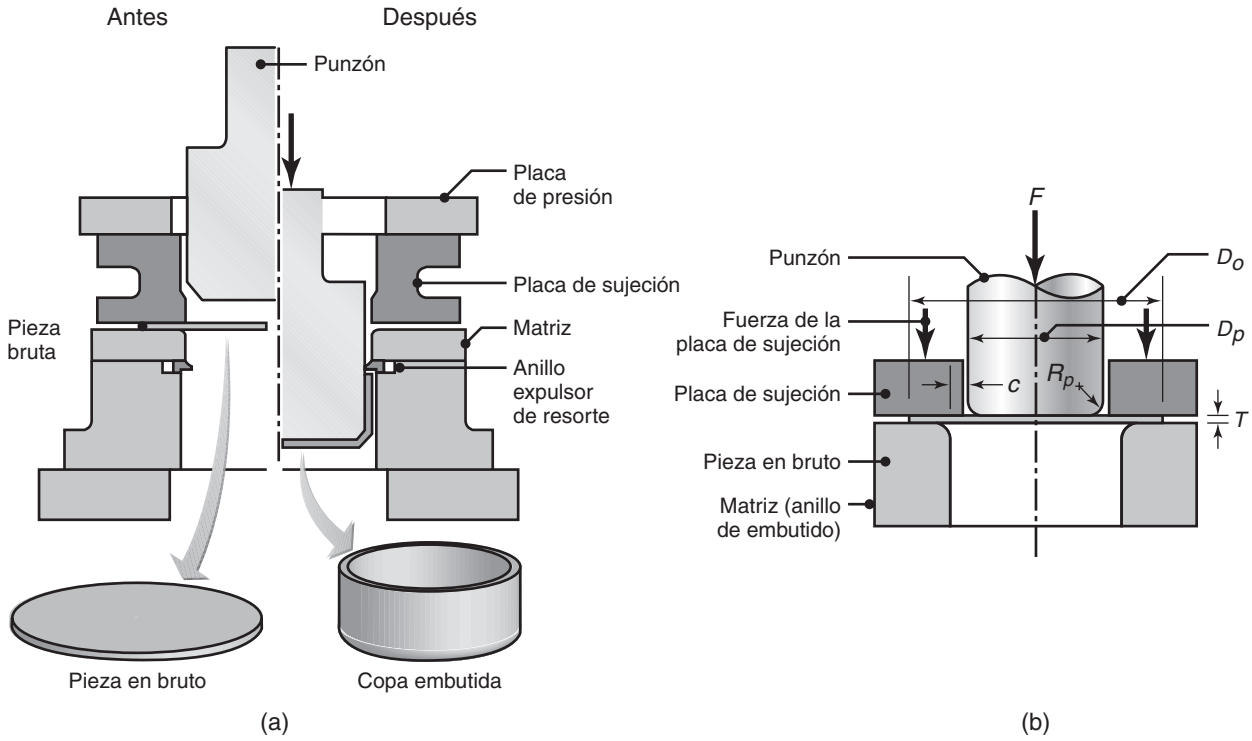


FIGURA 16.32 *(a)* Esquema del proceso de embutido profundo en una pieza en bruto de lámina metálica circular. El anillo expulsor facilita la expulsión de la copa formada del punzón. *(b)* Variables de proceso en el embutido profundo. Salvo por la fuerza de punzonado (F), todos los parámetros indicados en la figura son variables independientes.

borde o ceja, que tienden a hacer que éste se *pliegue* durante el embutido. Este fenómeno se puede visualizar simplemente intentando forzar una pieza circular de papel dentro de una cavidad redonda, como un vaso para beber. Las arrugas pueden reducirse o eliminarse si la placa de sujeción se mantiene bajo el efecto de cierta fuerza. Para mejorar el desempeño, se puede controlar la magnitud de dicha fuerza en función del recorrido del punzón.

Debido a las múltiples variables involucradas, es difícil calcular directamente la *fuerza de punzonado* (F). Sin embargo, como se ha demostrado, la *fuerza máxima de punzonado* ($F_{máx}$) se puede estimar mediante la fórmula:

$$F_{máx} = \pi D_p T(\text{UTS})[(D_o/D_p) - 0.7] \tag{16.9}$$

donde la nomenclatura es la misma que en la figura 16.32b. Es evidente que la fuerza aumenta al incrementarse el diámetro, el espesor, la resistencia y la relación (D_o/D_p) de la pieza en bruto. La pared de la copa se somete principalmente a un esfuerzo longitudinal (vertical) de tensión por la fuerza del punzonado. La elongación debida a este esfuerzo hace que la pared de la copa se vuelva más delgada, y si es excesiva, puede ocasionar que la copa se *desgarre*.

16.7.1 Capacidad de embutido profundo

En una operación de embutido profundo, la falla suele ocurrir debido al *adelgazamiento* de la pared de la copa bajo los altos esfuerzos longitudinales de tensión. Si seguimos el movimiento del material conforme éste fluye dentro de la cavidad de la matriz, se puede ver que la hoja metálica *(a)* debe ser capaz de soportar una reducción de la anchura por la reducción del diámetro, y *(b)* también debe resistir el adelgazamiento por los esfuerzos longitudinales de tensión en la pared de la copa. En general, la capacidad de embutido profundo se expresa mediante la **relación límite de embutido** (LDR, por sus siglas en inglés), como:

$$\text{LDR} = \frac{\text{Diámetro máximo de la pieza bruta}}{\text{Diámetro del punzón}} = \frac{D_o}{D_p} \tag{16.10}$$

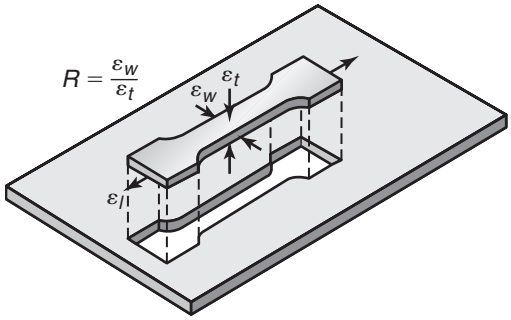


FIGURA 16.33 Deformaciones en una probeta para ensayo de tensión retirado de una lámina metálica. Estas deformaciones se utilizan para determinar la anisotropía normal y planar de la hoja metálica.

Se ha encontrado que si una hoja metálica se puede embutir profundamente con éxito para producir una parte redonda con forma de copa, es función de la **anisotropía normal** (R) de la hoja metálica (también llamada *anisotropía plástica*). La anisotropía normal se define en términos de las deformaciones reales que sufre el espécimen bajo tensión (fig. 16.33):

$$R = \frac{\text{Deformación del ancho}}{\text{Deformación del espesor}} = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \tag{16.11}$$

Si se desea determinar la magnitud de R, primero se prepara una probeta para ensayo de tensión y se somete a una elongación de 15% a 20%. Las deformaciones reales que sufre la hoja se calculan como se vio en la sección 2.2. Debido a que las hojas laminadas en frío por lo general tienen anisotropía en su dirección *planar*, el valor R de un espécimen cortado de una hoja laminada depende de su orientación con respecto a la dirección de laminación de la hoja. Para esto, se calcula un valor promedio (R_{prom}) a partir de la ecuación:

$$R_{\text{prom}} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \tag{16.12}$$

donde los subíndices son los ángulos con respecto a la dirección de laminado de la hoja. En la tabla 16.4 se dan algunos valores comunes de R_{prom}.

En la figura 16.34 se muestra la relación determinada de manera experimental entre R_{prom} y la relación límite de embutido. Se ha establecido que ninguna otra propiedad mecánica de la hoja metálica muestra alguna relación consistente con la LDR como lo hace R_{prom}. Entonces, si se utilizan los resultados de un simple ensayo de tensión y se ob-

TABLA 16.4

Intervalos característicos de anisotropía normal promedio, R_{prom} para diferentes hojas (láminas) metálicas	
Aleaciones de zinc	0.4–0.6
Acero laminado en caliente	0.8–1.0
Acero efervescente, laminado en frío	1.0–1.4
Acero calmado en aluminio, laminado en frío	1.4–1.8
Aleaciones de aluminio	0.6–0.8
Cobre y latón	0.6–0.9
Aleaciones de titanio (α)	3.0–5.0
Aceros inoxidables	0.9–1.2
Aceros de baja aleación, de alta resistencia	0.9–1.2

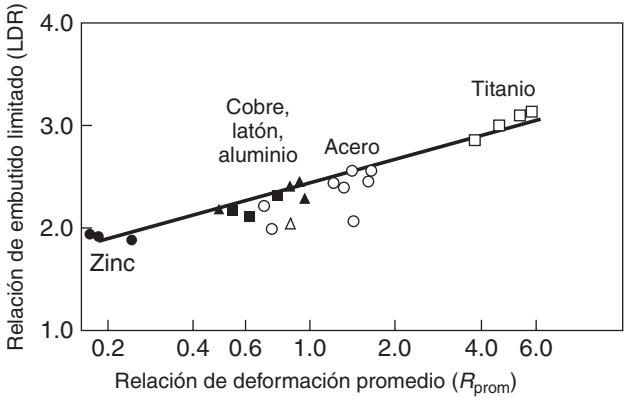


FIGURA 16.34 Relación entre la anisotropía normal promedio y la relación límite de embutido para diferentes metales. *Fuente:* M. Atkinson.

tiene la anisotropía normal de la hoja metálica, puede determinarse la relación límite de embutido.

Borde ondulado. En el embutido, las orillas de las copas pueden ondularse, fenómeno al que se llama *borde ondulado u orejas (*fig. 16.35). Los bordes ondulados son objetables en las copas embutidas porque tienen que recortarse, ya que no cumplen algún propósito útil e interfieren en el procesamiento posterior de la copa, lo que produce desechos. La **anisotropía planar** de la hoja causa el borde ondulado, y el número de ondulaciones producidas u orejas puede ser dos, cuatro u ocho, dependiendo de la historia de procesamiento y la microestructura de la hoja. Si ésta es más fuerte en la dirección de laminación que en la dirección transversal y la resistencia varía de manera uniforme con respecto a la orientación, entonces se formarán dos ondulaciones. Si la hoja tiene resistencia elevada en diferentes orientaciones, entonces se formarán más ondulaciones.

La anisotropía planar de la hoja se denota mediante ΔR. Ésta se define en términos de valores R direccionales a partir de la ecuación:

$$\Delta R = \frac{R_0 - 2R_{45} + R_{90}}{2} \tag{16.13}$$

Cuando $\Delta R = 0$, no se forman ondulaciones. La altura de las ondulaciones aumenta cuando se incrementa ΔR.

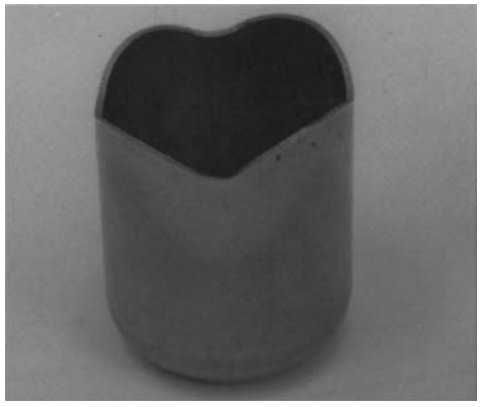


FIGURA 16.35 Ondulación en una copa embutida de acero originada por la anisotropía planar de la hoja (lámina) metálica.

Es evidente que la capacidad de embutido profundo se refuerza mediante un valor alto de R_{prom} y un valor bajo de ΔR. Sin embargo, las hojas metálicas con R_{prom} elevado también suelen tener valores elevados de ΔR. Se han desarrollado continuamente texturas de hojas metálicas para mejorar la capacidad de embutido por el control del tipo de elementos de aleación en el material, así como por diferentes parámetros de procesamiento durante la laminación de la hoja.

16.7.2 Prácticas de embutido profundo

Se han establecido algunas guías para lograr una práctica exitosa del embutido profundo. Por lo general, la presión de la placa de sujeción se elige entre 0.7% y 1% de la suma de la resistencia a la fluencia y la resistencia máxima a la tensión de la hoja metálica. Una fuerza demasiado elevada de la placa de sujeción aumenta la fuerza de punzonado y hace que se desgarre la pared de la copa. En cambio, si la fuerza de la placa de sujeción es muy baja, puede arrugarse.

Las holguras son usualmente de 7% a 14% mayores que el espesor de la hoja; si son demasiado pequeñas, el punzón puede perforar o cizallar la pieza en bruto. Los radios de las esquinas del punzón y de la matriz también son parámetros importantes. Si son muy pequeños, pueden provocar la fractura de las esquinas; si son muy grandes, la copa se puede arrugar, fenómeno al que se llama *fruncido*.

Con frecuencia se necesitan **perlas de embutido** (fig. 16.36) para controlar el flujo de la pieza en bruto dentro de la cavidad de la matriz. Las perlas restringen el libre flujo de la hoja metálica, doblándola y desdoblándola durante el ciclo de embutido; de ahí que aumenten la fuerza requerida para jalar la hoja dentro de la cavidad del molde. Para demostrar este fenómeno basta con colocar una cinta de papel o una hoja de aluminio entre los dedos en un arreglo similar al mostrado en la figura 13.36a. Obsérvese que ahora se necesita cierta fuerza para jalar la cinta entre los dedos. Las perlas de embutido también ayudan a reducir las fuerzas requeridas en la placa de sujeción, pues la hoja con perlas tiene mayor rigidez (debido a su mayor momento de inercia) y, de ahí, una menor tendencia al arrugado. Los diámetros de las perlas de embutido pueden variar de 13 mm a 20 mm (0.50 a 0.75 pulgada), siendo aplicable este último a los estampados grandes, como las piezas automotrices.

Las perlas de embutido también son útiles para embutir partes con *forma de caja* y *asimétricas*, ya que pueden presentar dificultades significativas en la práctica (fig. 16.36b

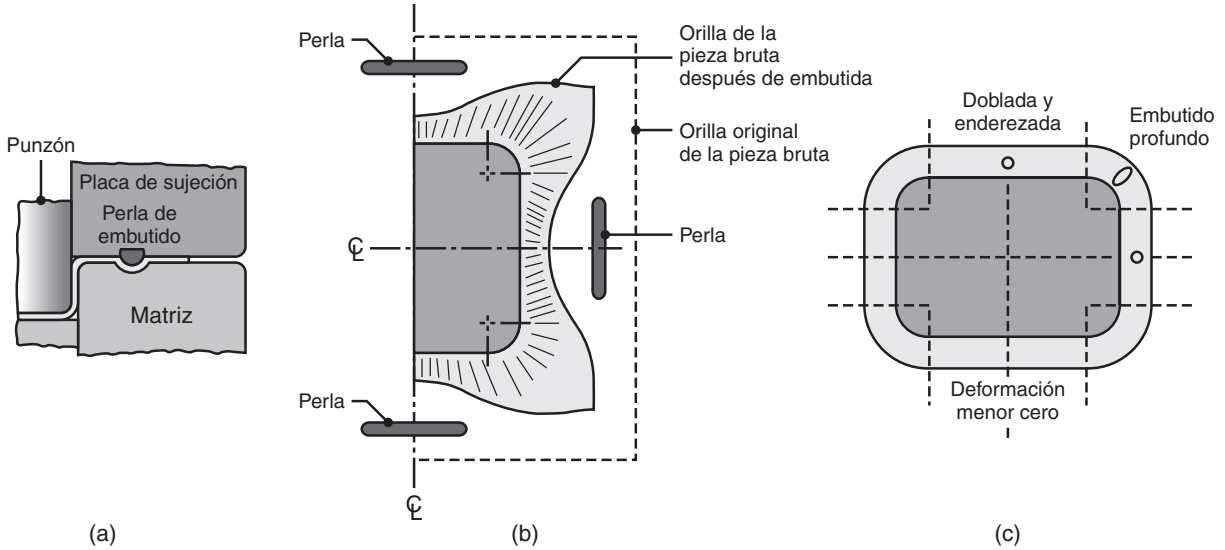


FIGURA 16.36 *(a)* Esquema de una perla de embutido. *(b)* Flujo del metal durante el embutido de una parte con forma de caja cuando se utilizan perlas para controlar el movimiento del material. *(c)* Deformación de las rejillas circulares en el reborde en el embutido profundo.

y c). Obsérvese en la figura 16.36c, por ejemplo, que diferentes regiones de la parte sufren diferentes tipos de deformación durante el embutido. (Recuérdese también el principio fundamental de que el material fluye hacia la menor resistencia).

Para evitar el desgarre de la hoja metálica durante el formado, con frecuencia es necesario incorporar los siguientes factores:

- El diseño y la ubicación apropiada de las perlas de embutido.
- Radios grandes de la matriz.
- Lubricación efectiva.
- Tamaño y forma apropiados de la pieza en bruto.
- El corte de todas las esquinas de las piezas en bruto cuadradas o rectangulares a 45° para reducir los esfuerzos de tensión desarrollados durante el embutido.
- El uso de piezas en bruto sin defectos internos o externos.

Planchado. En la figura 16.32 se observa que si la holgura entre el punzón y la matriz es suficientemente grande, la copa embutida tendrá paredes más gruesas en la orilla que en la base. La razón es que la orilla de la copa consiste en material del diámetro exterior de la pieza en bruto, de ahí que el diámetro se haya reducido más (y se haya vuelto más grueso) que el material que constituye el resto de la pared de la copa. En consecuencia, la copa desarrollará un espesor no uniforme de pared. El espesor de la pared de la copa se puede controlar mediante un proceso llamado *planchado*, en el que una copa embutida se empuja a través de uno o más anillos planchadores (ver fig. 16.31). La holgura entre los anillos de planchado y el punzón es menor que el espesor de pared de la copa, por lo que después del planchado ésta tiene un espesor de pared constante (e igual a la holgura, excepto por alguna pequeña recuperación elástica). Por ejemplo, las latas de aluminio para bebidas suelen pasar por entre dos y tres operaciones de planchado en una carrera, en la que la copa embutida se oprime a través de un juego de anillos planchadores.

Reembutido. Los contenedores o recipientes cuyo embutido es difícil de realizar en una sola operación, generalmente pasan por un reembutido (ver fig. 16.31). Debido a la constancia volumétrica del metal, la copa o depresión se vuelve más larga conforme se reembute a diámetros menores. En el *reembutido inverso*, la copa se coloca bocabajo sobre la matriz y después se somete a embutido en la dirección opuesta a su configuración original.

Embutido sin placa de sujeción. El embutido profundo se puede efectuar de manera satisfactoria sin una placa de sujeción, en la inteligencia de que la hoja metálica es lo suficientemente gruesa para evitar pliegues. Un intervalo característico de diámetros es:

$$D_o - D_p < 5T \tag{16.14}$$

donde T es el espesor de la hoja. Para esta operación, las matrices se contornean especialmente.

Repujado o realzado. Ésta es una operación que consiste en embutidos poco profundos o moderados, realizados con matrices coincidentes, macho y hembra, poco profundas (fig. 16.37). El repujado se utiliza sobre todo para rigidizar piezas de hojas metálicas pla-

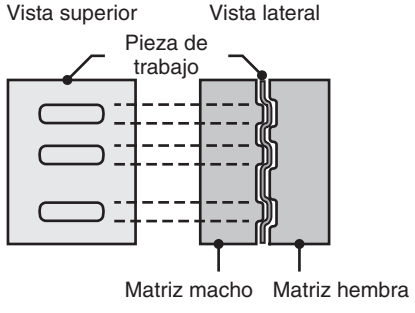


FIGURA 16.37 Operación de repujado con dos matrices. Por medio de este proceso se pueden fabricar letras, números y diseños en partes producidas con láminas metálicas.

nas y con propósitos de decoración, numeración y leyendas, como en las tapas de aluminio de las latas para bebidas.

Herramental y equipo para embutido. Los materiales más comunes para las herramientas y matrices empleados para el embutido profundo son los aceros herramienta y los hierros fundidos e incluyen matrices producidas de hierro dúctil hechos por el proceso de espuma perdida. Otros materiales tales como los carburos y los plásticos también pueden ser usados por dicho proceso (ver tabla 5.7). Los métodos para la manufactura de las matrices son descritos con detalle en la sección 14.7. Debido a la forma generalmente asimétrica de los componentes del punzón y de la matriz (como los utilizados para fabricar latas y contenedores cilíndricos), pueden manufacturarse en equipos como los de maquinado de alta velocidad en tornos controlados por computadora.

Por lo común, el equipo para el embutido profundo es una *prensa hidráulica de doble acción* o *una prensa mecánica*; se favorece generalmente a esta última por su mayor velocidad de operación. En la primera, el punzón y la placa de sujeción se controlan de manera independiente. Las velocidades del punzón suelen variar entre 0.1 y 0.3 m/s (20 y 60 pies/min).

EJEMPLO 16.4 Manufactura de latas para alimentos y bebidas

La manufactura de latas es una industria competitiva a nivel mundial, con casi 100 mil millones de latas para bebidas y 30 mil millones para alimentos producidas cada año, sólo en Estados Unidos. Estos contenedores son fuertes y ligeros (comúnmente tienen un peso inferior a 0.5 onza) y se encuentran bajo una presión interna de 90 psi, de manera confiable y sin fuga del contenido. Existen requisitos estrictos para el acabado superficial de la lata, ya que se prefieren las que tienen decorados relucientes y brillantes sobre los contenedores de apariencia opaca. Considerando todas estas características, las latas metálicas son muy económicas. Sus fabricantes cobran unos 40 dólares por 1000 latas, o 4 centavos de dólar por cada una. Por lo tanto, el costo de las latas vacías en un paquete de seis es de 24 centavos de dólar, lo que también indica la importancia del reciclado de las latas.

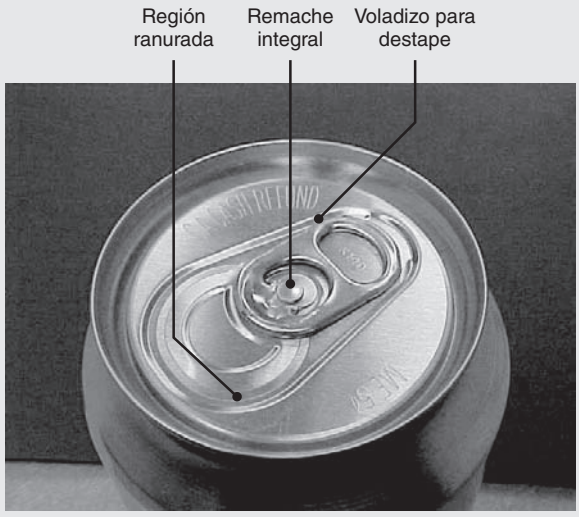
Las latas para alimentos y bebidas se pueden producir de muchas maneras; las más comunes son las de dos y tres piezas. Las latas de dos piezas consisten en el cuerpo y la tapa (fig. 16.38a). El cuerpo se fabrica de una pieza, que se ha embutido y planchado, de ahí la práctica vigente en la industria de referirse a este estilo como latas D&I (embutidas y planchadas, por sus siglas en inglés). Las latas de tres piezas se producen sujetando una tapa y un fondo a un cuerpo cilíndrico de hoja metálica.

Los cuerpos embutidos y planchados se producen a partir de numerosas aleaciones, pero las más comunes son el aluminio 3004-H19 (ver sección 6.2) y el acero



(a)

FIGURA 16.38 *(a)* Latas de aluminio para bebidas. Obsérvese el excelente acabado superficial.



(b)

FIGURA 16.38 (*Continuación*) *(b)* Detalle de la tapa de la lata mostrando el remache integral y las orillas ranuradas de la tapa.

A623 ASTM, con recubrimiento electrolítico de estaño. Las tapas de aluminio se utilizan para las latas tanto de acero como de aluminio y se producen de aluminio 5182-H19 o 5182-H48. La tapa tiene un conjunto demandante de requisitos de diseño, como se aprecia al revisar la figura 16.38b. No sólo debe cortarse con facilidad (ranuras curvas alrededor de la pestaña), sino que incluye un remache que se coloca en la tapa para mantener la pestaña en su lugar. La principal característica de la aleación de aluminio 5182 es que posee suficiente formabilidad para permitir el formado del remache integral sin agrietarse y tiene la capacidad de cortarse. Básicamente, las tapas se estampan a partir de una hoja de aluminio 5182, son desprendibles y se coloca un sello de plástico alrededor de su periferia. Esta capa de polímero sella el contenido después de que se cose la tapa al cuerpo de la lata, como se describe a continuación.

En la figura 16.31 se muestra el método tradicional para manufacturar los cuerpos de las latas. El proceso se inicia con piezas en bruto de 5.5 pulgadas de diámetro producidas a partir de material en hojas laminadas. Estas piezas en bruto: *(a)* se embuten profundamente a un diámetro de casi 3.5 pulgadas, *(b)* se reembuten al diámetro final de 2.6 pulgadas, *(c)* se planchan mediante dos o tres anillos planchadores en un paso, y *(d)* se les forma el domo del fondo. Las operaciones de embutido profundo y de planchado se realizan en un tipo especial de prensa que comúnmente produce latas a velocidades de más de 400 recorridos por minuto. Después de estas operaciones se efectúan muchos procesos adicionales.

El cuello del cuerpo de la lata se realiza mediante rechazado (sección 16.9), o mediante la formación de cuello por un dado o matriz (una operación de formado similar a la mostrada en la fig. 15.19a, en la que una parte tubular de pared delgada se oprime dentro de la matriz), y después se forma la orilla por rechazado. La razón del cuello en la parte superior de la lata es que el aluminio 5182 utilizado para la tapa es relativamente costoso. Entonces, al formar el cono en la parte superior de la lata, se requiere un volumen menor de material, reduciendo así el costo. De igual manera, cabe hacer notar que con frecuencia el costo de una lata se calcula hasta en millonésimas de dólar, de ahí que esta competitiva industria explote cualquier característica de diseño que reduzca su costo.

Fuente: Cortesía de J. E. Wang, Texas A&M University.

16.8 Formado con hule

En los procesos descritos en las secciones precedentes se ha observado que las matrices suelen fabricarse con materiales sólidos, como aceros y carburos. Sin embargo, en el *formado con hule* (también conocido como *proceso Guerin*), una de las matrices o dados de un juego se elabora con material flexible, por lo común una membrana de poliuretano. Los poliuretanos se utilizan ampliamente debido a estas cualidades:

- Resistencia a la abrasión.
- Resistencia al corte o desgarramiento por rebabas u otras orillas afiladas en la hoja metálica.
- Larga resistencia a la fatiga.

En el doblado y repujado (realzado) de las hojas metálicas mediante este proceso, la matriz hembra se reemplaza con una placa de hule (fig. 16.39). Obsérvese que la su-

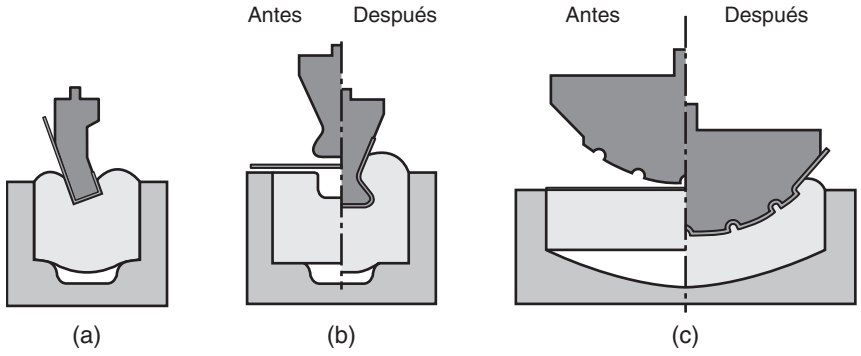


FIGURA 16.39 Ejemplos de doblado y repujado de hojas metálicas con un punzón metálico y con un soporte flexible que sirve como matriz hembra. *Fuente:* Cortesía de Polyurethane Products Corporation.

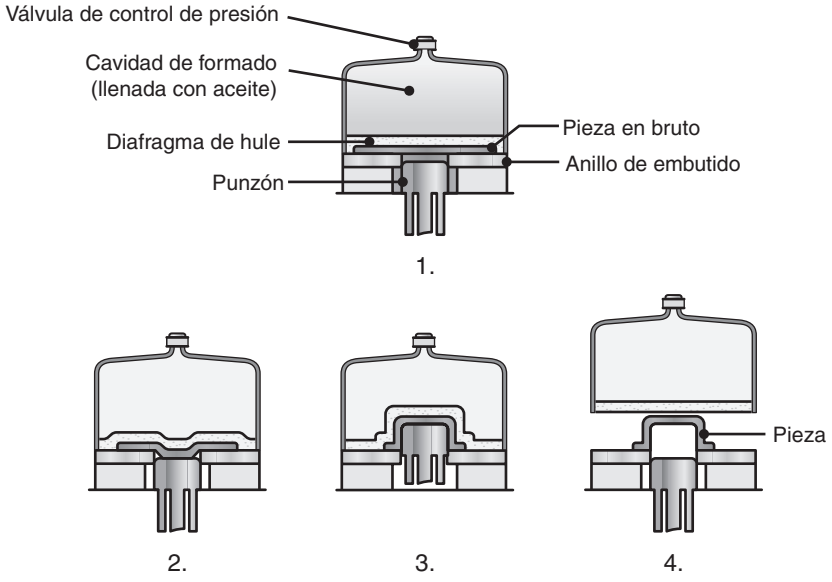


FIGURA 16.40 Proceso de hidroformado (o formado con fluidos). Obsérvese que en contraste con el proceso ordinario de embutido profundo, la presión en el domo fuerza las paredes de la copa contra el punzón. La copa viaja con el punzón; de esta manera, se mejora la capacidad de embutido profundo.

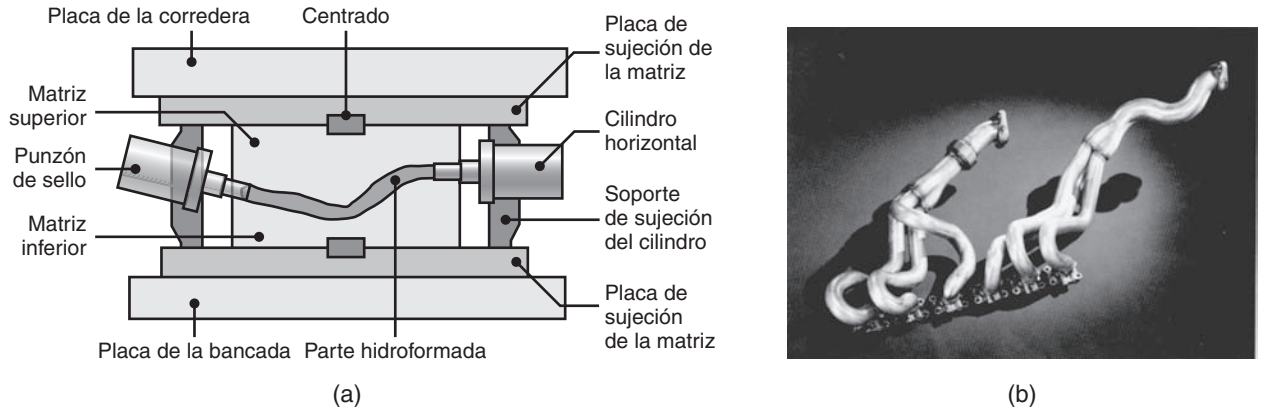


FIGURA 16.41 *(a)* Esquema del proceso de hidroformado de tubos. *(b)* Ejemplo de partes hidroformadas en tubos. Mediante el hidroformado en tubos se producen múltiples de escapes automovilísticos y componentes estructurales, estructuras de bicicletas, y accesorios hidráulicos y neumáticos. *Fuente:* Cortesía de Schuler GmBH.

perficie exterior de la hoja se protege del daño o de las rayaduras, ya que no entra en contacto con una superficie metálica dura durante el formado. Las presiones características en el formado con hule son del orden de 10 MPa (1500 psi).

En el **hidroformado**, o *proceso de formado fluido* (fig. 16.40), la presión sobre la membrana de hule se controla a lo largo del ciclo de formado con una presión máxima de hasta 100 MPa (15,000 psi). Este procedimiento permite un control muy estrecho de la parte durante el formado y evita los pliegues y el desgarramiento. Se obtienen embutidos más profundos que en el embutido profundo convencional, ya que la presión alrededor de la membrana de hule fuerza la copa contra el punzón. El resultado es que aumenta la fricción en la interfaz punzón-copa, que después reduce los esfuerzos de tensión longitudinal en la copa y, de esta forma, retrasa la fractura.

El control de las condiciones de la fricción en el formado con hule, así como en otras operaciones de formado de hojas, puede ser un factor crítico para fabricar partes de manera satisfactoria. También es importante el uso de lubricantes apropiados y sus métodos de aplicación. En el *hidroformado de tubos* (fig. 16.41), el tubo metálico se forma en una matriz y se presuriza internamente mediante un fluido. Este proceso, que ahora se aplica más, puede formar tubos simples y diversas formas huecas intrincadas (fig. 16.41b). Las partes fabricadas por medio de este proceso incluyen los componentes de los escapes de automóvil y los componentes estructurales tubulares.

Si se seleccionan apropiadamente, los procesos de formado con hule y de hidroformado tienen las siguientes ventajas: *(a)* capacidad de obtener formas complejas, *(b)* formación de partes con hojas laminadas de diversos materiales y recubrimientos, *(c)* flexibilidad y facilidad de operación, *(d)* evitación del daño a las superficies de la hoja, *(e)* bajo desgaste de la matriz o dado, y *(f)* bajo costo de herramental.

16.9 Rechazado

El *rechazado* es un proceso que comprende el formado de partes asimétricas sobre un mandril mediante el uso de diversas herramientas y rodillos, proceso que es semejante al de formar arcilla en un torno de alfarero.

Rechazado convencional. En el *rechazado convencional*, una pieza en bruto circular fabricada con una hoja metálica plana o preformada se coloca y se mantiene contra un mandril y se gira, mientras que una herramienta rígida deforma y da forma al material sobre el mandril (fig. 16.42a). La herramienta puede accionarse manualmente o (para mayores capacidades de producción) mediante mecanismos controlados por computadora.

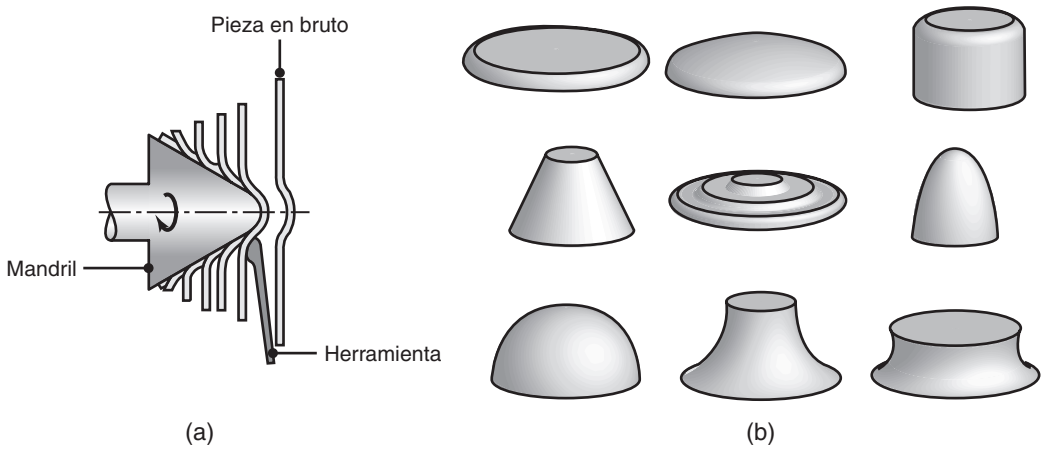


FIGURA 16.42 *(a)* Esquema del proceso convencional de rechazado. *(b)* Tipos de partes rechazadas convencionalmente. Todas las partes son asimétricas.

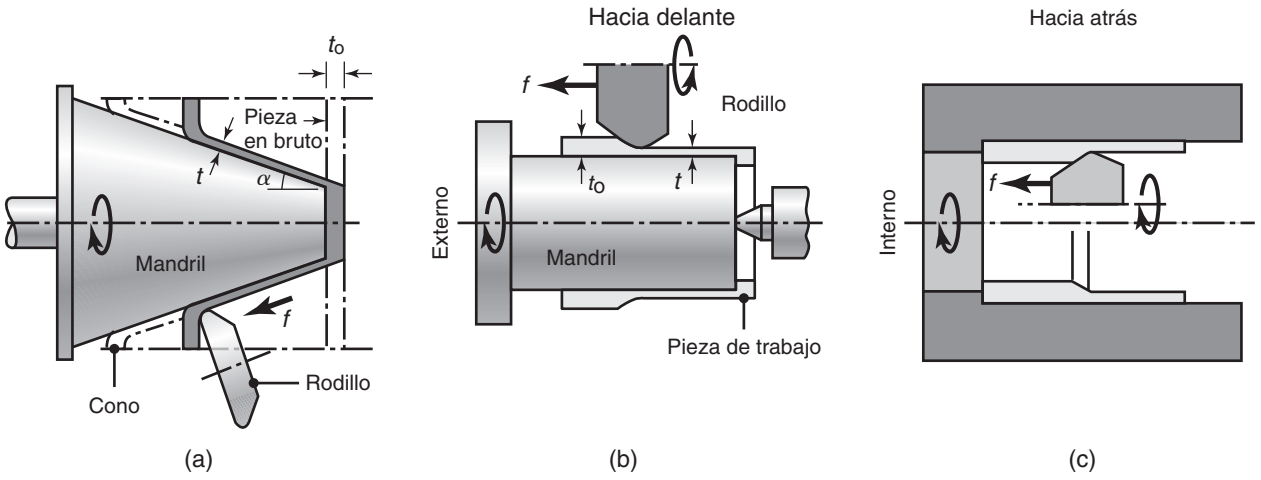


FIGURA 16.43 *(a)* Esquema del proceso de rechazado cortante para fabricar partes cónicas. Al mandril se le puede dar forma para rechazar partes curvilíneas. *(b)* y *(c)* Esquemas del proceso de rechazado de tubos.

Por lo general, el proceso comprende una secuencia de pases y requiere habilidad considerable. El rechazado convencional es particularmente adecuado para formas cónicas y curvilíneas (fig. 16.42b), que de otra manera sería difícil o antieconómico producir. Los diámetros de la parte pueden llegar hasta 6 m (20 pies). Aunque la mayoría de las operaciones de rechazado se realizan a temperatura ambiente, las partes gruesas y los metales con altas resistencias o baja ductilidad exigen rechazado a temperaturas elevadas.

Rechazado cortante. También conocido como *rechazado de potencia o motorizado*, *torneado con flujo*, *hidrorrechazado*, y *forjado giratorio o de rotación*, esta operación produce formas cónicas asimétricas o curvilíneas reduciendo el espesor de la hoja y manteniendo su diámetro máximo (de la pieza en bruto) (fig. 16.43a). Se puede utilizar un solo rodillo de formado, pero son preferibles dos para equilibrar las fuerzas que actúan sobre el mandril. Las partes características producidas son cubiertas para motores de cohetes y conos de nariz para misiles. Mediante el rechazado cortante se pueden formar partes hasta de 3 m (10 pies) de diámetro. En esta operación se desperdicia poco material y se puede terminar en relativamente poco tiempo, algunas veces en unos cuantos segundos.

Es posible rechazar diversas formas con herramental bastante simple, que por lo regular está fabricado con acero para herramientas.

En general, la *capacidad de rechazado* de un metal se define como la máxima reducción de espesor a la que se puede someter una pieza en el proceso de rechazado sin que ésta se fracture. Se ha encontrado que la capacidad de rechazado está relacionada con la reducción de área del material en el ensayo de tensión, al igual que su capacidad de doblado (ver fig. 16.18). Por lo tanto, si un metal tiene una reducción de área de 50% o mayor, su espesor se puede reducir hasta 80% en un solo pase de rechazado. Para metales con baja ductilidad, la operación se efectúa a temperaturas elevadas, calentando la pieza en bruto en un horno y transfiriéndola rápidamente al mandril.

Rechazado de tubos. En el *rechazado de tubos* se reduce, o se le da forma, al espesor de piezas en bruto cilíndricas, rechazándolas sobre un mandril redondo, sólido, mediante rodillos (fig. 16.43). La reducción del espesor de pared produce un tubo más largo. Esta operación se puede realizar externa o internamente, por lo que se utilizarían diversos perfiles externos e internos a partir de piezas cilíndricas en bruto con espesor de pared constante. Las partes se pueden rechazar *en avance* o *en reversa*; esta nomenclatura es similar a la de la extrusión directa e indirecta, como se describe en la sección 15.2. La máxima reducción de espesor por pase en el rechazado de tubos está relacionada con la reducción por tensión del área del material, como en el rechazado cortante. El rechazado de tubo se puede utilizar en la fabricación de partes para motores de cohetes, de misiles y de propulsión, recipientes a presión y componentes automovilísticos, como ruedas para automóviles y camiones.

16.10 Formado superplástico

En la sección 2.2.7 se describió el comportamiento superplástico de ciertos metales y aleaciones, donde se pueden obtener elongaciones por tensión de 2000% dentro de ciertos intervalos de temperatura. Ejemplos comunes de tales materiales son las aleaciones de zinc-aluminio y de titanio, que tienen granos muy finos, por lo común menos de 10 a 15 μm (ver tabla 1.1). A las aleaciones superplásticas se les pueden dar formas complejas mediante *formado superplástico*, un proceso que emplea técnicas comunes de trabajo de los metales, así como técnicas de procesamiento con polímeros (como termoformado, formado por vacío y moldeo por soplado, que se describirá en el capítulo 19). El comportamiento del material en el formado superplástico es similar al de la burbuja de una goma de mascar o de un vidrio caliente, que cuando son soplados se expanden muchas veces su diámetro original antes de estallar.

Las aleaciones superplásticas, en particular Zn-22Al y Ti-6Al-4V, también se pueden formar mediante procesos de deformación volumétrica, entre ellos el forjado en matriz cerrada (o dado cerrado), acuñado, punzonado de cavidades y extrusión. Los materiales para matrices más utilizados en el formado superplástico son los aceros de baja aleación, aceros fundidos para herramientas, cerámicas, grafito y blanco de París. La selección depende de la temperatura de formado y de la resistencia de la aleación superplástica.

La muy alta ductilidad y relativamente baja resistencia de las aleaciones superplásticas ofrecen las siguientes ventajas:

- Se pueden dar formas complejas a partir de una sola pieza, con detalles finos, tolerancias cerradas y eliminación de operaciones secundarias.
- Se pueden obtener ahorros de peso y material debido a la buena formabilidad de los materiales.
- Se desarrollan pocos, o ninguno, esfuerzos residuales en las partes formadas.
- Debido a la baja resistencia del material a las temperaturas de formado, los herramentales se pueden fabricar con materiales que tengan una resistencia menor que la de los materiales en otros procesos de trabajo de los metales, de ahí que los costos de herramental sean menores.

Por otro lado, el formado superplástico tiene las siguientes limitaciones:

- El material no debe ser superplástico a las temperaturas de servicio, ya que en caso contrario la parte sufrirá cambios de forma.
- Debido a la alta sensibilidad a la velocidad de deformación de los materiales superplásticos, deben formarse a velocidades de deformación muy bajas, comúnmente entre 10^{-4} y 10^{-2}/s. Los tiempos de formado varían desde unos cuantos segundos hasta varias horas, por lo que los tiempos de ciclo son mucho más largos que los de los procesos convencionales de formado. En consecuencia, el formado superplástico es un proceso de formado por lotes.

Unión por difusión/formado superplástico. Fabricar estructuras complejas con hojas metálicas combinando la *unión por difusión* y el *formado superplástico* (SPF/DB, por sus siglas en inglés) es un proceso importante, sobre todo en la industria aeroespacial. En la figura 16.44 se muestran estructuras características producidas por este método, en las cuales las hojas planas se unen por difusión y después se les da forma (ver sección 31.7). En este proceso, primero se unen por difusión puntos seleccionados de las hojas, mientras que el resto permanece sin unir, utilizando una capa de material (*aislante*) para evitar la unión. Luego la estructura se dilata dentro de un molde, por lo común usando gas neutro presurizado (argón), tomando así la forma del molde. Estas estructuras tienen relaciones elevadas de rigidez a peso, ya que son delgadas, y por diseño poseen módulos elevados de sección. Esta importante característica hace muy atractivo este proceso en las aplicaciones en aeronaves y en la industria aeroespacial.

El proceso SPF/DB mejora la productividad al eliminar los sujetadores mecánicos y produce partes con buena precisión dimensional y bajos esfuerzos residuales. La tecnología está muy avanzada en el caso de las estructuras de titanio para aplicaciones aeroespaciales. Además de las diversas aleaciones de aluminio que se están desarrollando mediante esta técnica, otros metales para formado superplástico incluyen diversas aleaciones de níquel.

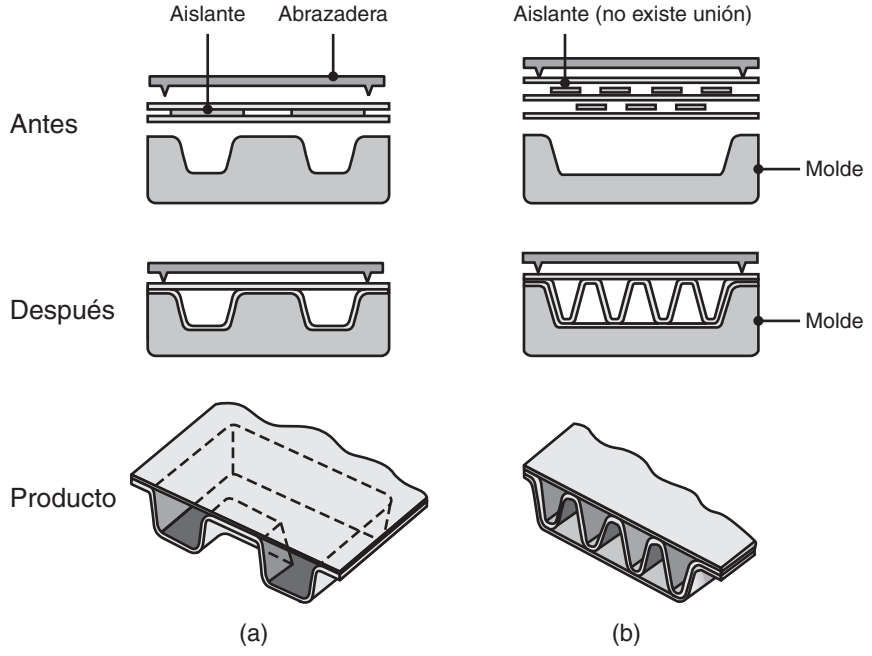


FIGURA 16.44 Tipos de estructuras fabricadas mediante unión por difusión y formado superplástico de hojas metálicas. Dichas estructuras tienen una relación elevada de rigidez a peso. *Fuente:* Cortesía de Rockwell International Corp.

EJEMPLO 16.5 Aplicaciones del formado superplástico/unión por difusión

La mayoría de las aplicaciones de SPF/DB comprenden partes de titanio para aeronaves militares, como el Tornado y el Mirage 2000. Los componentes fabricados incluyen mamparas del fuselaje, aleta delantera del borde de ataque del ala, ductos del intercambiador de calor y ductos de salida del enfriador. El fuselado de la tobera del avión de combate F-15 también se fabrica mediante este proceso. En aplicaciones civiles el Airbus A340 tiene los tableros de los sanitarios, drenajes y los paneles de mantenimiento (hecho de Ti-6Al-4V) manufacturado con este proceso.

En general, el proceso de formado superplástico se realiza a casi 900 °C (1650 °F) para las aleaciones de titanio y alrededor de 500 °C (930 °F) para las aleaciones de aluminio; las temperaturas para la unión por difusión son similares. Sin embargo, la presencia de una capa de óxido en las hojas de aluminio es un problema importante que degrada la resistencia de la unión en la unión por difusión. Para ilustrar los tiempos del ciclo, hojas de aleación de níquel 718 de 2 mm (0.080 pulgada) de espesor se deformaron superplásticamente en una aplicación, en matrices de cerámica a 950 °C (1740 °F), utilizando gas argón a una presión de 2 MPa (300 psi). El tiempo del ciclo fue de cuatro horas.

16.11 Procesos especializados de formado

Aunque no se utilizan tan comúnmente como los procesos tratados hasta aquí, en esta sección se describen otros procesos de formado de hojas que se usan para aplicaciones especializadas.

Formado por explosión. Por lo general, los explosivos se utilizan para demoler edificios, construir carreteras y en muchos otros propósitos destructivos. Sin embargo, si se controla su cantidad y forma, se pueden emplear como fuente de energía para el formado de láminas metálicas. Usados por primera vez a principios de 1900, en el *formado por explosión*, la lámina se sujeta sobre una matriz y el ensamble completo se baja dentro de un tanque lleno con agua (fig. 16.45a). Después se evacua el aire dentro de la cavidad de la matriz, se coloca una carga explosiva a cierta altura y se detona la carga.

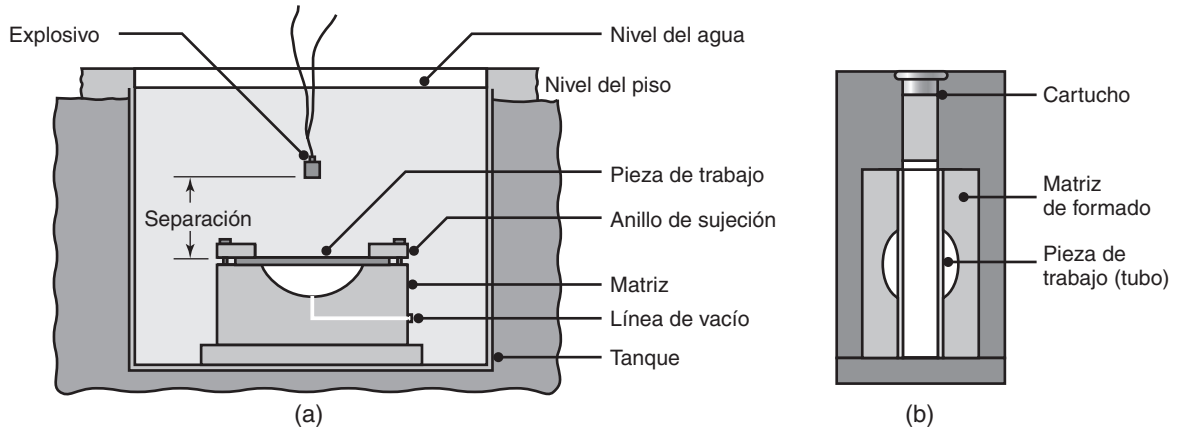


FIGURA 16.45 *(a)* Esquema del proceso de formado por explosión. *(b)* Ilustración del método confinado de abombado de tubos por explosión.

El explosivo genera una onda de choque con una presión suficiente para dar forma a las láminas metálicas. La *presión pico* (p) generada en el agua está dada por la expresión:

$$p = K\left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R}\right)^a \tag{16.15}$$

donde p se encuentra en psi, K es una constante que depende del tipo de explosivo, como 21,600 para el TNT (trinitrotolueno), W es el peso del explosivo en libras, R la distancia del explosivo a la superficie de la lámina metálica (llamada *separación*) en pies, y a una constante, por lo general considerada como 1.15.

Mediante el formado con explosivos se puede producir una variedad de formas, considerando que el material es dúctil a las altas velocidades de deformación características de este proceso (ver tabla 2.4). Éste es versátil y virtualmente no existen límites para el tamaño de la lámina o placa. Resulta particularmente adecuado para pequeños lotes de producción de partes grandes, como las utilizadas en aplicaciones aeroespaciales. Por medio de este método se ha dado forma a placas de acero de 25 mm (1 pulgada) de espesor y 3.6 m (12 pies) de diámetro, y se han abombado tubos con espesores de pared de hasta 25 mm (1 pulgada). El método de formado por explosión también se puede utilizar en mucho menor escala, como se muestra en la figura 16.45b. En este caso, se usa un *cartucho* (explosivo dentro de un contenedor) como fuente de energía. El proceso puede ser útil en el abombado y la dilatación de tubos de pared delgada para aplicaciones especiales.

Las propiedades mecánicas de las partes producidas mediante el formado por explosión son básicamente similares a las de otras fabricadas por métodos convencionales de formado. Dependiendo del número de partes a producir, las matrices pueden ser de aleaciones de aluminio, acero, hierro dúctil, aleaciones de zinc, concreto reforzado, madera, plásticos o materiales compósitos.

Formado por pulso magnético. En el *formado por pulso magnético*, o *formado electromagnético*, la energía almacenada en un banco de capacitores se descarga con rapidez a través de una bobina magnética. En un ejemplo característico, se coloca una bobina con forma de anillo sobre una pieza tubular. Después, el tubo se colapsa mediante fuerzas magnéticas sobre una pieza sólida, convirtiendo así el ensamble en una pieza integral (fig. 16.46).

La mecánica de este proceso se basa en el hecho de que un campo magnético producido por la bobina (fig. 16.46a) cruza el tubo metálico (que es un conductor eléctrico) y genera *corrientes de Eddy* en el tubo. A su vez, estas corrientes producen su campo

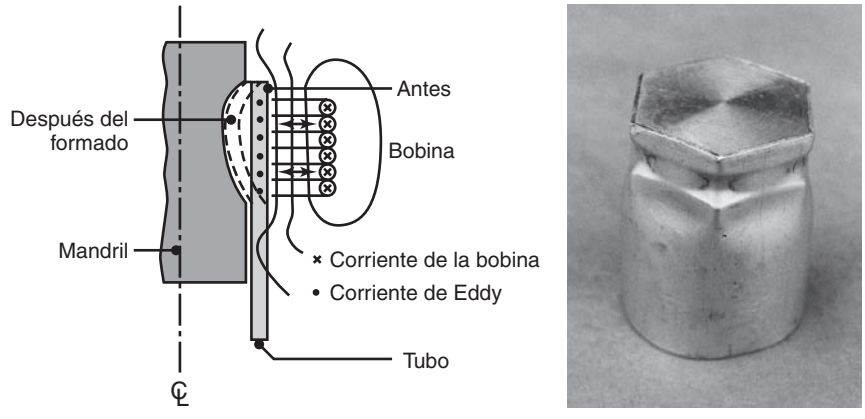


FIGURA 16.46 *(a)* Esquema del proceso de formado por pulso magnético utilizado para formar un tubo sobre un inserto. *(b)* Tubo de aluminio colapsado sobre un inserto hexagonal mediante el proceso de formado por pulso magnético.

magnético. Las fuerzas producidas por los dos campos magnéticos se oponen una a otra. La fuerza de repulsión generada entre la bobina y el tubo colapsa entonces el tubo sobre la pieza interior. Cuanto mayor sea la conductividad eléctrica de la pieza de trabajo, mayores serán las fuerzas magnéticas. No es necesario que el material de la pieza de trabajo tenga propiedades magnéticas.

El formado por pulso magnético se utiliza para colapsar tubos de pared delgada sobre barras, cables e insertos; en el sellado por plegado por compresión de recipientes para filtros de aceite de uso automovilístico; en operaciones de abombado y abocardado; y para recalcar accesorios en los extremos de los tubos de torque para el avión Boeing 777. También se pueden fabricar bobinas magnéticas planas para operaciones como repujado y embutido poco profundo de láminas metálicas.

Formado por martillado. El formado por martillado se utiliza para producir curvaturas en hojas metálicas delgadas mediante *granallado* (ver sección 34.2) sobre una superficie de la hoja. En consecuencia, dicha superficie se somete a esfuerzos de compresión que tienden a dilatar la capa superficial. Debido a que el material debajo de la superficie granallada se mantiene rígido, la dilatación de la superficie provoca que la lámina desarrolle una curvatura. El proceso también induce esfuerzos residuales de compresión en la superficie, lo que mejora la resistencia a la fatiga de la lámina.

El granallado se realiza con perdigón de hierro fundido o de acero lanzado desde una rueda giratoria o mediante una corriente de aire a través de una boquilla. El formado por martillado se utiliza en la industria aeronáutica para generar curvaturas lisas y complejas en las cubiertas de las alas de los aviones. Para formar tableros de alas de 25 m (80 pies) de largo se ha utilizado granalla de acero fundido de unos 2.5 mm (0.1 pulgada) de diámetro, viajando a una velocidad de 60 m/s (200 pies/s). Para secciones gruesas, puede utilizarse granalla hasta de 6 mm (1/4 pulgada) de diámetro. El proceso de formado por martillado también se emplea para enderezar partes torcidas o dobladas, incluyendo anillos no circulares para hacerlos redondos.

Formado por rayo láser. Este proceso comprende la aplicación de rayos láser como fuente de calor en regiones específicas de la lámina metálica. Los abruptos gradientes térmicos que se desarrollan a través del espesor de la hoja producen esfuerzos térmicos suficientemente elevados para ocasionar la deformación plástica localizada de la lámina. Mediante este método, por ejemplo, se puede doblar en forma permanente una lámina sin utilizar matrices. En el **formado asistido por rayo láser**, el láser actúa como fuente localizada de calor, reduciendo así la resistencia de la hoja metálica en puntos específicos, mejorando la formabilidad y aumentando la flexibilidad del proceso. Las aplicaciones incluyen enderezado, doblado, repujado y formado de componentes complejos, tubulares o planos.

Microformado. Éste es un desarrollo más reciente y describe una familia de procesos que se utilizan para producir partes y componentes metálicos muy pequeños. Los ejemplos de *productos miniaturizados* incluyen un reloj pulsera con una cámara digital integrada y un componente de almacenamiento para computadora de un gigabyte. Entre los componentes que suelen fabricarse mediante microformado están los pequeños ejes para micromotores, resortes, tornillos y una variedad de partes cabeceadas en frío, extruidas, dobladas, repujadas, acuñadas, punzonadas o procesadas por embutido profundo. Las dimensiones comunes son submilimétricas y su peso normal se mide en miligramos.

Formado electrohidráulico. También llamado de *chispa submarina* o *formado por descarga eléctrica*, la fuente de energía de este proceso de formado es una chispa entre electrodos que se encuentran conectados con un alambre corto y delgado. La rápida descarga de energía de un banco de capacitores a través del alambre genera una onda de choque similar a la creada por explosivos. Los niveles de energía son menores que en el formado por explosión, siendo comunes unos cuantos kJ. La presión desarrollada en el agua que sirve de medio es suficientemente alta para formar la parte. El formado electrohidráulico es un proceso por lotes y se puede utilizar para fabricar diversas partes pequeñas.

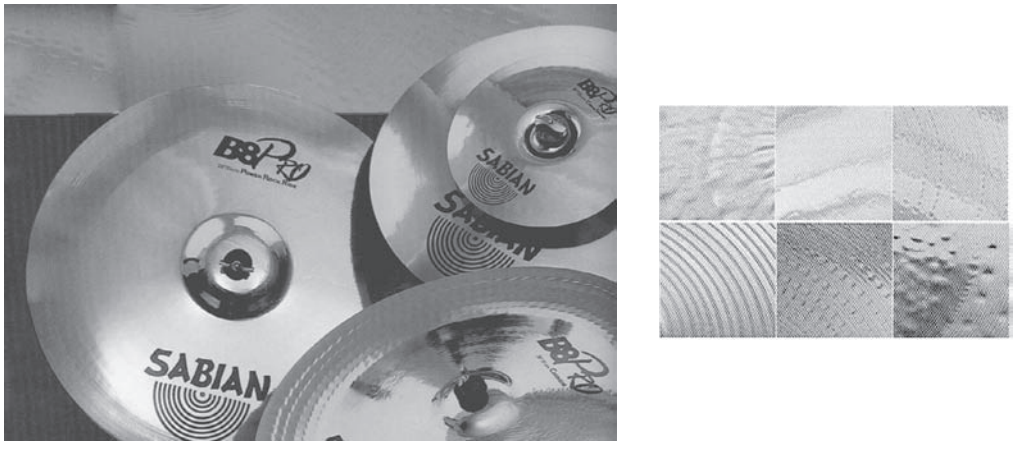
Mezclas de gases. En este proceso, la fuente de energía es una mezcla de gases dentro de un contenedor cerrado, que se enciende. La presión generada es suficientemente alta para formar partes con hojas o láminas metálicas. Aunque no se utiliza en la práctica, el principio de este proceso es similar al usado para generar presión en un motor de combustión interna.

Gases licuados. Los gases licuados (como el nitrógeno líquido) también se han utilizado para desarrollar presiones suficientemente elevadas para dar forma a láminas metálicas. Si se le permite alcanzar la temperatura ambiente dentro de un contenedor cerrado, el nitrógeno licuado se convierte en gaseoso y se expande, desarrollando la presión necesaria. Aunque no se emplea en la práctica, el proceso es capaz de formar partes relativamente poco profundas.

ESTUDIO DE CASO 16.1 Manufactura de platillos musicales

Los platillos (fig. 16.47a) son un instrumento fundamental de percusión para todo tipo de música. Los modernos juegos de platillos y tambores cubren una amplia variedad de sonidos, desde los bajos, oscuros y cálidos, hasta los brillantes, agudos y cortantes. Algunos platillos suenan melodiosos, mientras que otros generan un sonido de mala calidad.. Existe una amplia variedad de tamaños, formas, pesos, martillados y acabados superficiales (fig. 16.47b) para obtener el desempeño deseado.

Los platillos se producen a partir de metales, como el bronce B20 (80% de Cu-20% de Sn, con un poco de plata), bronce B8 (92% de Cu-8% de Sn), aleación níquel plata y latón, utilizando diversos métodos de procesamiento. En la figura 16.48 se muestra la secuencia de manufactura para producir platillos de bronce B20. Primero se funde el metal en lingotes con forma de hongo y después se enfría a temperatura ambiente. Luego se lamina sucesivamente (hasta 14 veces) con enfriamiento por agua con cada pase por el molino de laminación. Se tiene cuidado especial para laminar el bronce a diferentes ángulos en cada pase a fin de minimizar la anisotropía, proporcionar la orientación preferencial del grano y desarrollar una forma redonda, equilibrada. Posteriormente, las piezas en bruto laminadas se recalientan y se forman por estiramiento (se presionan) para darles la forma de copa o campana que determina el sonido armónico del platillo. Después, los platillos se perforan en el centro, o se punzonan, para crear orificios de soporte y se recortan en una cizalla rotatoria a los diámetros finales aproximados. Esta operación va seguida de otro paso de formado por estiramiento para obtener la forma característica de "plato turco" que controla el tono.



(a) (b)

FIGURA 16.47 *(a)* Selección de platillos comunes. *(b)* Vista detallada de diferentes texturas superficiales y acabados de platillos. *Fuente:* Cortesía de W. Blanchard, Sabian Ltd.

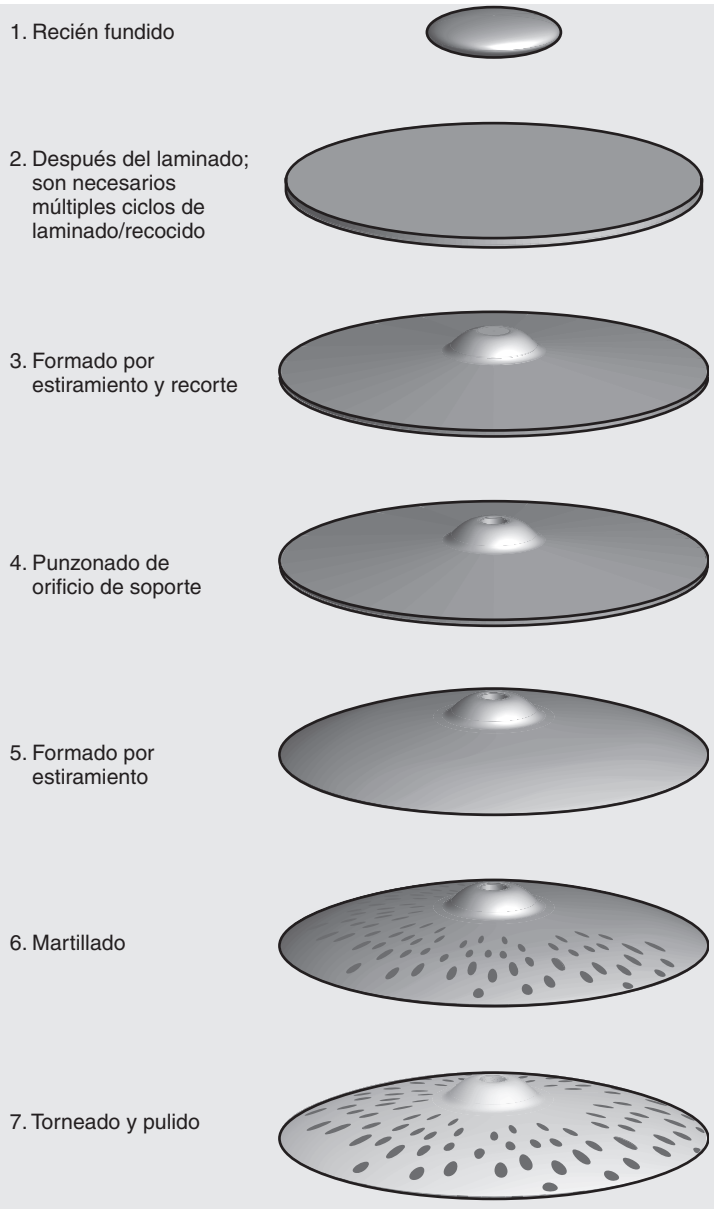


FIGURA 16.48 Secuencia de manufactura para la producción de platillos. *Fuente:* Cortesía de W. Blanchard, Sabian Ltd.

Los platillos también se martillan para proporcionar un carácter distintivo a cada instrumento. El martillado se puede hacer a mano (ver fig. 16.49b) o en máquinas automáticas de formado por martillado (fig. 16.49a). El martillado a mano implica colocar la pieza en bruto de bronce sobre un yunque de acero, donde los platillos se golpean manualmente con martillos. El formado por martillado automático se efectúa en maquinaria sin plantillas, pues a los platillos ya se les ha dado forma, pero el patrón es controlable y uniforme. El tamaño y patrón de las operaciones de martillado depende de la respuesta deseada, como el tono, sonido, respuesta y timbre del platillo.

Se realizan varias operaciones de acabado sobre los platillos. Esto simplemente puede comprender la limpieza e impresión de la información para identificación, ya que algunos músicos prefieren la apariencia natural de la superficie y el sonido del bronce formado, laminado en caliente. Es más común que los platillos se giren en un



(a) (b)

FIGURA 16.49 Martillado de platillos. *(a)* Martillado automatizado en una máquina de granallado; *(b)* martillado manual de platillos. *Fuente:* Cortesía de W. Blanchard, Sabian Ltd.

torno (sin fluido para maquinado) para retirar la superficie de óxido y reducir el espesor del platillo, con el propósito de crear el peso y sonido deseados. Por último, el acabado superficial se vuelve lustroso y, en algunos casos, desarrolla una microestructura superficial favorable. Algunos platillos se pulen para obtener un "acabado" lustroso "brillante". En muchos casos, las depresiones superficiales provocadas por el martillado persisten después del acabado, lo que también constituye una característica estética apreciada por los músicos. En la figura 16.47b se muestran diversos acabados superficiales asociados con los platillos modernos.

Fuente: Cortesía de W. Blanchard, Sabian Ltd.

16.12 Manufactura de estructuras metálicas tipo panal

Una *estructura tipo panal* consta básicamente de un núcleo de panal u otras formas corrugadas, unido a dos delgadas capas exteriores (fig. 16.50). El ejemplo más común de dicha estructura es un cartón corrugado, que tiene una alta relación rigidez a peso y se utiliza como empaque para embarque de bienes de consumo e industriales. Debido a su bajo peso y alta resistencia a las fuerzas de doblado, las estructuras metálicas tipo panal se utilizan en componentes aeronáuticos y aeroespaciales, edificios y equipo de transporte. En esta sección se describen los métodos de manufactura de metales tipo panal, ya que comprenden operaciones que se clasifican mejor como procesos de formado de hojas metálicas. Sin embargo, debe hacerse notar que las estructuras tipo panal también pueden fabricarse con materiales no metálicos, como el cartón, los polímeros y una variedad de materiales compósitos.

Lo más común es que las estructuras tipo panal se produzcan con aluminio de la serie 3000. Sin embargo, también se fabrican con titanio, aceros inoxidables y aleaciones

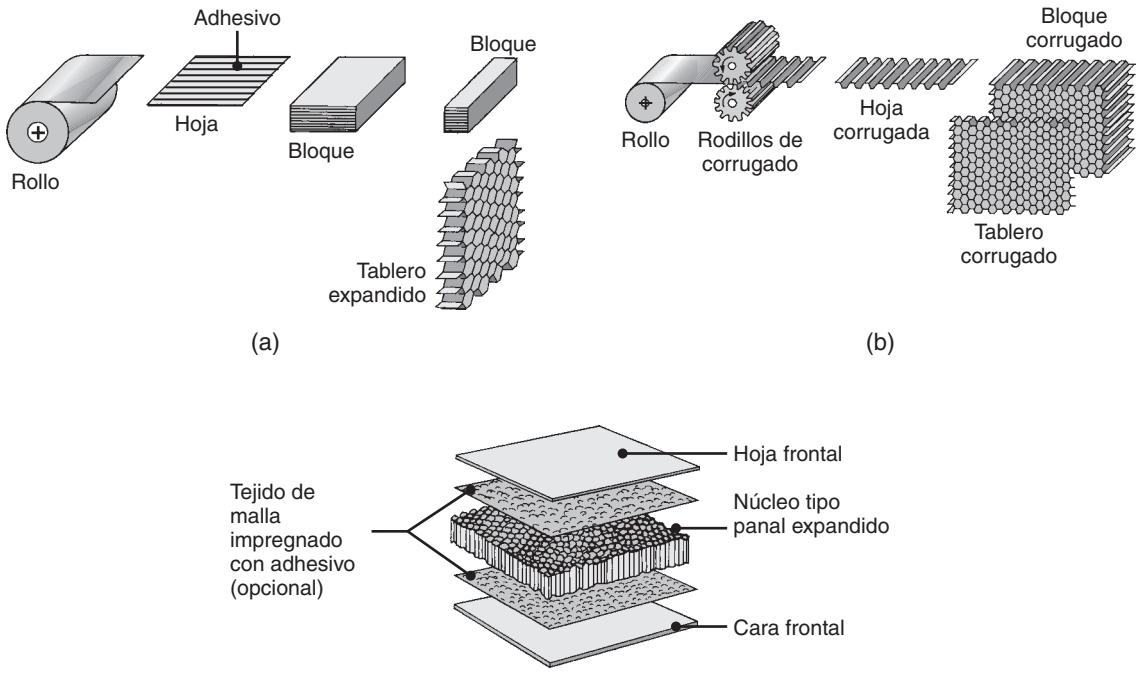


FIGURA 16.50 Métodos de manufactura de estructuras tipo panal: *(a)* proceso de expansión; *(b)* proceso de corrugado; *(c)* ensamble de una estructura tipo panal en un laminado.

de níquel para aplicaciones especiales y resistencia a la corrosión. Los desarrollos más recientes incluyen la fabricación de estructuras tipo panal mediante plásticos reforzados, como aramidas-epóxicos.

Existen dos métodos básicos para manufacturar materiales tipo panal. En el **proceso de expansión**, que es el más común (fig. 16.50a), primero se cortan la hojas de un rollo y se aplica un *adhesivo* (ver sección 32.4) a intervalos (líneas nodales) sobre su superficie. Después las hojas se apilan y se curan en un horno, desarrollando uniones fuertes en las juntas adhesivas. Por último el bloque se corta en secciones con las dimensiones deseadas y se estira para producir una estructura tipo panal.

El **proceso de corrugado** (fig. 16.50b) es similar al proceso utilizado para fabricar cartón corrugado. La lámina metálica primero pasa a través de un par de rodillos especialmente diseñados, convirtiéndose en una hoja corrugada; después se corta a las longitudes deseadas. Se aplica adhesivo a las líneas nodales y las hojas corrugadas se ensamblan en un bloque que después se cura. Debido a que las hojas ya tienen forma, no existe un proceso de expansión. Finalmente, el material tipo panal se coloca en una estructura emparedada (tipo *sándwich*) (fig. 16.50c) mediante caras de lámina que se unen con adhesivos (o con *soldadura fuerte*, ver sección 32.2) en las superficies superior e inferior.

16.13 Consideraciones de diseño en el formado de hojas metálicas

Al igual que sucede con la mayoría de los procesos descritos a lo largo de este libro, a través del tiempo han evolucionado algunas guías y prácticas de diseño. La mejor forma de obtener alta calidad y ahorros en costo es por medio de un diseño cuidadoso donde se utilicen las mejores prácticas establecidas de diseño, herramientas computacionales y técnicas de manufactura. Las siguientes guías son aplicables a las operaciones de formado de hojas metálicas, en donde se identifican los aspectos más significativos del diseño.

Diseño de la pieza en bruto. El material de desecho es la preocupación fundamental en las operaciones de troquelado (ver también la tabla 40.6). Las partes diseñadas de manera deficiente no se *anidan* apropiadamente y puede existir un desecho considerable entre operaciones sucesivas de troquelado (fig. 16.51). La aplicación del diseño ejerce algunas restricciones sobre la forma de las piezas en bruto, pero siempre que sea posible, dichas piezas deben diseñarse para reducir el desecho al mínimo.

Doblado. En las operaciones de doblado, las principales preocupaciones son la fractura del material, el arrugado o plegado y la incapacidad para formar el doblez. Como se

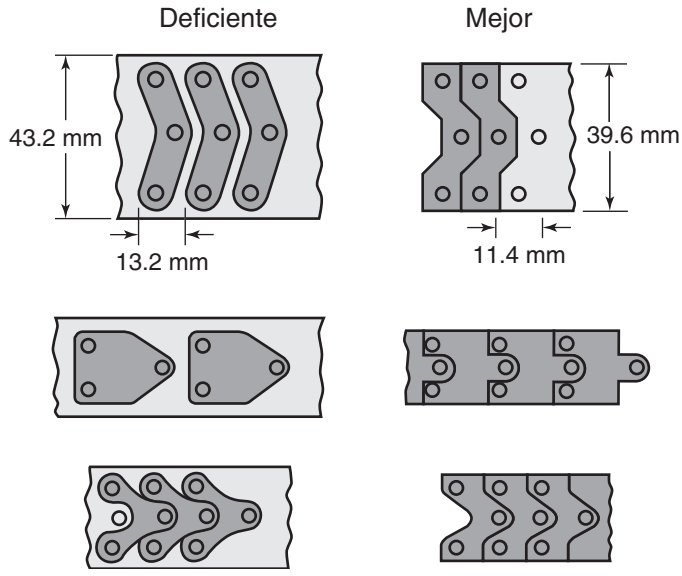


FIGURA 16.51 Anidado eficiente de partes para una utilización óptima del material en el troquelado. *Fuente:* Cortesía de Society of Manufacturing Engineers.

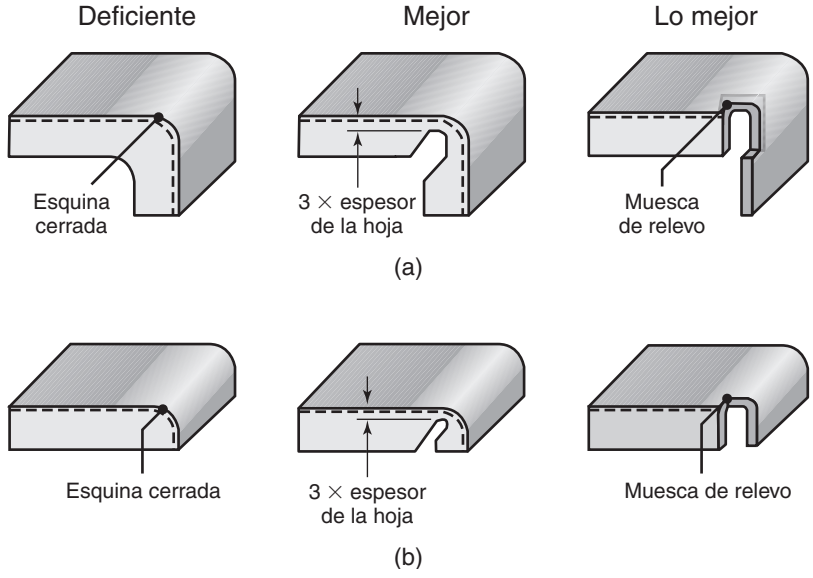


FIGURA 16.52 Control de desgarrado y pandeo de un reborde en un doblado en ángulo recto. *Fuente:* Cortesía de Society of Manufacturing Engineers.

muestra en la figura 16.52, una parte fabricada con una hoja metálica con un reborde que se va a doblar forzará al reborde a sufrir compresión, lo que puede ocasionar pandeo (ver también *rebordeado*, sección 16.6). Este problema se puede controlar con una muesca de alivio cortada para limitar los esfuerzos del doblado, o se puede hacer alguna otra modificación del diseño, como se muestra en la figura, para evitar el desgarre (fig. 16.53).

Como el radio de doblado es un área con esfuerzos elevados, deben eliminarse todas las concentraciones de esfuerzos del punto del radio de doblado. Un ejemplo son las partes con orificios cerca de los dobleces. Es conveniente alejar el orificio del área del doblez, pero cuando esto no es posible, se puede utilizar una ranura de media luna o una oreja (fig. 16.54a). De manera similar, al doblar rebordes deben evitarse las pestañas y muescas, ya que estas concentraciones de esfuerzos reducen mucho la formabilidad. Si son necesarias las pestañas, deben utilizarse radios grandes para reducir la concentración de esfuerzos (fig. 16.54b).

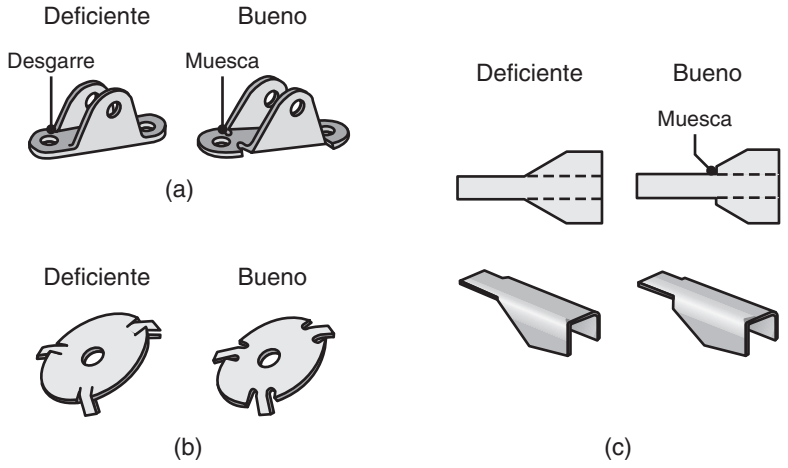


FIGURA 16.53 Aplicación de muescas para evitar el desgarre y el arrugado en las operaciones de doblado en ángulo recto. *Fuente:* Cortesía de Society of Manufacturing Engineers.

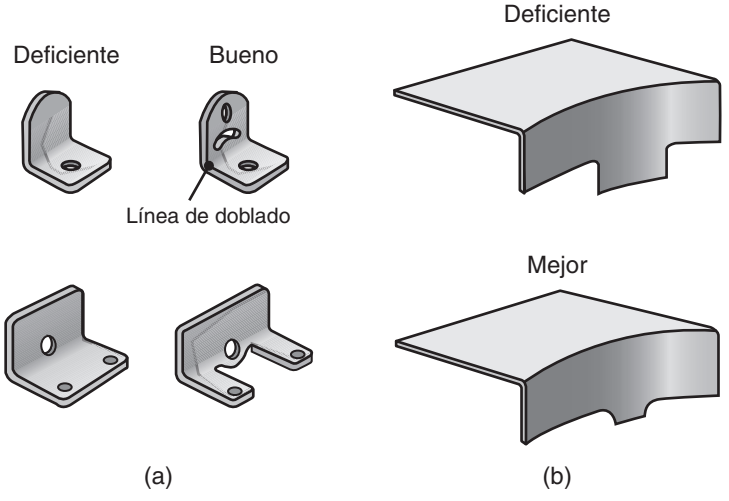


FIGURA 16.54 Concentraciones de esfuerzos cerca de dobleces. *(a)* Uso de una media luna o una oreja cerca de un doblez. *(b)* Reducción de la severidad de una ceja en un reborde. *Fuente:* Cortesía de Society of Manufacturing Engineers.

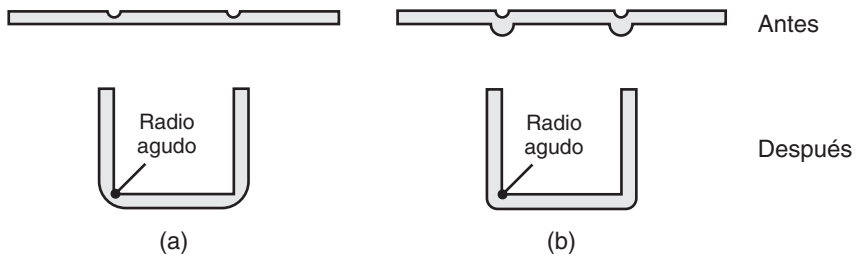


FIGURA 16.55 Aplicación de *(a)* ranurado, o *(b)* repujado para obtener un radio agudo interno en el doblado. A menos que se diseñen apropiadamente, estas características pueden provocar fractura. *Fuente:* Cortesía de Society of Manufacturing Engineers.

Cuando se van a utilizar doblado y producción de muescas, es importante orientar las muescas en forma apropiada con respecto a la dirección de los granos. Como se muestra en la figura 16.17, idealmente los dobleces deben ser perpendiculares a la dirección de laminación (u oblicuos, si eso no fuera posible) para evitar el agrietamiento. Se pueden obtener radios agudos de doblado mediante estriado o repujado (fig. 16.55), pero debe reconocerse que esto puede provocar fracturas. En la holgura de un doblez no deben existir rebabas, ya que son frágiles (debido al endurecimiento por deformación) y se puede fracturar, llevando a una concentración de esfuerzos que propagaría la grieta dentro del resto de la lámina.

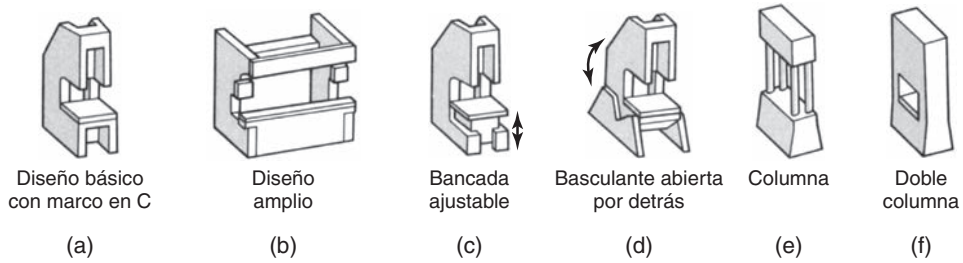
Operaciones de estampado y de matrices progresivas. En las matrices progresivas (ver sección 16.2.3), el costo del herramental y el número de estaciones se determina mediante el número de rasgos característicos y su espaciado en una parte. Por lo tanto, es conveniente reducir al mínimo el número de rasgos para minimizar los costos de herramental. Los rasgos con poco espaciado pueden proporcionar una holgura insuficiente para los punzones y pueden requerirse dos punzones. También es problemático formar cortes estrechos y protuberancias con un simple punzón y una matriz.

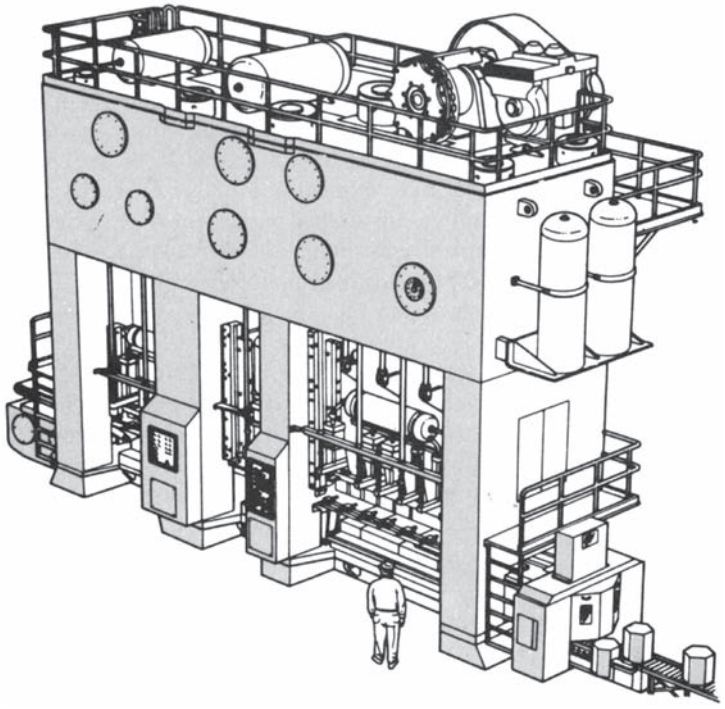
Embutido profundo. Después de una operación de embutido profundo, invariablemente una copa tratará de recuperar su forma original. Por esta razón, puede ser difícil formar diseños que utilicen una pared vertical en una copa de embutido profundo. Resulta más fácil producir ángulos de alivio de al menos 3° en cada pared. Es difícil producir copas con radios internos agudos, y con frecuencia las copas profundas requieren operaciones adicionales de planchado.

16.14 Prensas de formado de hojas metálicas

Para la mayoría de las operaciones de prensado, el equipo básico consiste en prensas mecánicas, hidráulicas, neumáticas y neumáticas-hidráulicas con una amplia variedad de diseños, características, capacidades y controles computarizados. En la figura 16.56 se muestran diseños comunes para los marcos o bastidores de las prensas (ver también figs. 14.17 y 16.23f). El diseño apropiado, así como la rigidez y construcción de dichos equipos, son fundamentales para una operación eficiente del sistema y para lograr una elevada capacidad de producción, un buen control dimensional y una alta calidad del producto.

La estructura tradicional del **marco en C** (fig. 16.56a) se ha utilizado ampliamente para facilitar el acceso de la herramienta y de la pieza de trabajo, pero no es tan rígida como el **tipo de caja de columnas o soportes** (fig. 16.56e), o la estructura de **marco de doble columna** (fig. 16.56f). Además, el acceso se ha vuelto menos importante debido a los avances en la automatización y en el uso de robots industriales y controles computarizados.





(g)

FIGURA 16.56 *(a)* a *(f)* Esquemas de tipos de bastidores de prensas para las operaciones de formado de láminas. Cada tipo tiene sus propias características de rigidez, capacidad y acceso. *(g)* Prensa grande de estampado. *Fuente: (a)* a (f) *Engineer's Handbook*, VEB Fachbuchverlag, 1965. (g) Verson Allsteel Company.

La *selección de la prensa* para las operaciones de formado de hojas metálicas depende de varios factores:

1. El tipo de operación de formado, el tamaño y la forma de las matrices y el herramental requerido.
2. El tamaño y la forma de las piezas de trabajo.
3. La longitud de la carrera de la corredera (correderas), el número de recorridos por minuto, la velocidad de operación y la *altura de cierre* (la distancia desde la parte superior de la bancada al fondo de la corredera con la carrera hacia abajo).
4. Número de correderas. Las prensas de simple acción tienen una corredera alternativa. Las prensas de doble acción tienen dos correderas, alternativas en la misma dirección. Se utilizan comúnmente para embutido profundo, una corredera para el punzón y la otra para la placa de sujeción. Las prensas de triple acción tienen tres correderas; se utilizan en general para invertir el reembutido o embutido en reversa y para otras operaciones complicadas de formado.

5. La fuerza máxima requerida (capacidad de la prensa y capacidad de tonelaje).
6. Tipo de controles mecánicos, hidráulicos y de computadora.
7. Características para el cambio de matrices. Debido a que el tiempo requerido para cambiar matrices en las prensas puede ser significativo (hasta de varias horas), lo que afecta la productividad, se han desarrollado sistemas de cambio rápido de matrices. Cuando se sigue un sistema denominado *intercambio de matriz de un solo minuto* (SMED, por sus siglas en inglés), las configuraciones de las matrices se pueden cambiar en menos de 10 minutos mediante sistemas hidráulicos o neumáticos controlados por computadora.
8. Características de seguridad.

Ya que una prensa es una inversión importante de capital, debe investigarse su uso presente y futuro para una amplia variedad de partes y aplicaciones. La versatilidad y el uso múltiple son factores importantes en la selección de una prensa, en particular para modificaciones al producto y para fabricar nuevos productos, a fin de responder a los mercados globales siempre cambiantes.

16.15 Economía de las operaciones de formado de hojas metálicas

El formado de hojas metálicas implica consideraciones económicas similares a las de los otros procesos descritos. Las operaciones de formado de láminas son muy versátiles y se pueden utilizar varios procesos diferentes para producir la misma parte. Los costos correspondientes (ver también capítulo 40) dependen de las operaciones en particular (como los costos de las matrices y el equipo, así como de la mano de obra). Para partes pequeñas y sencillas de hoja metálica, los costos y los tiempos de entrega de las matrices son más bien bajos. En cambio, para operaciones en gran escala (como el formado por estiramiento de tableros para aeronaves y cascos para embarcaciones) estos costos son muy altos. Además, debido a que el número requerido de dichas partes es más bien bajo, el costo por pieza puede ser muy elevado (ver fig. 14.18).

En otras operaciones de formado de láminas se realizan consideraciones similares. El embutido profundo requiere matrices y herramentales costosos, pero se producen grandes cantidades de partes con la misma configuración, como contenedores, latas y productos similares. Estos costos para otros procesos como el punzonado, troquelado, doblado y rechazado varían considerablemente, dependiendo del tamaño y espesor de la parte.

Los costos del equipo varían ampliamente y dependen en gran medida de la complejidad de la operación de formado, las características de carga y descarga de la parte, el tamaño y la forma de la pieza y el nivel de automatización y control computarizado requerido. La automatización, a su vez, afecta de modo directo la cantidad de mano de obra necesaria y el nivel de habilidad. A mayor automatización, menor nivel de habilidad requerido. Además, por lo general, muchas partes producidas con láminas metálicas exigen algunas operaciones de acabado; una de las más comunes es el rebabeo de las orillas de la pieza, que por lo general es intensiva en mano de obra, aunque se han logrado algunos avances en el rebabeo automático (que en lo particular requiere equipo controlado por computadora, por lo que puede ser costoso).

Como un ejemplo de la versatilidad de las operaciones de formado con hojas metálicas y de los costos involucrados, nótese que una parte con forma de copa se puede formar mediante embutido profundo, rechazado, formado con hule o con explosivos. También se puede formar mediante extrusión por impacto, fundición, o fabricándola a partir de diferentes piezas. La parte mostrada en la figura 16.57 puede producirse por medio de embutido profundo o rechazado convencional, pero los costos de las matrices para ambos procesos son significativamente diferentes.

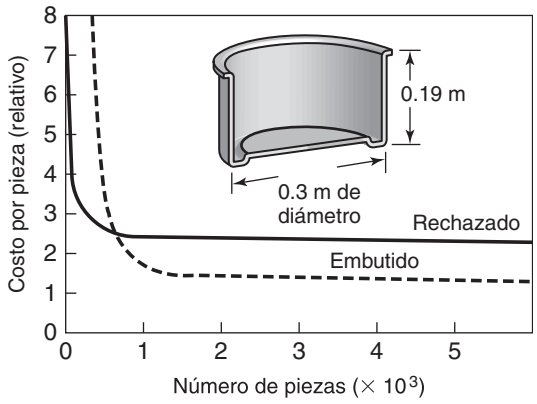


FIGURA 16.57 Comparación de costos para manufacturar un contenedor redondo de lámina metálica, ya sea por rechazado convencional o mediante embutido profundo. Obsérvese que para cantidades pequeñas el rechazado es más económico.

Las matrices para embutido profundo pueden tener muchos componentes y cuestan mucho más que los simples mandriles y herramientas empleadas en el rechazado. En consecuencia, el costo por parte de la matriz en el embutido puede ser elevado si sólo se necesitan algunas piezas. En cambio, esta parte se puede formar mediante embutido profundo en un tiempo mucho menor que mediante rechazado, incluso si esta última operación se encuentra automatizada y controlada por computadora. Además, por lo general, el rechazado requiere mano de obra más calificada. Considerando estos factores, es evidente que el punto de equilibrio se encuentra alrededor de las 700 partes, y el embutido profundo es más económico para cantidades mayores a ésa. En el capítulo 40 se dan mayores detalles sobre la economía de la manufactura.

RESUMEN

- Los procesos de formado de hojas metálicas (láminas) se encuentran entre las operaciones más versátiles. Por lo general, se utilizan en piezas de trabajo que tienen relaciones elevadas de superficie de área a espesor. A diferencia de los procesos de deformación volumétrica, como el forjado y la extrusión, a menudo se evita reducir el espesor del material en el formado de hojas (para evitar la estrangulación y el desgarramiento).
- Los parámetros importantes de los materiales son la calidad de la orilla cizallada de la hoja metálica antes del formado, la capacidad de la hoja para estirarse de manera uniforme, la resistencia del material al adelgazamiento, su anisotropía normal y planar, su tamaño de grano y su punto de elongación de fluencia (para los aceros al bajo carbono).
- Las fuerzas y la energía requeridas en los procesos de formado de hojas metálicas se transmiten a la pieza de trabajo mediante herramientas y matrices sólidas, miembros flexibles de hule o poliuretano, o por medios eléctricos, químicos, magnéticos y gaseosos.
- Debido a que se utilizan materiales relativamente delgados, la restitución elástica, el pandeo y el plegado constituyen problemas significativos en el formado de hojas. La recuperación elástica es una función del esfuerzo de fluencia, el módulo elástico y la relación del radio de doblado con respecto al espesor. Estos problemas se pueden reducir o eliminar mediante un diseño apropiado de las herramientas y las matrices, minimizando la longitud sin soporte de la hoja durante el procesamiento, y controlando el espesor de la hoja alimentada y sus propiedades mecánicas.
- Entre los desarrollos importantes se encuentra el formado superplástico de hojas unidas por difusión. El proceso es capaz de producir estructuras complejas de hojas metálicas, sobre todo para aplicaciones aeroespaciales (que exigen relaciones rigidez a peso particularmente elevadas).
- Se han desarrollado varios métodos de prueba para predecir la formabilidad de las hojas metálicas. En las operaciones de doblado, la reducción del área de la hoja en

tensión, da una clara indicación de su capacidad de doblado (radio mínimo de doblado); esto también se aplica al parámetro de capacidad de rechazado de los metales (máxima reducción de espesor por pase).

- Los diagramas de límites de formado son muy útiles para operaciones de estampado general, ya que establecen relaciones cuantitativas entre las deformaciones mayor y menor que limitan el formado con seguridad. Para operaciones de embutido profundo, el parámetro importante es la anisotropía normal o plástica de la hoja (la relación de la deformación del ancho a la deformación de espesor en una prueba de tensión).

TÉRMINOS CLAVE

Abombado
Acanalado
Anidado
Anisotropía normal
Anisotropía planar
Anisotropía plástica
Arrugado
Bandas de Lüder
Borde ondulado
Capacidad de doblado
Cizallado
Diagrama de límites de formado
Doblado
Embutido
Embutido profundo
Estructuras tipo panal
Formabilidad (capacidad de formado)
Formado con hule
Formado de orificios rebordeados
Formado electrohidráulico
Formado por estiramiento
Formado por explosión
Formado por martillado
Formado por pulso magnético
Formado por rayo láser
Formado por rodillos
Formado superplástico
Holgura
Matrices compuestas
Matrices de transferencia
Matrices progresivas
Microformado
Niblado
Perla de embutido
Piezas en bruto
Placa de soporte
Planchado
Plegado
Prensa plegadora
Proceso de hidroformado
Punzonado
Radio mínimo de doblado
Ranurado
Rasurado
Rebaba
Rebabeo
Rebordeado
Rechazado
Recuperación elástica o restitución (rebote)
Reembutido
Regla de acero (suaje)
Relación límite de embutido
Repujado
Resistencia al mellado
Superficie bruñida
Tolerancia de doblado
Troquelado
Troquelado fino

BIBLIOGRAFÍA

ASM Handbook, Vol. 14: *Forming and Forging*, ASM International, 1988.

Benson, S., *Press Brake Technology*, Society of Manufacturing Engineers, 1997.

Bitzer, T., *Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing*, Chapman & Hall, 1997.

Blazynski, T. Z., *Plasticity and Modern Metal-forming Technology*, Elsevier, 1989.

Boljanovic, V., *Sheet Metal Forming Process and Die Design*, Industrial Press, 2004.

Fundamentals of Tool Design, 4a. ed., Society of Manufacturing Engineers, 1998.

Gillanders, J., *Pipe and Tube Bending Manual*, FMA International, 1994.

Hosford, W. F. y Caddell, R. M., *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy,* 2a. ed., Prentice Hall, 1993.

Iliescu, C., *Cold-Pressing Technology*, Elsevier, 1990.

Morgan, E., *Tinplate and Modern Canmaking Technology,* Pergamon, 1985.

Pearce, R., *Sheet Metal Forming,* Chapman & Hall, 1997.

Progressive Dies, Society of Manufacturing Engineers, 1994.

Smith, D., *Die Design Handbook,* 3a. ed., Society of Manufacturing Engineers, 1990.

_____, *Fundamentals of Pressworking,* Society of Manufacturing Engineers, 1994.

Suchy, I., *Handbook of Die Design,* McGraw-Hill, 1997.

Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4a. ed., Vol. 2: *Forming*, Society of Manufacturing Engineers, 1984.

PREGUNTAS DE REPASO

16.1 ¿En qué difiere el formado de hojas metálicas del laminado, forjado y extrusión?
16.2 ¿Qué causa las rebabas? ¿Cómo se pueden reducir o eliminar?
16.3 Explique la diferencia entre punzonado y troquelado o preparación de piezas en bruto.
16.4 Liste las diversas operaciones realizadas por el corte con matriz. ¿Qué tipos de aplicaciones tienen estos procesos en manufactura?
16.5 Describa la diferencia entre dados o matrices compuestas, progresivas y de transferencia.
16.6 Describa las características de las hojas metálicas que son importantes en las operaciones de formado de láminas. Explique por qué son importantes.
16.7 Describa las características de los diagramas de límites de formado (FLD).
16.8 Liste las propiedades de los materiales que influyen en la recuperación elástica. Explique por qué y cómo lo hacen.
16.9 Dé una aplicación específica para cada una de las operaciones comunes de doblado descritas en este capítulo.
16.10 ¿Por qué se pandean los tubos cuando se doblan? ¿Cuál es el efecto de la relación espesor-diámetro del tubo?
16.11 Defina la anisotropía normal y explique por qué es importante para determinar la capacidad de embutido profundo de un material.
16.12 Describa la ondulación y por qué ocurre.
16.13 ¿Cuáles son las ventajas del formado con hule? ¿Con qué procesos compite?
16.14 ¿Cuál es la diferencia entre el embutido profundo y el reembutido?
16.15 ¿Cuáles son las diferencias y similitudes entre el rechazado convencional y el cortante?
16.16 ¿En qué es fundamentalmente distinto el formado con rodillos del laminado?
16.17 ¿Qué es el anidado?
16.18 ¿Qué es el microformado? ¿Cuál es su importancia en la manufactura moderna?
16.19 ¿Cuáles son las ventajas del formado superplástico?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

16.20 Describa las diferencias que ha observado entre productos fabricados con hojas metálicas y los elaborados mediante fundición y forja.
16.21 Describa el proceso de corte que tiene lugar cuando un par de tijeras corta una hoja de aluminio.
16.22 Identifique las variables del material y del proceso que influyen en la fuerza de punzonado en el cizallado y explique cómo afecta cada una de ellas a esta fuerza.
16.23 Explique por qué la recuperación elástica en el doblado depende del esfuerzo de fluencia, el módulo elástico, el espesor de la hoja y el radio de doblado.
16.24 ¿Cuál es la importancia del tamaño de los círculos en los patrones de rejilla mostrados en la figura 16.15? ¿Cuál es la importancia del espesor de las líneas?
16.25 Explique por qué las pruebas de formado de depresiones (copas) pueden no predecir bien la formabilidad de las hojas metálicas en procesos de formado real.
16.26 Se indicó que cuanto más gruesa sea la hoja metálica, más altas se volverán las curvas en la figura 16.14b. ¿Por qué cree que ocurre este efecto?
16.27 Identifique los factores que influyen en la fuerza de embutido profundo (F) en la figura 16.32b y explique por qué lo hacen.
16.28 ¿Por qué las perlas de la figura 16.36b se colocan en esas ubicaciones particulares?
16.29 Una regla general de las relaciones dimensionales para un embutido satisfactorio sin placa de sujeción está dada por la ecuación 16.14. Explique qué pasaría si se excediera este límite.
16.30 En la sección 16.2.1 se indicó que es difícil estimar la fuerza de extracción del punzón debido a la multitud de factores involucrados. Haga una lista de estos factores con breves explicaciones acerca de por qué afectarían la fuerza de extracción.
16.31 ¿Es posible que el diagrama de límites de formado mostrado en la figura 16.14b tenga una deformación mayor negativa?
16.32 Revise la figura 16.14b y explique claramente si en una operación de formado de láminas metálicas le gustaría desarrollar un estado de deformación en la mitad izquierda o en la mitad derecha del diagrama de límites de formado.
16.33 ¿Es posible que el planchado ocurra en una operación ordinaria de embutido profundo? ¿Cuál es el factor más importante?
16.34 Observe la rugosidad de la periferia del orificio rebordeado de la figura 16.25c y comente sus posibles efectos cuando la parte se utilice en un producto.

16.35 ¿Qué recomendaciones haría para eliminar el agrietamiento de la pieza doblada que se mostró en la figura 16.17c? Explique sus razones.
16.36 Como puede ver, los ejes del diagrama de límites de formado se refieren a las deformaciones ingenieriles dadas como porcentaje. Describa lo que piensa acerca de si el uso de las deformaciones reales, como en la ecuación 2.7, tendría una ventaja significativa.
16.37 Se ha establecido que la capacidad de embutido de un material es mayor en el proceso de hidroformado que en el de embutido profundo. Explique por qué.
16.38 Dé varios ejemplos específicos de este capítulo en los que sea deseable la fricción y varios en los que no lo sea.
16.39 Como puede ver, algunas de las operaciones descritas en este capítulo producen desechos considerables. Describa lo que piensa respecto del reúso, reciclado o disposición de estos desechos. Considere su tamaño, forma y contaminación mediante fluidos para trabajo de los metales durante el procesamiento.
16.40 En la manufactura de las piezas de las carrocerías automotrices con láminas de acero al carbono, se observan deformaciones por estiramiento (o bandas de Lüder), que pueden dañar el acabado superficial. ¿Cómo se pueden eliminar?
16.41 Se lleva un rollo de hoja metálica a un horno para recocerlo y mejorar su ductilidad. Sin embargo, se encuentra que la hoja tiene una relación límite de embutido menor que la que tenía antes del recocido. Explique por qué ocurrió este efecto.
16.42 Mediante cambios en la sujeción o en el diseño de una matriz, es posible que una hoja metálica pueda sufrir una deformación menor negativa. Explique cuáles podrían ser las ventajas de este efecto.
16.43 ¿Cómo produciría la parte mostrada en la figura 16.41b, de manera distinta al hidroformado de tubos?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

16.44 Calcule R_{prom} para un metal donde los valores de R para las direcciones 0°, 45° y 90° son 0.9, 1.6 y 1.75, respectivamente. ¿Cuál es la relación límite de embutido (LDR) para este material?
16.45 Calcule el valor de ΔR en el problema 16.44. ¿Se formaría alguna ondulación cuando este material se sometiera a embutido profundo? Explique su respuesta.
16.46 Estime la relación límite de embutido para los materiales listados en la tabla 16.4.
16.47 Demuestre la ecuación 16.4.
16.48 Respecto de la ecuación 16.4, se ha establecido que (en el doblado) los valores reales de la deformación en las fibras exteriores (es decir, a tensión) son mayores que los de las fibras interiores (a compresión), debido a que el eje neutral cambia durante el doblado. Con un dibujo apropiado, explique este fenómeno.
16.49 Mediante la ecuación 16.15 y el valor K para el TNT, grafique la presión en función del peso (W) y R, respectivamente. Describa sus observaciones.
16.50 En la sección 16.5 se establece que los valores k en la holgura de doblado dependen de las magnitudes relativas de R y T. Explique por qué existe esta relación.
16.51 En el formado por explosivos, calcule la presión pico en el agua para 0.3 libras de TNT a una separación de 3 pies. Comente si la magnitud de esta presión es suficientemente elevada para dar forma a hojas metálicas (láminas).
16.52 ¿Por qué la fuerza de doblado (P) es proporcional al cuadrado del espesor de la hoja, como se observa en las ecuaciones 16.7 y 16.8?
16.53 En la figura 16.14a, mida las áreas comprendidas dentro de las líneas continuas y compárelas con las áreas de los círculos originales. Calcule los espesores finales de las hojas, suponiendo que la hoja original tiene un espesor de 1 mm.

16.54 Con la ayuda de un diagrama de cuerpo libre, demuestre la existencia de esfuerzos circunferenciales compresivos en el reborde, en una operación de embutido profundo.

16.55 Grafique la ecuación 16.6 en términos del módulo elástico (E) y del esfuerzo de fluencia (Y) del material, y describa sus observaciones.

16.56 ¿Cuál es el radio mínimo de doblado de una hoja metálica de 2 mm de espesor con una reducción de tensión de área de 30%? ¿El ángulo de doblado afecta su respuesta? Explique su respuesta.

16.57 Cuando se embute profundamente una pieza en bruto redonda producida con una hoja metálica, se encuentra que no muestra ninguna ondulación. Sus valores R en las direcciones 0° y 90° del laminado son 1.4 y 1.8, respectivamente. ¿Cuál es el valor de R en la dirección de 45°?

16.58 Investigue la bibliografía técnica y explique el mecanismo por el cual puede ocurrir una recuperación elástica negativa en el doblado en una matriz en V. Muestre que dicha recuperación no ocurre en el doblado al aire.

16.59 Mediante los datos de la tabla 16.3 y haciendo referencia a la ecuación 16.5, calcule la reducción de tensión del área para los materiales y las condiciones indicadas en la tabla.

16.60 ¿Cuál es la fuerza requerida para punzonar un orificio cuadrado, de 100 mm en cada lado, en una hoja de aluminio 5052-O de 1 mm de espesor utilizando matri-

ces planas? ¿Cuál sería su respuesta si se usaran matrices biseladas?

16.61 En el ejemplo 16.4 se estableció que la razón para reducir la parte superior de las latas (cuello) es ahorrar material al fabricar la tapa. ¿Cuánto se ahorrará si se reduce el diámetro en 10%? ¿En 15%?

16.62 Estime el porcentaje de desperdicio al producir piezas en bruto redondas si la holgura entre las piezas es la décima parte del radio de la pieza bruta. Considere un troquelado en una y dos filas, como se muestra en la figura P16.62.

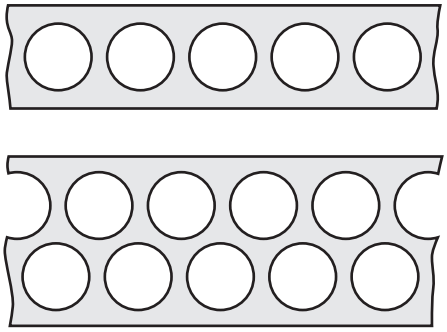


FIGURA P16.62

16.63 Suponga que es un instructor que cubre los temas descritos en este capítulo y que está presentando un cuestionario sobre los aspectos numéricos para someter a prueba los conocimientos de los estudiantes. Prepare dos problemas cuantitativos y provea las respuestas.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

16.64 Examine algunos de los productos que se encuentran en su casa que estén fabricados con hojas metálicas y discuta el proceso, o la combinación de procesos, por medio del cual cree que se produjeron.

16.65 Considere varias formas para las que se van a obtener piezas en bruto a partir de una hoja grande (como ovales, triangulares, con forma de L y otras más) mediante un corte con rayo láser y dibuje una disposición de anidado para minimizar la generación de desechos.

16.66 Dé varias aplicaciones de productos para *(a)* plegado y *(b)* costura.

16.67 Muchos cuerpos asimétricos de misiles se fabrican mediante rechazado. ¿Qué otros métodos podría utilizar si no existieran los procesos de rechazado?

16.68 Dé varios diseños y aplicaciones estructurales en los que se puedan utilizar conjuntamente la unión por difusión y el formado superplástico.

16.69 Inspeccione las partes de láminas metálicas en un automóvil y describa lo que piensa respecto de cuál de los procesos o combinaciones de procesos se utilizaron para fabricarlas. Comente las razones por las que puede haberse utilizado más de un proceso.

16.70 Nombre varias partes que se puedan fabricar en matrices compuestas y otras que puedan elaborarse en matrices de transferencia.

16.71 Con base en experimentos, se ha sugerido que el concreto, simple o reforzado, puede ser un material adecuado para matrices en las operaciones de formado de metales, sobre todo para partes grandes. Describa qué piensa respecto de esta sugerencia, considerando la geometría de la matriz y cualquier otro factor que pudiera ser relevante.

16.72 Las latas de metal pueden ser de dos piezas (en las que el fondo y los costados son integrales) o de tres piezas (en las que los costados, el fondo y la parte superior son todas piezas individuales). En el caso de una lata de tres piezas, ¿la costura vertical del cuerpo de la lata debería ser *(a)* en la dirección del laminado, *(b)* normal a la dirección del laminado, u *(c)* oblicua a la dirección del laminado? Demuestre su respuesta.

16.73 Investigue los métodos para determinar las formas óptimas de las piezas en bruto para las operaciones de embutido profundo. Dibuje dichas piezas formadas óptimamente para copas rectangulares y optimice su disposición en una hoja metálica grande.

16.74 El diseño mostrado en la figura P16.74 es una propuesta para una charola metálica, cuyo cuerpo principal está fabricado con lámina metálica rolada en frío. Observando sus características y que la lámina se dobla en dos diferentes direcciones, comente las diversas consideraciones de manufactura. Incluya factores como la anisotropía de la hoja laminada, su textura superficial, las direcciones de doblado, la naturaleza de las orillas cizalladas y la forma en que se sujeta el mango para el ensamble.

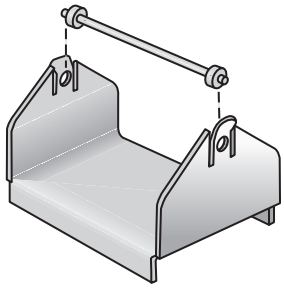


FIGURA P16.74

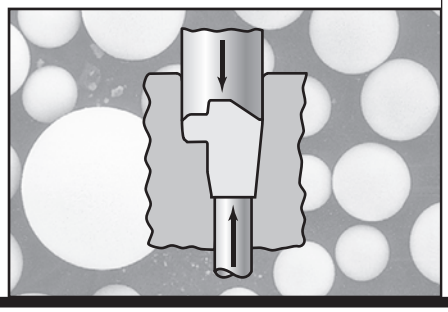
16.75 Utilizando un martillo con punta de bola, golpee la superficie de hojas de aluminio de diferentes espesores hasta que desarrollen una curvatura. Describa sus observaciones acerca de las formas producidas.

16.76 Revise un punzón para papel común y observe la forma de la punta. Compárela con las mostradas en la figura 16.10 y comente sus observaciones.

16.77 Consiga una lata de aluminio para bebidas y córtela a la mitad a lo largo con un par de tijeras para lámina. Utilizando un micrómetro, mida el espesor del fondo y de la pared de la lata. Estime las reducciones de espesor en el planchado y el diámetro de la pieza en bruto original.

Procesamiento de los polvos metálicos

CAPÍTULO 17



En este capítulo se exploran los procesos y técnicas de manufactura para producir partes de formas netas a partir de la metalurgia de polvos. En específico, se describen:

- Métodos para producir polvos metálicos.
- Procesos que se utilizan para consolidar y sinterizar polvos dándoles las formas deseadas.
- Procesos adicionales y operaciones de acabado para mejorar las propiedades.
- Aspectos competitivos de este proceso único.

Productos comúnmente fabricados: barras de conexión, anillos para pistones, engranes, levas, bujes, rodamientos, herramientas de corte, implantes quirúrgicos, imanes y filtros metálicos.

Procesos alternativos: fundición, forjado y maquinado.

17.1 Introducción 483
17.2 Producción de polvos metálicos 484
17.3 Compactación de los polvos metálicos 490
17.4 Sinterizado 499
17.5 Operaciones secundarias y de acabado 503
17.6 Consideraciones de diseño 505
17.7 Capacidades del proceso 508
17.8 Economía de la metalurgia de polvos 508

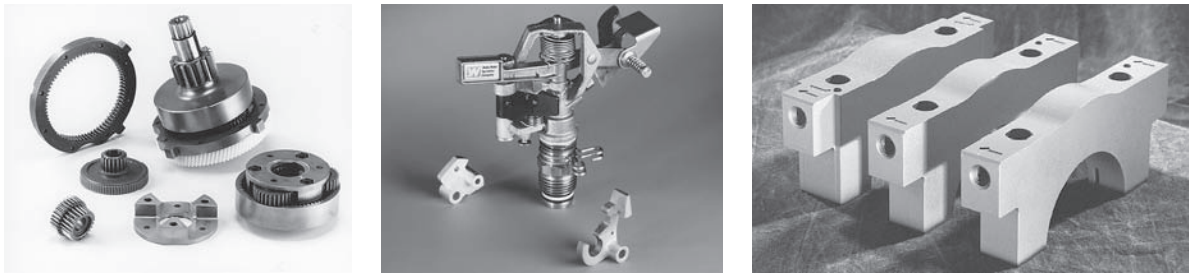
EJEMPLOS:

17.1 Prensado isostático en caliente de un elevador de válvulas 496
17.2 Contracción en sinterización 502
17.3 Engranes producidos por metalurgia de polvos para un tractor de jardín 504
17.4 Producción de carburo de tungsteno para herramentales y matrices o dados 504

17.1 Introducción

En los procesos de fabricación que hemos descrito hasta ahora, las materias primas utilizadas han sido metales y aleaciones, ya sea en estado fundido (vaciado) o en forma sólida (trabajado metálico). En este capítulo se describe el proceso de la **metalurgia de polvos** (P/M, por sus siglas en inglés), en el que los polvos metálicos se compactan para darles las formas deseadas, con frecuencia complejas, y se sinterizan (se calientan sin que se fundan) para formar una pieza sólida. Los egipcios emplearon este proceso por primera vez alrededor del año 3000 a.C. para fabricar herramientas de hierro. Uno de sus primeros usos en la época moderna fue a principios del siglo XX, a fin de hacer filamentos de tungsteno para focos. La disponibilidad de una amplia variedad de composiciones de polvos metálicos, la capacidad de producir partes en formas netas (**formado de formas netas**) y la economía general de la operación, proporcionan a este proceso único sus numerosas aplicaciones, atractivas y crecientes.

Por medio de las técnicas de metalurgia de polvos se fabrica una amplia gama de partes y componentes (fig. 17.1): *(a)* pequeños balines para bolígrafos; *(b)* componentes automovilísticos (que en la actualidad constituyen cerca de 70% del mercado de la metalurgia de polvos), como anillos para pistones, varillas de conexión, placas de frenos, engranes, levas y bujes; *(c)* aceros para herramientas, carburos de tungsteno y cermets como materiales para herramentales y matrices; *(d)* escobillas de grafito impregnadas con cobre para motores eléctricos; *(e)* materiales magnéticos; (f) filtros metálicos y rodamientos impregnados con aceite de porosidad controlada; *(g)* espumas metálicas; *(h)* implantes quirúrgicos, y *(i)* muchos otros para aplicaciones aeroespaciales, nucleares e industriales. Hoy, los avances en esta tecnología permiten fabricar partes *estructurales*



(a) (b) (c)

FIGURA 17.1 *(a)* Ejemplos de partes comunes fabricadas por medio de procesos de metalurgia de polvos. *(b)* Palanca superior de disparo para un rociador comercial de riego elaborada mediante P/M. Esta parte se produce con una aleación de latón sin plomo; reemplaza a una parte fundida a presión en matriz con un ahorro de 60% del costo. *(c)* Tapas fabricadas por metalurgia de polvos para soportes principales para motores automovilísticos (cojinetes) de 3.8 y 3.1 litros de General Motors. *Fuente: (a)* y *(b)* Reproducido con permiso de *Success Stories on P/M Parts*, 1998. Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, 1998. (c) Cortesía de Zenith Sintered Products, Inc., Milwaukee, Wisconsin.

para aeronaves, como algunos componentes de los trenes de aterrizaje, soportes para montaje de motores, discos para motores, propulsores y bastidores o armaduras para motor de barquillas por medio de P/M.

La metalurgia de polvos ha resultado competitiva con los procesos (como la fundición, el forjado y el maquinado o mecanizado), en particular para partes relativamente complejas fabricadas con aleaciones de alta resistencia y duras. Aunque la mayoría de las partes pesan menos de 2.5 kg (5 libras), pueden llegar hasta 50 kg (100 libras). Se ha demostrado que las piezas de P/M se pueden producir en masa de manera económica, en cantidades que van desde 5000 piezas al año y hasta 100 millones anuales de contrapesos para vibradores de teléfonos celulares.

Los metales más utilizados en la P/M son hierro, cobre, aluminio, estaño, níquel, titanio y los metales refractarios. Para las partes fabricadas con latón, bronce, aceros y aceros inoxidables se emplean *polvos prealeados*, en los que cada partícula de polvo es una aleación. Por lo general, las fuentes de metales son metales y aleaciones a granel, menas, sales y otros compuestos.

17.2 Producción de polvos metálicos

El proceso de metalurgia de polvos consta de las siguientes operaciones, en secuencia (fig. 17.2):

1. **Producción de polvos**
2. **Mezcla**
3. **Compactación**
4. **Sinterizado**
5. **Operaciones de acabado**

17.2.1 Métodos para la producción de polvos

Existen diversos métodos para producir polvos metálicos, la mayoría de los cuales se pueden elaborar mediante más de un método. La elección depende de los requisitos del producto final. La microestructura, las propiedades de la masa y de la superficie, la pureza química, la porosidad, la forma y distribución del tamaño de las partículas dependen del proceso específico que se usó (figs. 17.3 y 17.4). Estas características son importantes, ya que afectan de manera significativa el flujo y la permeabilidad durante la compactación y en las operaciones posteriores de sinterizado. El tamaño de las partículas producidas va de 0.1 a 1000 μm (4 a 0.04 pulgadas).

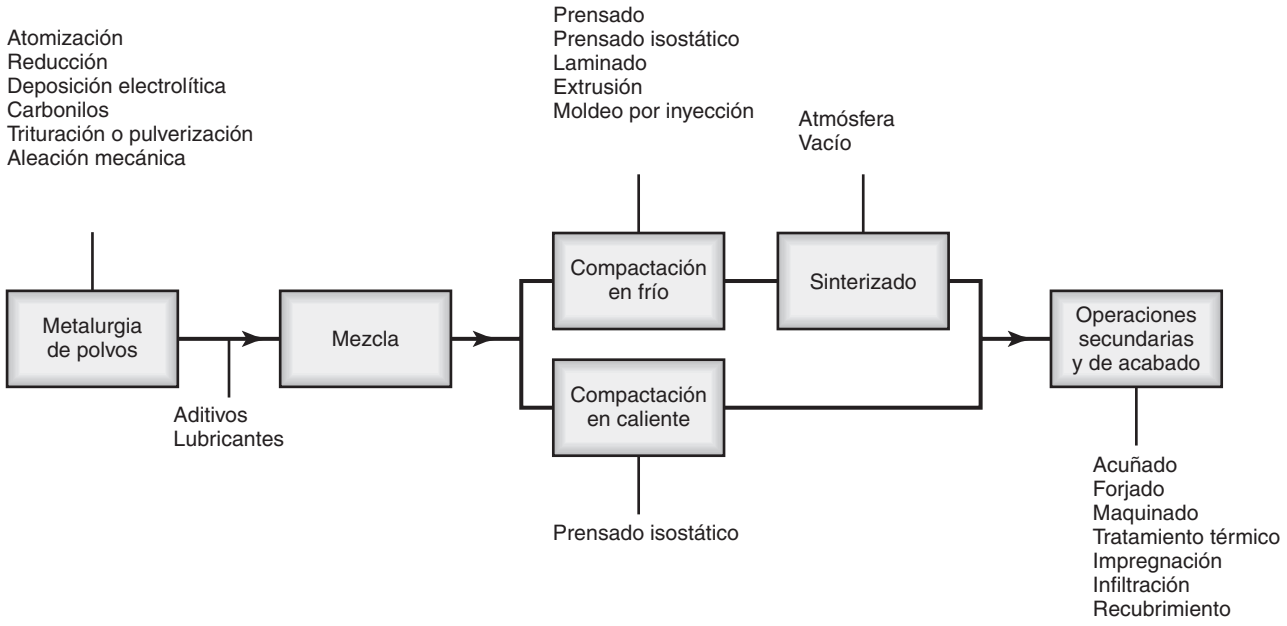


FIGURA 17.2 Resumen de procesos y operaciones comprendidas en la fabricación de partes mediante metalurgia de polvos.

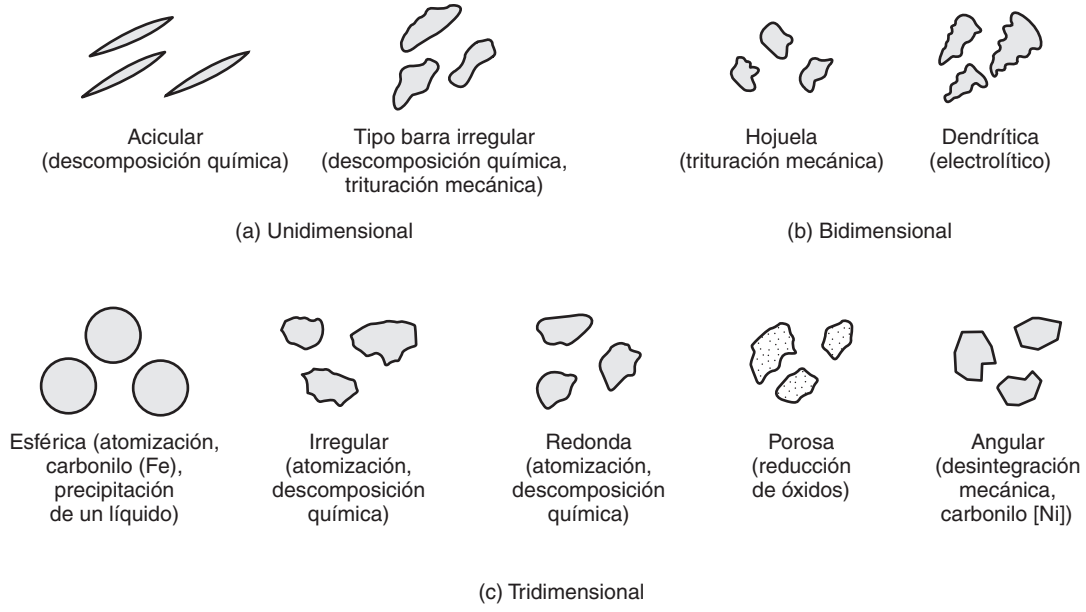
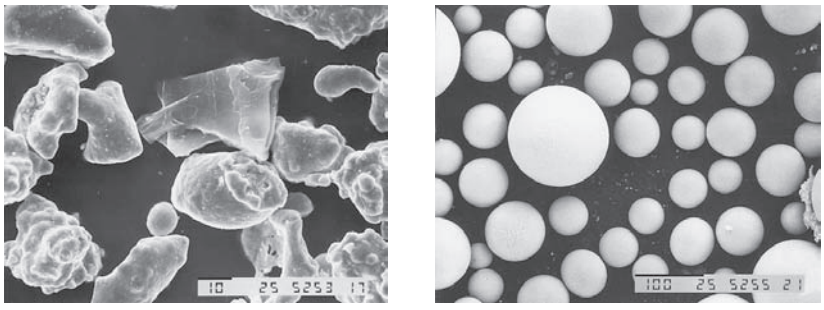


FIGURA 17.3 Forma de las partículas en la metalurgia de polvos y procesos por los cuales se producen. Los polvos de hierro se elaboran por medio de muchos de estos procesos.

Atomización. La atomización produce una corriente de metal líquido cuando se inyecta metal fundido a través de un pequeño orificio. La corriente se divide con chorros de gas inerte o de aire (fig. 17.5a) o agua (fig. 17.5b), lo que se conoce como *atomización por gas* y *por agua*, respectivamente. El tamaño y la forma de las partículas formadas depende de la temperatura del metal fundido, la rapidez del flujo, el tamaño de la boquilla



(a) (b)

FIGURA 17.4 *(a)* Imagen de microscopio electrónico de barrido de las partículas de polvo de hierro fabricadas mediante atomización. *(b)* Partículas de polvo de superaleación de base níquel (Udimet 700) fabricadas mediante el proceso de electrodo giratorio; ver figura 17.5c. *Fuente*: Cortesía de P. G. Nash, Illinois Institute of Technology, Chicago.

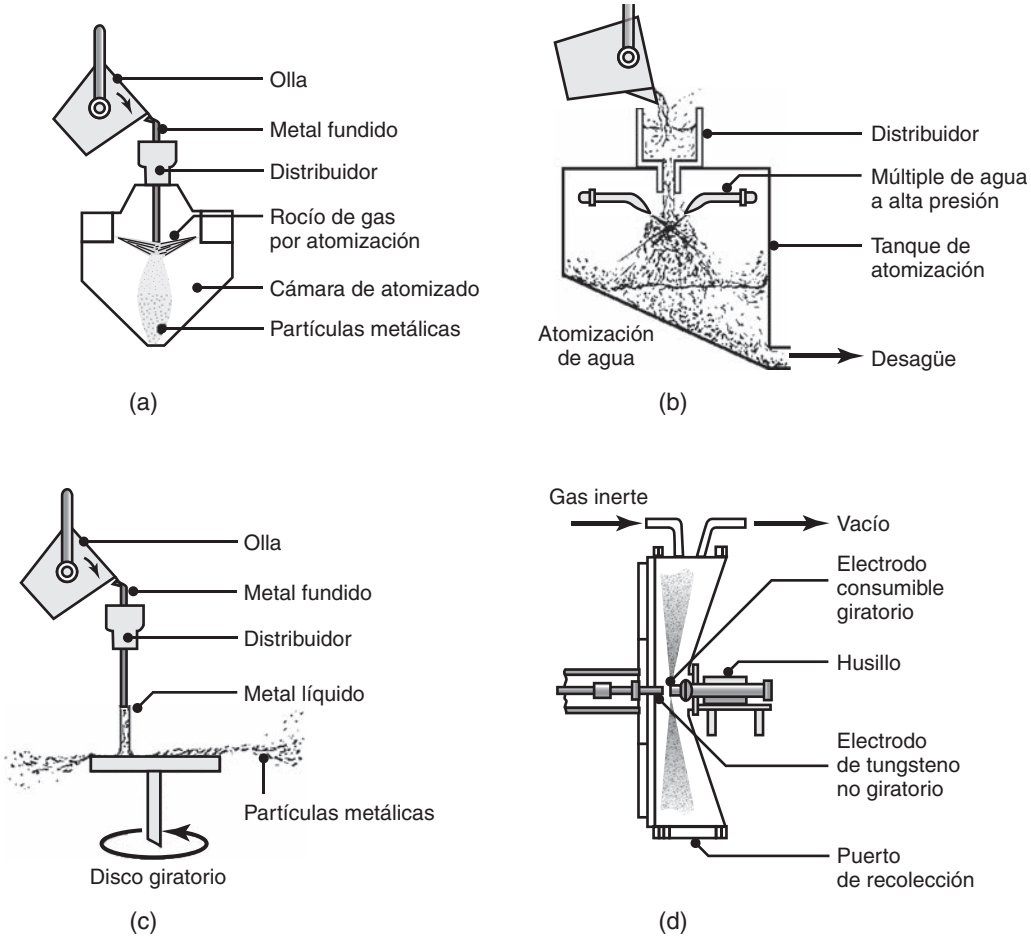


FIGURA 17.5 Métodos de producción de polvos metálicos por atomización: *(a)* atomización de gas; *(b)* atomización de agua; *(c)* atomización con un electrodo consumible giratorio y *(d)* atomización centrífuga con un disco o copa giratoria.

y las características del chorro. El agua produce un lodo de polvo metálico y líquido en el fondo de la cámara de atomización. Aunque es necesario que los polvos se sequen antes de utilizarlos, el agua permite que las partículas se enfríen más rápido y, por ende, velocidades de producción más elevadas. En general, la atomización por gas produce más partículas esféricas (ver fig. 17.3c).

En la *atomización centrífuga*, la corriente de metal fundido cae rápidamente sobre un disco o copa giratoria, de manera que las fuerzas centrífugas dividen la corriente de metal fundido y generan partículas (fig. 17.5c). En una variación de este método, se gira con rapidez un electrodo consumible (a casi 15,000 rev/min) dentro de una cámara llena de helio (fig. 17.5d). La fuerza centrífuga divide la punta fundida del electrodo en partículas metálicas.

Reducción. La *reducción* de óxidos metálicos (es decir, la eliminación de oxígeno) utiliza gases, entre ellos el hidrógeno y el monóxido de carbono, como agentes reductores. Por este medio, óxidos metálicos muy finos son reducidos al estado metálico. Los polvos producidos son esponjosos, porosos y tienen formas esféricas o angulares de tamaño uniforme.

Deposición electrolítica. La *deposición electrolítica* utiliza soluciones acuosas o sales fundidas. Los polvos producidos se encuentran entre los más puros existentes.

Carbonilos. Los *carbonilos metálicos*, como el carbonilo de hierro ($Fe(CO)_5$) y el carbonilo de níquel ($Ni(CO)_4$), se forman al dejar que el hierro o el níquel reaccionen con el monóxido de carbono. Después, los productos de la reacción se descomponen en hierro y níquel y se convierten en partículas pequeñas, densas, de alta pureza, con esfericidad uniforme.

Trituración o pulverización. La *trituración mecánica* (*pulverización*) comprende la trituración (fig. 17.6), molido en un molino de bolas, o esmerilado de metales frágiles o menos dúctiles en pequeñas partículas. Un *molino de bolas* (fig. 17.6b) es una máquina con un cilindro hueco giratorio que se llena parcialmente con bolas de acero o de fundición blanca. En el caso de los materiales frágiles, las partículas de polvo producidas tienen formas angulares; si los metales son dúctiles tienen forma de hojuela y no son particularmente adecuadas para aplicaciones en metalurgia de polvos.

Aleación mecánica. En la *aleación mecánica* se mezclan polvos de dos o más metales puros en un molino de bolas, como se ilustra en la figura 17.7. Debido al impacto de las bolas duras, los polvos se fracturan y se unen por difusión, formando polvos de aleaciones. La fase dispersa puede producir el reforzamiento de las partículas o proporcionar propiedades eléctricas o magnéticas especiales al polvo.

Métodos diversos. Otros métodos que se utilizan de manera poco común para hacer polvos son:

- **Precipitación** de una solución química.
- Producción de virutas finas de metal por medio de **maquinado.**
- **Condensación de vapor**.

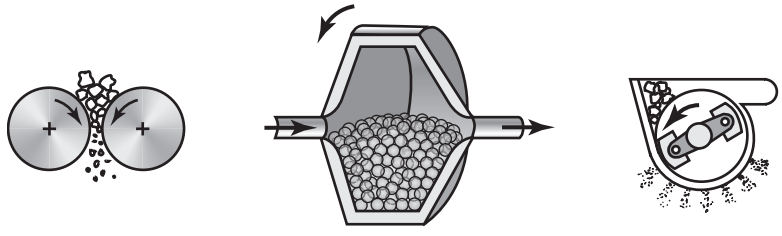


FIGURA 17.6 Métodos de trituración mecánica para obtener partículas finas: *(a)* pulverización con rodillo; *(b)* molino de bolas y *(c)* molido con martillo.

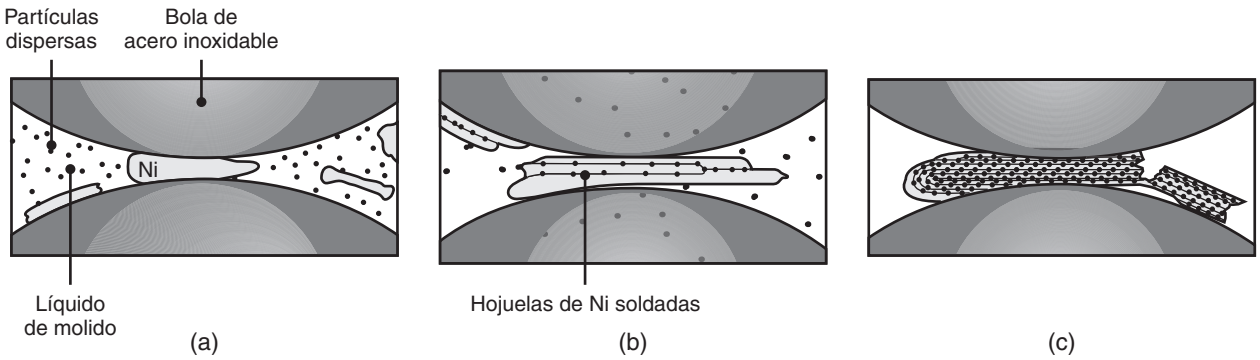


FIGURA 17.7 Aleación mecánica de partículas de níquel con partículas dispersas más pequeñas. Al aplanarse las partículas de níquel entre dos bolas, la segunda fase, más pequeña, se imprime en la superficie del níquel y al final se dispersa a través de la partícula debido a los eventos sucesivos de aplanado, fractura y soldado.

Desarrollos más recientes incluyen las técnicas basadas en *procesos metalúrgicos extractivos de alta temperatura*, que se basan en la reacción de halogenuros volátiles (compuesto de halógeno y un elemento electropositivo) con metales líquidos y la reducción controlada y reducción/carburación de óxidos sólidos.

Nanopolvos. Los desarrollos más recientes incluyen la producción de *nanopolvos* de cobre, aluminio, hierro, titanio y diversos metales (ver también *nanomateriales* en la sección 6.16). Debido a que estos polvos son pirofóricos (se encienden de manera espontánea) o se contaminan de inmediato al exponerlos al aire, se embarcan como lodos espesos bajo hexano gaseoso (que por sí mismo es altamente volátil y combustible). Cuando el material se somete a una gran deformación plástica mediante compresión y cizallado a niveles de esfuerzo de 5500 MPa (800 ksi) durante el proceso de los polvos, se reduce el tamaño de las partículas, en tanto que el material queda libre de poros y posee propiedades mejoradas.

Polvos microencapsulados. Estos polvos metálicos se recubren por completo con un aglutinante. Para aplicaciones eléctricas (como los componentes magnéticos de bobinas de ignición y otras aplicaciones por pulsos de CA y CD), el aglutinante actúa como aislante, el cual evita que la electricidad fluya entre las partículas, reduciendo así las pérdidas por corrientes de eddy (corrientes parásitas). Los polvos se compactan mediante prensado a temperatura media y se utilizan con el aglutinante todavía existente. (Ver también *moldeo por inyección de polvos*, sección 17.3.3).

17.2.2 Tamaño, forma y distribución de las partículas

Por lo general, el *tamaño de las partículas* se mide por medio de *tamizado,* es decir, pasando el polvo metálico a través de tamices (*cribas*) con diversos tamaños de malla. El análisis del tamizado se realiza mediante una pila vertical de tamices, con el tamaño cada vez más fino de malla conforme el polvo pasa hacia abajo a través de los tamices. Cuanto más grande es el tamaño de la malla, más pequeña es la abertura en el tamiz. Por ejemplo, una malla de tamaño 30 tiene una abertura de 600 μm, el tamaño 100 tiene 150 μm y el tamaño 400 tiene 38 μm. (Este método es similar a la numeración de los granos abrasivos. Cuanto más grande es el número, más pequeño será el tamaño de la partícula abrasiva).

Además del análisis del tamiz, existen diversos métodos para analizar el tamaño de las partículas:

1. **Sedimentación**, que comprende la medición de la rapidez a la que las partículas se sedimentan en un fluido.
2. **Análisis microscópico**, que puede incluir el uso de la microscopía electrónica de transmisión y de barrido.

3. **Dispersión de la luz** de un láser que ilumina una muestra constituida por partículas suspendidas en un medio líquido. Las partículas hacen que la luz se disperse; después un detector digitaliza las señales y calcula la distribución del tamaño de las partículas.
4. **Óptico** (como el de las partículas que bloquean un rayo de luz), que después se detecta mediante una fotocelda.
5. **Partículas suspendidas** en un líquido, cuyo tamaño y distribución se detecta después mediante sensores eléctricos.

Forma de las partículas. La forma de las partículas, que afecta en gran medida las características de su procesamiento, por lo general se describe en términos de relación de aspecto o factor de forma. La *relación de aspecto* es la relación de la dimensión más grande respecto de la dimensión más pequeña de la partícula. Esta relación va de la unidad (para una partícula esférica) hasta aproximadamente 10, para partículas con forma de hojuela o de aguja.

Factor de forma (SF, por sus siglas en inglés). También conocido como *índice de forma*, es una medida de la relación del área de la superficie de la partícula respecto de su volumen, que se normaliza por referencia a una partícula esférica de volumen equivalente. Por lo tanto, el factor de forma de una hojuela es más alto que el de una esfera.

Distribución de tamaño. La distribución del tamaño de las partículas es un factor que debe considerarse, porque afecta las características de procesamiento del polvo. Se determina en términos de la gráfica de *frecuencia y distribución* (ver la sección 36.7 para más detalles). Al valor máximo se le conoce como *tamaño de modo* (o *de la moda*).

Otras propiedades de los polvos metálicos que tienen un efecto sobre su comportamiento durante el procesamiento son: *(a)* las *propiedades de flujo,* cuando se llenan las matrices o dados, *(b)* la *compresibilidad,* cuando se compactan, *(c)* la *densidad*, como se define en diversos términos como la densidad teórica, la densidad aparente y la densidad al momento en que el polvo se sacude o se golpea ligeramente dentro de la cavidad de la matriz.

17.2.3 Mezcla de polvos metálicos

La *mezcla* (combinación) de los polvos es el siguiente paso en el procesamiento de la metalurgia de polvos. Se realiza con los siguientes propósitos:

- Se pueden mezclar polvos de diferentes metales y otros materiales con el fin de proporcionar propiedades y características físicas y mecánicas especiales al producto de la P/M. Obsérvese que se pueden producir combinaciones de metales aleándolos antes de elaborar un polvo, o se pueden producir las mezclas. La combinación adecuada es fundamental para garantizar la uniformidad de las propiedades mecánicas en toda la pieza.
- Aun cuando se utiliza un solo metal, los polvos pueden variar significativamente en tamaño y forma, por lo que deben mezclarse para obtener uniformidad entre las piezas. La combinación ideal es aquella en la que todas las partículas de cada material (y de cada tamaño y morfología) se distribuyen de manera uniforme.
- Se pueden mezclar *lubricantes* con los polvos para mejorar sus características de flujo. Reducen la fricción entre las partículas metálicas, mejoran el flujo de los polvos metálicos en las matrices y mejoran la vida de la matriz. En general, los lubricantes son ácido esteárico o estearato de zinc en una proporción de 0.25% a 5% en peso.
- Se utilizan otros aditivos: *aglutinantes* (como en los moldes de arena) para desarrollar suficiente *resistencia en verde (crudo)* (ver la sección 17.3) y también se pueden usar aditivos para facilitar el sinterizado.

La mezcla de polvos debe efectuarse en condiciones controladas para evitar la contaminación o el deterioro. Éste se debe a un mezclado excesivo, que puede alterar la forma de las partículas y hacer que se endurezcan por trabajo, dificultando así la operación

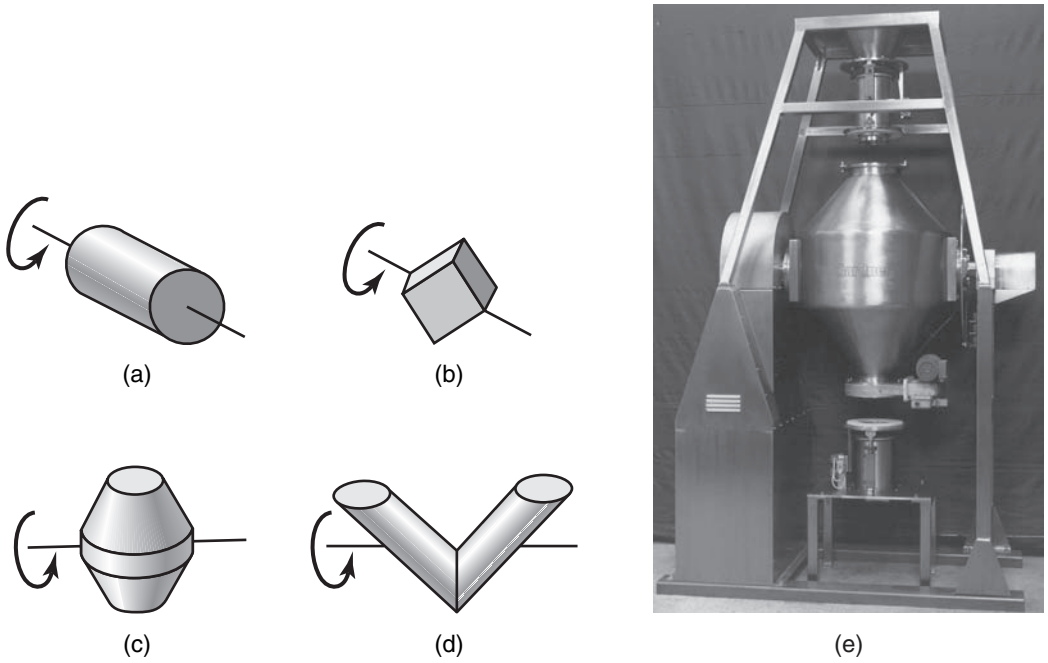


FIGURA 17.8 *(a)* a *(d)* Algunas figuras comunes de recipientes para combinar o mezclar polvos. *(e)* Mezclador adecuado para mezclar polvos metálicos. Dado que éstos son abrasivos, los mezcladores se basan en la rotación o volteado de figuras cerradas, al contrario del uso de agitadores agresivos. *Fuente:* Cortesía de Kemutec Group, Inc.

posterior de compactado. Los polvos se pueden mezclar en aire, en atmósferas inertes (para evitar la oxidación) o en líquidos (que actúan como lubricantes y hacen que la mezcla sea más uniforme). Existen diversos tipos de equipo de mezclado (fig. 17.8).

Riesgos. Debido a su alta relación de área de superficie a volumen, los polvos metálicos pueden ser explosivos, en especial el aluminio, magnesio, titanio, zirconio y torio. Es necesario tener mucho cuidado durante su mezclado, almacenamiento y manejo. Algunas precauciones incluyen: *(a)* conexión del equipo a tierra, *(b)* evitar las chispas (utilizando herramientas que no las produzcan) y la fricción como fuentes de calor, y *(c)* evitar nubes de polvo, las llamas descubiertas y las reacciones químicas.

17.3 Compactación de los polvos metálicos

La *compactación* es el paso en el que se prensan los polvos mezclados para darles diversas formas dentro de las matrices, como se muestra en la figura 17.9. Los propósitos de la compactación son obtener la forma, densidad y contacto de partícula con partícula necesarios y hacer que la pieza tenga suficiente resistencia para su proceso posterior. El polvo (*materia prima*) es introducido en la matriz mediante una zapata de alimentación y el punzón superior desciende hacia el interior de la matriz. Las prensas utilizadas son las accionadas por medios hidráulicos o mecánicos y, por lo general, el proceso se realiza a temperatura ambiente, aunque puede efectuarse a temperaturas elevadas.

Al polvo prensado se le conoce como **comprimido crudo** o **compactado en verde**, ya que tiene una resistencia baja, como se ve en las partes crudas en la fundición en barbotina (sección 18.2.1). Las partes crudas o en verde son muy frágiles (similares a un gis) y se pueden desmoronar o dañar con mucha facilidad; esta situación se exacerba por medio de prácticas deficientes de prensado. Para obtener resistencias más elevadas en verde, el polvo se debe proporcionar de manera adecuada a la cavidad de la matriz y tienen que desarrollarse las presiones adecuadas en toda la pieza.

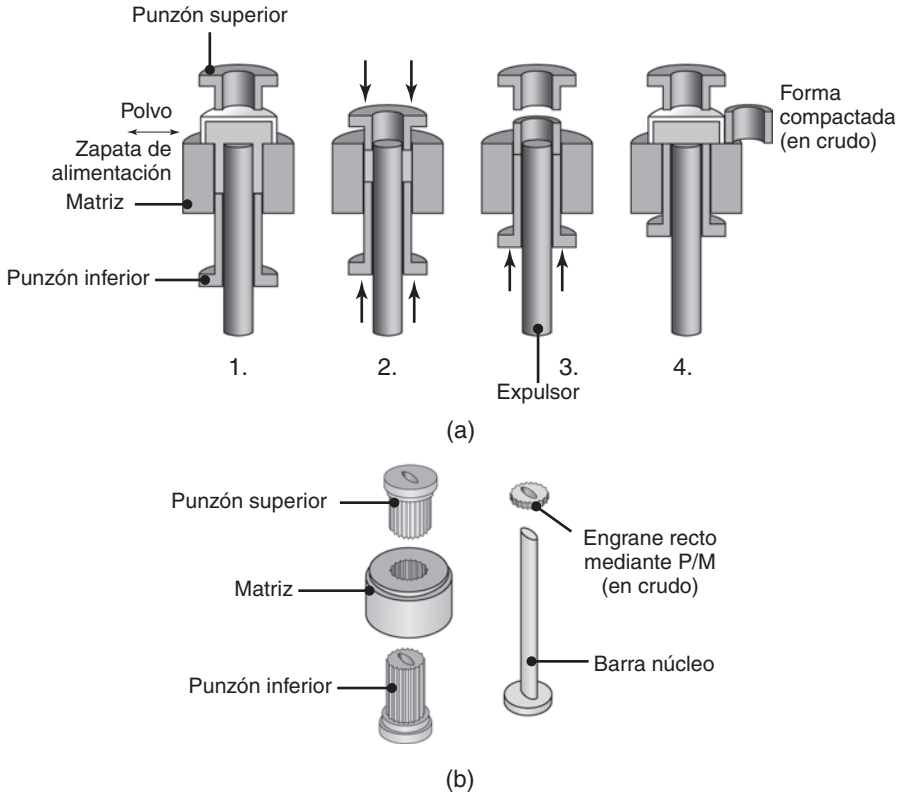


FIGURA 17.9 *(a)* Compactación de polvos metálicos para formar un buje. A la parte de polvo prensado se le conoce como compactado crudo o en verde. *(b)* Juego típico de herramental y matriz para compactar un engrane recto. *Fuente*: Cortesía de Metal Powder Industries Federation.

La *densidad* del comprimido crudo o en verde depende de la presión aplicada (fig. 17.10a). Conforme aumenta la presión de compactación, la densidad del comprimido se aproxima a la del metal en su forma sólida. Un factor importante en la densidad es la distribución del tamaño de las partículas: si todas son del mismo tamaño, siempre habrá cierta porosidad al momento de compactarlas; en teoría, una porosidad de por lo menos 24% en volumen. (Por ejemplo, si observa una caja llena con pelotas de tenis, notará que siempre hay espacios vacíos entre éstas). Al introducir partículas más pequeñas en la mezcla de polvo, se llenan los espacios entre las partículas grandes del polvo y de esa manera se obtiene una densidad superior en el compactado (ver también *aluminio poroso*, sección 6.2).

Cuanto más alta sea la densidad de la pieza compactada, más elevada serán su resistencia y módulo elástico (fig. 17.10b). La razón es que cuanto más alta es la densidad, más alta es la cantidad de metal sólido en el mismo volumen y, por lo tanto, su resistencia es mayor (resistencia a fuerzas externas). Debido a la fricción entre *(a)* las partículas metálicas del polvo y *(b)* las superficies del punzón y las paredes de la matriz, la densidad en el interior de la parte puede variar en forma considerable. Esta variación se puede minimizar con el diseño adecuado del punzón y de la matriz y mediante el control de la fricción. Por ejemplo, podría ser necesario utilizar punzones múltiples con movimientos independientes, a fin de garantizar que la densidad sea más uniforme en toda la parte (fig. 17.11). Recuérdese una discusión similar relacionada con el compactado de arena en la fabricación de moldes (ver fig. 11.7). Sin embargo, la variación de densidad puede ser deseable en componentes como engranes, levas, bujes y partes estructurales. Por ejemplo, es posible aumentar la densidad en lugares críticos en los que son importantes la resistencia elevada y la resistencia al desgaste, y reducirla en donde no lo son.

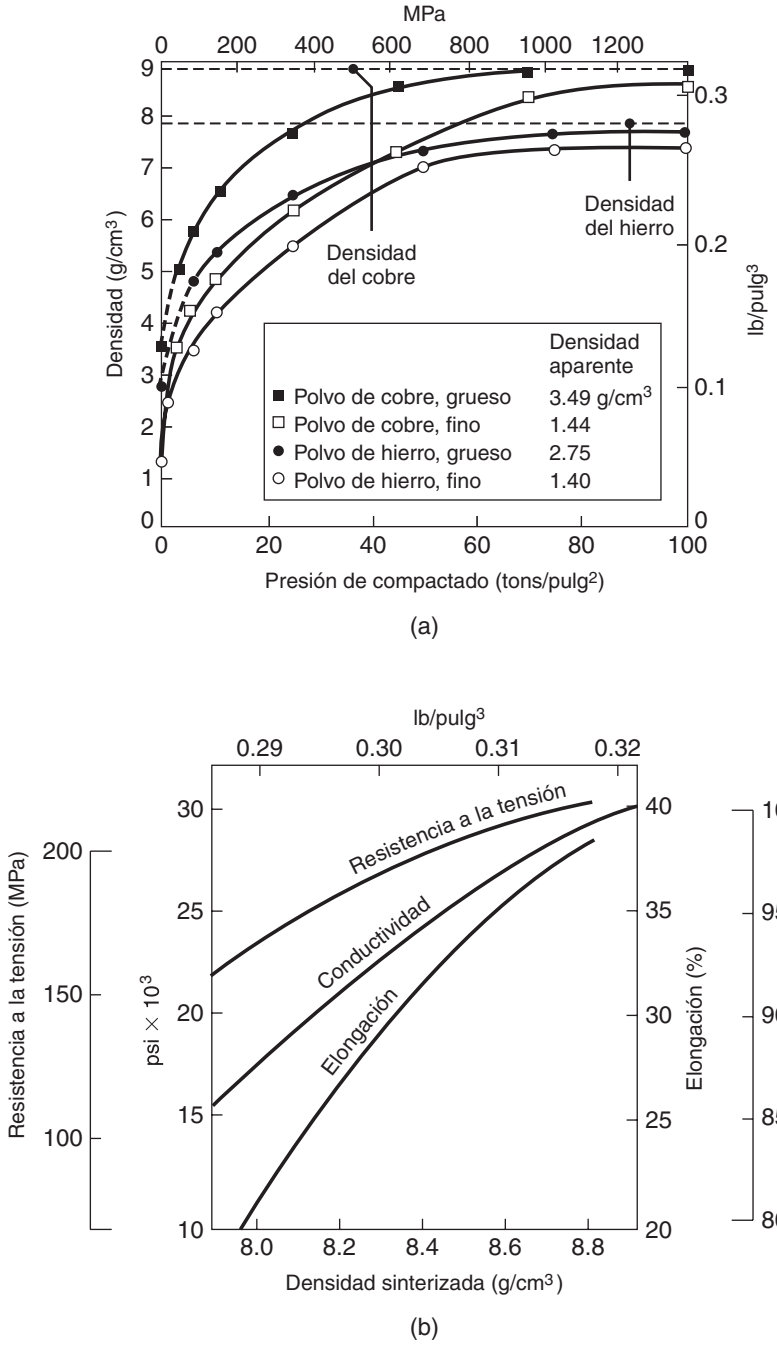


FIGURA 17.10 *(a)* Densidad de compactados de polvo de cobre y hierro en función de la presión de compactado. La densidad influye en gran medida en las propiedades mecánicas y físicas de las partes de P/M. *(b)* Efecto de la densidad en la resistencia a la tensión, la elongación y la conductividad eléctrica del polvo de cobre. *Fuente: (a)* F. V. Lenel, *(b)* IACS: Internacional Annealed Copper Standard (para conductividad eléctrica).

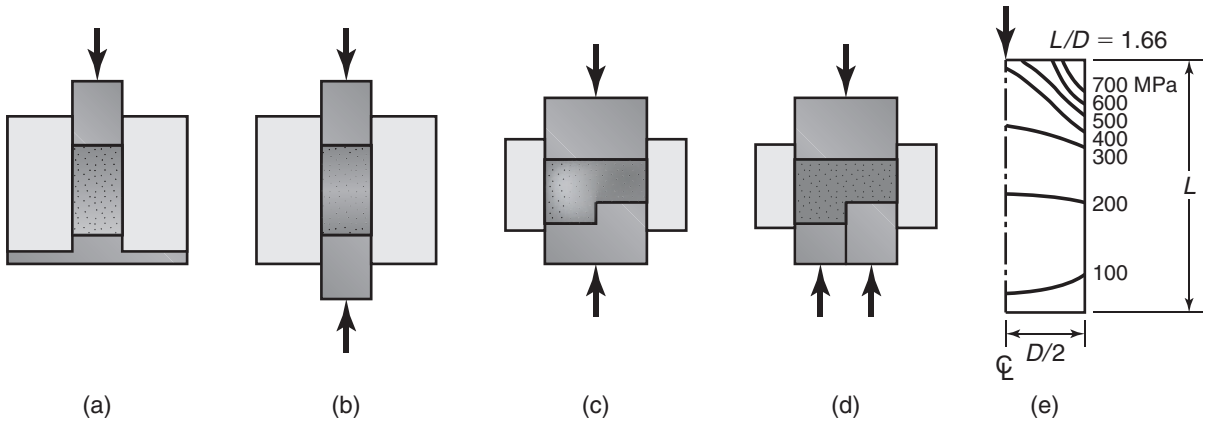


FIGURA 17.11 Variación de la densidad al compactar polvos metálicos en diversas matrices: *(a)* y *(c)* prensa de acción simple; *(b)* y *(d)* prensa de doble acción. Obsérvese en *(d)* la mayor uniformidad de la densidad al prensar con dos punzones con movimiento independiente, en comparación con *(c)*. *(e)* Perfiles de presión en polvo de cobre compactado en una prensa de acción simple. *Fuente*: P. Duwez y L. Zwel.

17.3.1 Equipo

La presión requerida para prensar polvos metálicos va de 70 MPa (10 ksi) (para el aluminio) a 800 MPa (120 ksi) (para piezas de hierro de alta densidad) (ver la tabla 17.1). La presión necesaria para compactado depende de las características y la forma de las partículas, del método de mezclado y del lubricante.

Las capacidades de prensado van de 1.8 a 2.7 MN (200 a 300 toneladas), aunque se utilizan prensas con mucha mayor capacidad para aplicaciones especiales. La mayoría de las aplicaciones requieren menos de 100 toneladas. Para tonelajes pequeños se usan prensas mecánicas tipo cigüeñal (manivela) o excéntricas; para capacidades superiores, se emplean prensas de balancín (rótula) o de junta articulada (palanca) (ver fig. 14.17c). Se pueden utilizar prensas hidráulicas (fig. 17.12) con capacidades tan elevadas como 45 MN (5000 toneladas) para partes grandes. La selección de la prensa depende del tamaño de la pieza y su configuración, los requisitos de densidad y la capacidad de producción. Sin embargo, cuanto más alta sea la velocidad de prensado, mayor será la tendencia de la prensa a atrapar aire en la cavidad de la matriz y, de esta manera, evitar la compactación adecuada.

TABLA 17.1

Presiones de compactado para diversos polvos

Metal	Presión (MPa)
Aluminio	70–275
Latón	400–700
Bronce	200–275
Hierro	350–800
Tantalio	70–140
Tungsteno	70–140
Otros materiales	
Óxido de aluminio	110–140
Carbono	140–165
Carburos cementados	140–400
Ferritas	110–165



FIGURA 17.12 Prensa mecánica de 7.3 MN (825 toneladas) para compactar polvos metálicos. *Fuente:* Cortesía de Cincinnati Incorporated.

17.3.2 Prensado isostático

Los comprimidos crudos o en verde se pueden someter a *presión hidrostática* para lograr una compactación más uniforme y, por lo tanto, densidad.

En el **prensado isostático en frío** (CIP, por sus siglas en inglés), el polvo metálico se coloca en un molde de hule flexible, comúnmente fabricado con hule neopreno, uretano, cloruro de polivinilo u otro elastómero (fig. 17.13). Después se presuriza el ensamble hidrostáticamente en una cámara, por lo general utilizando agua. La presión más común es 400 MPa (60 ksi), aunque se pueden usar presiones hasta de 1000 MPa (150 ksi). En la figura 17.14 se muestran las capacidades del CIP y de otros métodos de compactado en términos de tamaño y complejidad de la pieza. Una aplicación común se da en revestimientos de cilindros automovilísticos.

Por lo general, en el **prensado isostático en caliente** (HIP, por siglas en inglés), el contenedor se fabrica de una hoja de metal de alto punto de fusión y el medio de presurización es gas inerte de alta temperatura o un fluido vítreo (similar al vidrio) (fig. 17.15). Las condiciones comunes para el HIP son presiones elevadas hasta de 100 MPa (15 ksi), aunque pueden ser tres veces más altas, y a una temperatura de 1200 °C (2200 °F). La ventaja

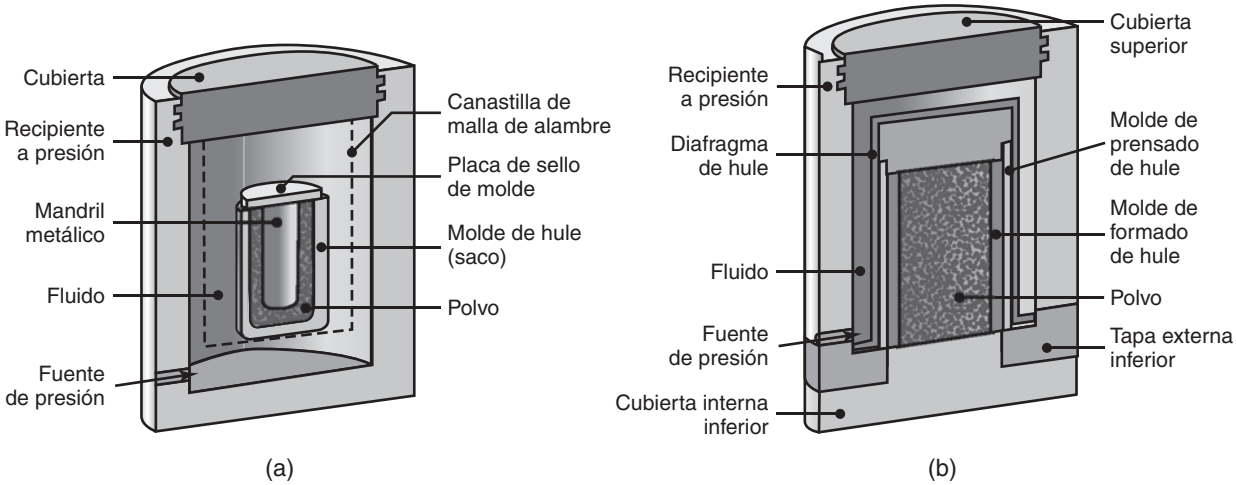


FIGURA 17.13 Diagrama esquemático del prensado isostático en frío, aplicado para el formado de un tubo. El polvo se encierra en un contenedor flexible alrededor de una barra de núcleo sólido. Se aplica presión isostática al ensamble dentro de una cámara de alta presión. *Fuente*: Reimpreso con permiso de R. M. German, *Powder Metallurgy Science*. Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, 1984.

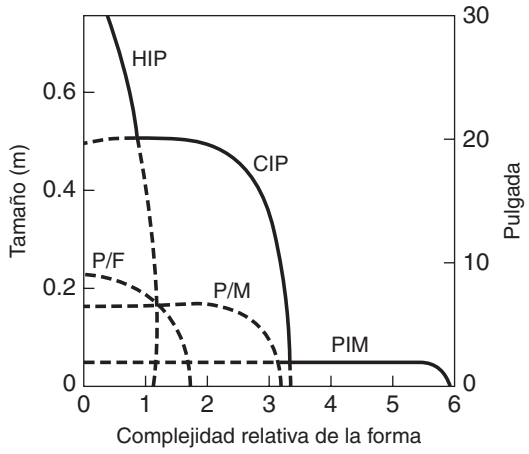


FIGURA 17.14 Capacidades de diversas operaciones de P/M, con respecto al tamaño de la parte y la complejidad de la forma. P/F significa forjado de polvos. *Fuente:* Cortesía de Metal Powder Industries Federation.

principal del HIP es su capacidad para producir compactados que tienen casi 100% de densidad, buen enlace metalúrgico de las partículas y buenas propiedades mecánicas, por lo que ha ganado una amplia aceptación en la fabricación de piezas de alta calidad.

El proceso de HIP se utiliza principalmente en la fabricación de componentes de superaleaciones para las industrias aeronáutica y aeroespacial, y en aplicaciones militares, médicas y químicas. También se emplea: *(a)* para cerrar la porosidad interna, *(b)* para mejorar las propiedades en las fundiciones de superaleaciones y de aleaciones de titanio para la industria aeroespacial, y *(c)* como paso de densificación final para las herramientas de corte de carburo de tungsteno y carburos y aceros para herramientas de la P/M.

Las principales ventajas del prensado isostático son las siguientes:

- Debido a la uniformidad de la presión en todas direcciones y la ausencia de fricción en las paredes de la matriz, produce compactados totalmente densos, con una es-

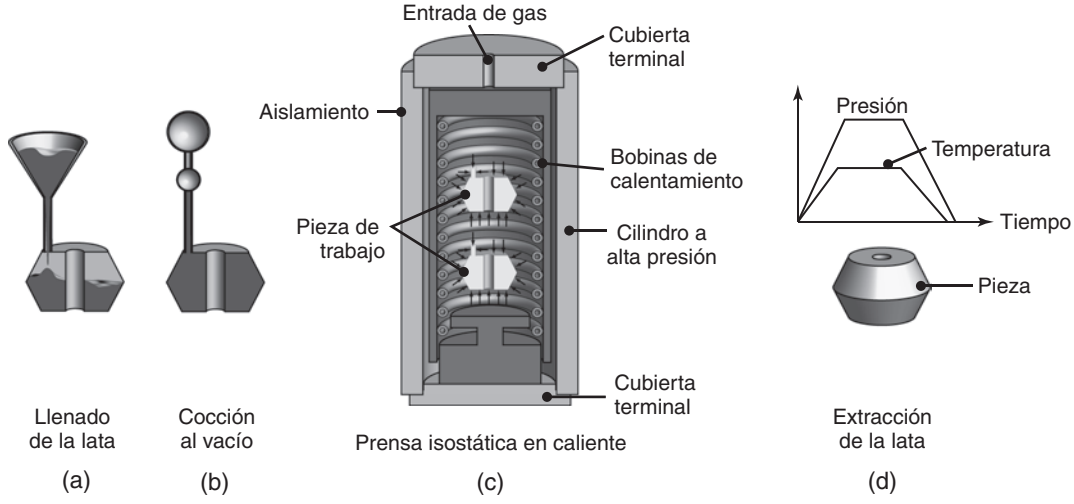


FIGURA 17.15 Esquema de prensado isostático en caliente. En el diagrama se muestra la variación de presión y temperatura contra tiempo.

tructura y densidad de granos uniformes (propiedades isotrópicas), sin considerar la forma de la pieza. Se han producido partes con altas relaciones de longitud a diámetro, con densidad muy uniforme, resistencia, tenacidad y buen detalle de superficie.

- El HIP tiene la capacidad de manejar partes mucho más grandes que las de otros procesos de compactado.

Las limitaciones del HIP son las siguientes:

- Tiene tolerancias dimensionales más amplias que las obtenidas en otros procesos de compactado.
- El costo del equipo y el tiempo de producción son superiores a los requeridos en otros procesos.
- Sólo se aplica a cantidades relativamente pequeñas de producción; por lo general, menos de 10,000 partes o piezas al año.

EJEMPLO 17.1 Prensado isostático en caliente de un elevador de válvula

En la figura 17.16 se muestra un elevador de válvulas con revestimiento de HIP utilizado en toda una gama de motores a diesel de uso medio a pesado para camiones. El elevador de válvulas de 0.2 kg (0.45 libra) se monta en el árbol de levas y abre y cierra las válvulas del motor. Como tal, es deseable que tenga una capa o cara de carburo de tungsteno resistente al desgaste y un eje de acero resistente a la fatiga. Antes de que se desarrollara el elevador de válvulas de HIP, se producían partes por medio de soldadura fuerte en un horno, pero provocaban fallas ocasionales en el campo y valores relativamente altos de desperdicio. La producción anual requerida de estas partes es de casi 400,000, de manera que los altos valores de desperdicio son objetables.

El producto de revestimiento HIP consta de una cara o capa de carburo de tungsteno (WC) con 9% de Co como aglutinante, fabricada con polvo (prensado y sinterizado), un casquete de lámina metálica de acero montado sobre el disco de WC, una capa intermedia de lámina de aleación de cobre y un eje de acero. El casquete se suelda con un haz de electrones al eje de acero y después el ensamble se prensa isostáticamente en caliente para obtener una unión muy resistente. El prensado HIP se efectúa a 1010 °C (1850 °F), a una presión de 100 MPa (15,000 psi). La superficie de carburo de tungsteno tiene una densidad de 14.52 a 14.72 g/cm^3, una dureza de 90.8 $\pm$5 HRA y una resistencia a la ruptura transversal mínima de 2450 MPa (355,000 psi).

Las operaciones secundarias se limitan al rectificado de la cara a fin de eliminar cualquier protuberancia del casquete de lámina metálica para exponer la superficie de

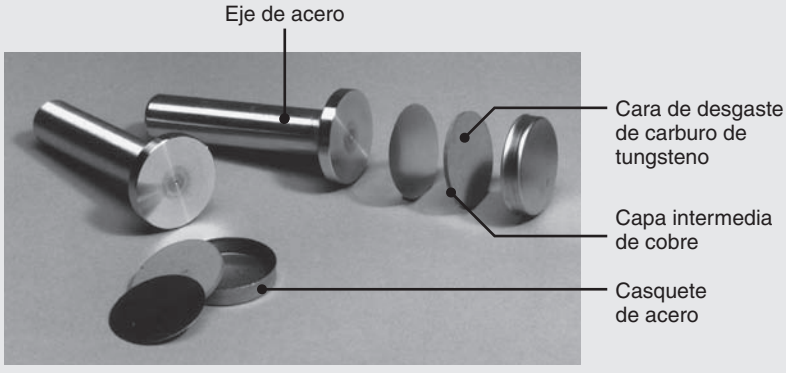


FIGURA 17.16 Elevador de válvulas para motores diesel de uso rudo producido a partir de un casquete de carburo prensado isostáticamente en caliente sobre un eje de acero. *Fuente:* Cortesía de Metal Powder Industries Federation y Bodycote, Inc.

carburo de tungsteno resistente al desgaste. La alta confiabilidad de la unión de HIP redujo en gran medida los valores del desperdicio a menos de 0.2%. Durante casi cuatro años no se han experimentado fallas de campo en la producción total. Los costos de producción también se redujeron en gran medida debido al paso de prensado isostático en caliente.

Fuente: Cortesía de Metal Powder Industry Federation.

17.3.3 Procesos diversos de compactado y moldeado

Moldeado por inyección de polvo (PIM, por sus siglas en inglés). En este proceso (también conocido como **moldeado por inyección de metales** [MIM]), se mezclan polvos metálicos muy finos (<10 μm) con 25% a 45% de un aglutinante de polímero o a base de cera. Después, la mezcla se somete a un proceso similar a la fundición en dado o matriz (sección 11.3.5; ver también *moldeo de plásticos por inyección* en la sección 19.3); se inyecta en el molde a una temperatura de entre 135 °C y 200 °C (275 °F a 400 °F). Las partes crudas moldeadas se colocan en un horno a baja temperatura para quemar el plástico (*desaglutinado*), o se elimina el aglutinante por medio de la extracción de solventes. Después se sinterizan las partes en un horno a temperaturas altas hasta de 1375 °C (2500 °F). También se pueden realizar operaciones posteriores (como roscado de orificios y tratamiento térmico).

Por lo general, los metales adecuados para el moldeo por inyección de polvo son los que se funden a temperaturas superiores a 1000 °C (1830 °F); ejemplos de ello son los aceros al carbono e inoxidables, los aceros para herramientas, el cobre, el bronce y el titanio. Las partes comunes fabricadas por este método son los componentes de relojes, cañones de armas de pequeño calibre, anillos de extensión para rifles, bisagras de puertas, propulsores para sistemas aspersores y bisturís.

Las ventajas principales del moldeo por inyección de polvo sobre la compactación convencional son las siguientes:

- Se pueden moldear y después extraer de las matrices con facilidad, formas complejas con espesores de pared tan pequeños como 5 mm (0.2 pulgada).
- Las propiedades mecánicas son casi iguales a las de los productos forjables.
- Las tolerancias dimensionales son buenas.
- Se pueden lograr altas capacidades de producción mediante matrices de cavidades múltiples.
- Las partes producidas mediante el proceso PIM compiten de manera adecuada contra las partes pequeñas de fundición por revestimiento, las forjas pequeñas y las partes complejas maquinadas. Sin embargo, no compiten bien con la fundición a presión de zinc y aluminio ni con el maquinado de roscas.

Las principales limitaciones del PIM son el alto costo y la disponibilidad limitada de polvos metálicos finos.

Laminado. En el *laminado de polvo* (también conocido como **compactación laminar**), el polvo metálico se introduce o alimenta dentro del espacio de laminación en un molino de laminación dúo (fig. 17.17) y se compacta como banda continua a velocidades de hasta 0.5 m/s (100 pies/min). El proceso de laminado se puede efectuar a temperatura ambiente o elevada. Mediante este proceso puede fabricarse lámina metálica para componentes eléctricos y electrónicos y para monedas.

Extrusión. Los polvos se pueden compactar por medio de *extrusión*, con la cual el polvo se encierra en un contenedor metálico y se extruye en caliente. Después de sinterizarse, las partes preformadas mediante P/M se pueden volver a calentar y forjar en un dado o matriz cerrada para darle su forma final. Por ejemplo, los polvos de superaleaciones se extruyen en caliente para mejorar sus propiedades.

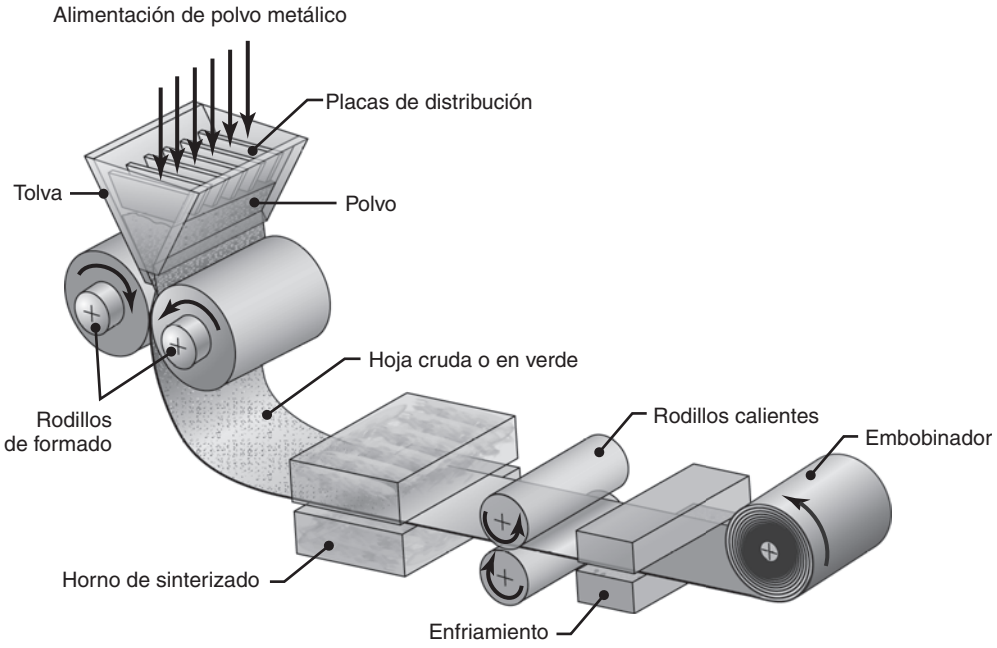


FIGURA 17.17 Ilustración de laminado de polvos.

Compactación sin presión. En la *compactación sin presión*, la matriz se llena con polvo metálico por medio de gravedad y el polvo se sinteriza directamente en la matriz. Debido a la baja densidad resultante, la compactación sin presión se utiliza sobre todo para partes metálicas porosas, como filtros.

Deposición por rocío. La deposición por rocío (aspersión) es un *proceso de generación de formas* (fig. 17.18). Los componentes básicos de dicho proceso para polvos metálicos son: *(a)* un atomizador, *(b)* una cámara de rocío con atmósfera inerte, y *(c)* un molde para producir preformas. El molde se puede fabricar dándole diversas formas, como palanquillas, tubos, discos y cilindros.

Aunque existen muchas variaciones, la más conocida es el *proceso Osprey* que se muestra en la figura 17.18. Después de atomizar un metal, se deposita sobre un molde de preforma enfriado, por lo general fabricado con cobre o material cerámico, donde se solidifica. Las partículas metálicas se aglutinan, desarrollando una densidad que normalmente es de más de 99% de la densidad del metal sólido. Las formas de deposición por

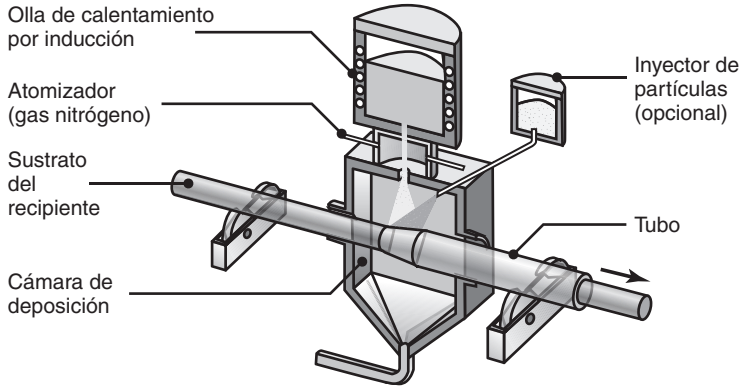


FIGURA 17.18 Deposición por rociado (*proceso Osprey*) en el que el metal fundido se rocía sobre un mandril giratorio para producir tubería sin costura.

rocío se pueden someter a procesos de formado y consolidación adicionales, como forjado, laminado y extrusión. El tamaño de los granos es fino y las propiedades mecánicas son comparables a las de los productos forjables fabricados con la misma aleación.

Moldes cerámicos. Los moldes de material cerámico para dar forma a los polvos metálicos se fabrican por medio de técnicas utilizadas en la fundición por revestimiento. Después de fabricar el molde, se llena con polvo metálico y se coloca en un contenedor de acero. El espacio entre el molde y el contenedor se llena con el material en partículas. Luego se evacua el contenedor, se sella y se somete a prensado isostático en caliente. Con este proceso se han fabricado rotores para compresores de aleación de titanio para motores de misiles.

17.3.4 Materiales para punzones y matrices

La selección de los materiales para punzones y matrices para la metalurgia de polvos depende de cuán abrasivo es el polvo metálico y del número de piezas a producir. La mayoría de los materiales comunes para dados o matrices son los aceros para herramientas endurecibles al aire o aceite (como D2 o D3), con rango de dureza de 60 a 64 HRC (tabla 5.7). Debido a su dureza y resistencia al desgaste superiores, las matrices de carburo de tungsteno se utilizan para aplicaciones más severas. Por lo general, los punzones se fabrican con materiales similares.

El control dimensional de las matrices y los punzones debe ser muy estricto, ya que es fundamental para una compactación adecuada y para la vida de las matrices. Un espacio demasiado grande entre el punzón y la matriz permite que el polvo metálico se meta en la separación, donde interfiere severamente en la operación y provoca partes excéntricas. Por lo general, las holguras diametrales son menores a 25 μm (0.001 pulgada). Las superficies de las matrices y los punzones se deben lapear o pulir (en la dirección de los movimientos de la herramienta en la matriz) para mejorar la vida de la matriz y el rendimiento general.

17.4 Sinterizado

El *sinterizado* es el proceso mediante el cual los compactados crudos o en verde se calientan en un horno de atmósfera controlada a una temperatura por debajo del punto de fusión, pero lo suficientemente elevada para permitir que se unan (fusionen) las partículas individuales. Como ya hemos visto, el comprimido crudo o en verde es frágil y su resistencia (*resistencia en crudo*) es baja. La naturaleza y resistencia de la unión entre las partículas y, por lo tanto, la del compactado sinterizado, depende de los complejos mecanismos de difusión, flujo plástico, evaporación de materiales volátiles en el compactado, recristalización, crecimiento de los granos y contracción de los poros.

Las variables principales en la sinterización son la temperatura, el tiempo y la atmósfera del horno. Por lo general, las temperaturas de sinterización (tabla 17.2) se en-

TABLA 17.2

Temperatura y tiempo de sinterización para diversos metales

Material	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
Cobre, latón y bronce	760–900	10–45
Hierro y hierro-grafito	1000–1150	8–45
Níquel	1000–1150	30–45
Aceros inoxidables	1100–1290	30–60
Aleaciones de álnico (para imanes permanentes)	1200–1300	120–150
Ferritas	1200–1500	10–600
Carburo de tungsteno	1430–1500	20–30
Molibdeno	2050	120
Tungsteno	2350	480
Tantalio	2400	480

cuentran en el intervalo de 70% a 90% del punto de fusión del metal o la aleación (ver tabla 3.1). Los tiempos de sinterización (tabla 17.2) van de un mínimo de unos 10 minutos para aleaciones de hierro y cobre, hasta 8 horas para tungsteno y tantalio.

Los hornos de sinterización continua, que se utilizan en la mayor parte de la producción, tienen tres cámaras:

1. *Cámara de quemado* para volatilizar los lubricantes del compactado crudo, a fin de mejorar la resistencia de la unión y evitar agrietamientos.
2. *Cámara de alta temperatura* para sinterización.
3. *Cámara de enfriamiento*.

Si se desea obtener propiedades óptimas, es importante controlar adecuadamente la atmósfera del horno para una sinterización exitosa. Una atmósfera sin oxígeno es fundamental para controlar el carburado y descarburado de los compactados de hierro y de base hierro, además de evitar la oxidación de los polvos. Por lo general, se utiliza un vacío para sinterizar aleaciones de metal refractario y aceros inoxidables. Los gases más empleados para la sinterización son hidrógeno, amoníaco disociado o quemado, gases de hidrocarburos parcialmente quemados y nitrógeno.

Los mecanismos de sinterización son complejos y dependen tanto de la composición de las partículas metálicas como de los parámetros del procesamiento. Los mecanismos de sinterizado son *difusión, transporte de la fase vapor* y *sinterizado de la fase líquida.* Al aumentar la temperatura, dos partículas adyacentes de polvo empiezan a formar una unión por medio de un **mecanismo de difusión** (*unión de estado sólido*, fig. 17.19a); en consecuencia, se incrementan la resistencia, densidad, ductilidad y conductividades térmica y eléctrica del compactado. Sin embargo, al mismo tiempo, el compactado se contrae, de ahí que se deban considerar tolerancias para la contracción, como se hace en fundición.

Un segundo mecanismo de sinterización es el **transporte de la fase vapor** (fig. 17.19b). Dado que el material se calienta muy cerca de su temperatura de fusión, algunos átomos del metal se liberan de las partículas como fase vapor. En geometrías convergentes (la interfaz entre dos partículas), la temperatura de fusión es localmente más alta y la fase vapor se solidifica de nuevo. Por lo tanto, la interfaz crece y se refuerza, en tanto que cada partícula se contrae como un todo.

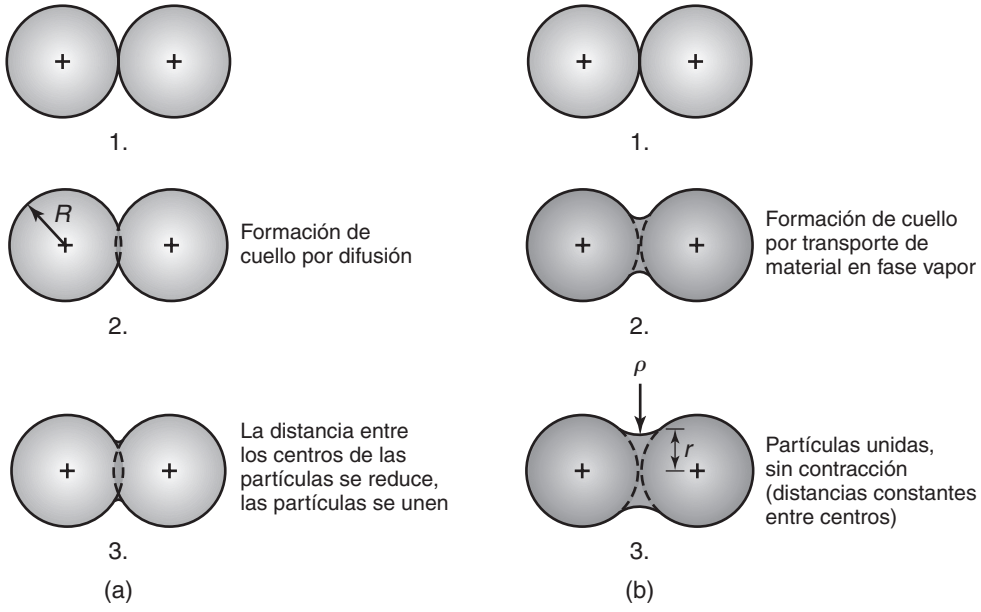


FIGURA 17.19 Esquema de dos mecanismos para sinterización de polvos metálicos: *(a)* transporte de material de estado sólido, y *(b)* transporte de material de fase vapor. R = radio de la partícula, r = radio del cuello y ρ = radio del perfil del cuello.

Si dos partículas adyacentes son de diferentes metales, la *aleación* puede ocurrir en la interfaz entre las dos partículas. Si una de ellas tiene un punto de fusión inferior al de la otra, entonces se funde y (debido a la tensión superficial) rodea la partícula que no se ha fundido. Conocida como **sinterización de fase líquida**, un ejemplo de este mecanismo es el cobalto en herramentales y matrices de carburo de tungsteno (ver ejemplo 17.4 y también la sección 22.4). De esta manera se pueden obtener partes más resistentes y densas. En el **sinterizado por chispa** (proceso experimental), los polvos metálicos sueltos se colocan en un molde de grafito calentado por medio de corriente eléctrica, se someten a una descarga de alta energía y se compactan; todo en un solo paso.

Propiedades mecánicas. Dependiendo de la temperatura, el tiempo y la historia del procesamiento, se pueden obtener diferentes estructuras y porosidades en un compactado sinterizado y así afectar sus propiedades. La porosidad no se puede eliminar por completo porque *(a)* quedan huecos después del compactado, y *(b)* se desarrollan gases durante el sinterizado. La porosidad puede consistir en una *red* de poros interconectados u *orificios cerrados*. Por lo general, si la densidad del material es menor a 80% de su densidad teórica, los poros se interconectan. Aunque la porosidad reduce la resistencia del producto de la P/M, es una característica importante para fabricar filtros y rodamientos metálicos y para permitir la infiltración de lubricantes líquidos por medio de la tensión superficial.

En la tabla 17.3 se presentan las propiedades mecánicas comunes para diversas aleaciones sinterizadas mediante P/M. En la tabla 17.4 se dan las diferencias entre las propiedades mecánicas de metales forjables contra la P/M. Para evaluar más a fondo las diferencias entre las propiedades de los metales y aleaciones de la P/M, forjables y fundidos, compara esta tabla con las proporcionadas en las partes I y II.

TABLA 17.3

Propiedades mecánicas de materiales seleccionados de P/M

Denominación	Tipo MPIF	Condición	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Módulo elástico (GPa)	Dureza	Elongación en 25 mm (%)
Ferrosos					70		
FC-0208	N	AS	225	205	70	45 HRB	<0.5
		HT	295	—	110	95 HRB	<0.5
	R	AS	415	330	110	70 HRB	1
		HT	550	—	130	35 HRC	<0.5
	S	AS	550	395	130	80 HRB	1.5
		HT	690	655	145	40 HRC	<0.5
FN-0405	S	AS	425	240	145	72 HRB	4.5
		HT	1060	880	160	39 HRC	1
	T	AS	510	295	160	80 HRB	6
		HT	1240	1060		44 HRC	1.5
Aluminio							
601 AB, barra prensada		AS	110	48	—	60 HRH	6
		HT	252	241	—	75 HRH	2
Latón							
CZP-0220	T	—	165	76	—	55 HRH	13
	U	—	193	89	—	68 HRH	19
	W	—	221	103	—	75 HRH	23
Titanio							
Ti-6Al-4V		HIP	917	827	—	—	13
Superaleaciones							
Estelite 19		—	1035	—	—	49 HRC	<1

MPIF: Metal Powder Industries Federation. AS = sólo sinterizado, HT = con tratamiento térmico, HIP = prensado isostático en caliente.

TABLA 17.4

Comparación de propiedades mecánicas de algunos metales forjados y de P/M equivalentes (sólo sinterizados)

Metal	Condición	Densidad (%)	UTS (MPa)	Elongación en 50 mm (%)
Aluminio				
2014-T6	Forjado (W)	—	480	20
	P/M	94	330	2
6061-T6	W	—	310	15
	P/M	94	250	2
Cobre, OFHC	W, recocido	—	235	50
	P/M	89	160	8
Latón, 260	W, recocido	—	300	65
	P/M	89	255	26
Acero, 1025	W, laminado en caliente	—	590	25
	P/M	84	235	2
Acero inoxidable, 303	W, recocido	—	620	50
	P/M	82	360	2

Nota: La densidad y resistencia de los materiales de P/M aumentan mucho con el procesamiento adicional, como forjado, prensado isostático y tratamientos térmicos.

En la tabla 17.5 se muestran los efectos de diversos procesos de manufactura en las propiedades mecánicas de una aleación de titanio. Obsérvese que el titanio prensado isostáticamente en caliente (HIP) tiene propiedades que son similares a las del titanio fundido y forjado. Sin embargo, cabe recordar que a menos que se forjen con precisión, por lo general las forjas requieren ciertos procesos adicionales de maquinado y acabado que quizás un componente de P/M no requiera.

TABLA 17.5

Comparación de propiedades mecánicas de la aleación de titanio Ti-6AL-4V

Proceso (*)	Densidad (%)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Elongación (%)	Reducción de área (%)
Fundida	100	840	930	7	15
Fundida y forjada	100	875	965	14	40
Mezclado elemental (P + S)	98	786	875	8	14
Mezclado elemental (HIP)	>99	805	875	9	17
Prealeado (HIP)	100	880	975	14	26

(*) P + S = prensado y sinterizado, HIP = prensado isostáticamente en caliente.
Fuente: Cortesía de R. M. German.

EJEMPLO 17.2 Contracción en sinterización

En la unión de estado sólido durante la sinterización de un compactado crudo o en verde de polvos metálicos, la contracción lineal es 4%. Si la densidad sinterizada deseada es 95% de la densidad teórica del metal, ¿cuál sería la densidad del compactado crudo?

Solución La contracción lineal se define como $\Delta L/L_0$, donde L_0 es la longitud original. La contracción volumétrica durante la sinterización es:

$$V_{\text{sint}} = V_{\text{crudo}}\left(1 - \frac{\Delta L}{L_0}\right)^3 \tag{17.1}$$

El volumen del compactado en verde debe ser mayor al de la parte sinterizada, pero la masa no cambia durante el sinterizado, por lo que podemos escribir nuevamente esta expresión en términos de la densidad, ρ:

$$\rho_{\text{cruda}} = \rho_{\text{sint}}\left(1 - \frac{\Delta L}{L_o}\right)^3 \tag{17.2}$$

Por lo tanto,

$$\rho_{\text{cruda}} = 0.95(1 - 0.04)^3 = 0.84 \text{ u } 84\%$$

17.5 Operaciones secundarias y de acabado

Para mejorar más las propiedades de los productos sinterizados mediante la P/M, o para proporcionarles características especiales, se pueden efectuar operaciones adicionales después de la sinterización.

1. El **acuñado** y **dimensionamiento** son operaciones de compactado que se realizan a alta presión en prensas. Los propósitos de estas operaciones son proporcionar precisión dimensional a la pieza sinterizada y mejorar su resistencia y acabado superficial mediante densificación adicional.
2. Los compactados *preformados* y *sinterizados* de polvo aleado se pueden **forjar** después en frío o en caliente para darles las formas finales deseadas y, en algunas ocasiones, mediante *forjado por impacto*. Estos productos tienen un buen acabado superficial, buenas tolerancias dimensionales y tamaño de grano fino y uniforme. Las propiedades superiores obtenidas hacen que esta tecnología sea particularmente apropiada para aplicaciones como los componentes automovilísticos y de motores a reacción sometidos a esfuerzos elevados.
3. Las partes de polvos metálicos se pueden someter a otras operaciones de acabado como:
   - **Maquinado:** para producir diversas características geométricas mediante fresado, taladrado y roscado (para producir orificios roscados).
   - **Rectificado:** para mejorar la precisión dimensional y el acabado superficial.
   - **Recubrimiento:** para mejorar la apariencia y la resistencia al desgaste y a la corrosión.
   - **Tratamiento térmico:** para mejorar la dureza y la resistencia.
4. La porosidad inherente de los componentes de la P/M se puede utilizar **impregnándolos** con un fluido. Los rodamientos y bujes que se lubrican internamente hasta con 30% de aceite en volumen se fabrican al sumergir el rodamiento sinterizado en aceite caliente. Estos rodamientos tienen un suministro continuo de lubricante (debido a la acción capilar) durante su vida útil (también se los conoce como *lubricados permanentemente*). Las uniones universales se fabrican asimismo por medio de técnicas de P/M impregnadas con grasa, por lo que ya no requieren los accesorios tradicionales para la grasa.
5. La **infiltración** es un proceso por el cual se pone en contacto un lodo de un metal de punto de fusión inferior con la parte sinterizada. Después se calienta el montaje a una temperatura suficientemente alta para fundir el lodo. El metal fundido se infiltra en los poros mediante la acción capilar y produce una parte relativamente libre de poros, con una buena densidad y resistencia. La aplicación más común es la infiltración de compactados con base de hierro mediante cobre. Las ventajas de la infiltración es que se mejoran la dureza y la resistencia a la tensión de la parte y se llenan los poros, por lo que se evita la penetración de humedad (que puede provocar corrosión). Además, dado que es deseable cierta porosidad cuando se utiliza un infiltrante, la parte puede sinterizarse sólo parcialmente, lo que produce una distorsión térmica inferior.

EJEMPLO 17.3 Engranes producidos por metalurgia de polvos para un tractor de jardín

Se han fabricado de manera competitiva engranes que utilizan polvos de alta calidad, los cuales tienen alta compresibilidad y, por ello, requieren bajas presiones de compactado. Estas partes tienen densidad de media a alta y son adecuadas para aplicaciones severas, con cargas elevadas, y para superficies de alto desgaste. En una aplicación, se produjo un engrane de reducción para un tractor de jardín a partir de polvo de hierro y se infiltró con cobre. A pesar de que su resistencia era aceptable, la razón de desgaste bajo cargas elevadas era demasiado alta. El desgaste produjo la pérdida del perfil de los dientes, carga lateral en los rodamientos y alto nivel de ruido. Para mejorar la resistencia y la resistencia al desgaste, se seleccionó un nuevo polvo que contenía 2.0% de Ni, 0.5% de C y 0.5% de Mo; el resto era polvo de hierro atomizado. Debido al tamaño de la pieza, las cargas de prensado eran muy altas.

Se rediseñó la parte y el herramental se hizo con tres punzones para compactar la pieza a tres densidades diferentes. Toda la parte requirió una carga de compactado de 4 MN (450 toneladas). Por este método se obtuvo alta densidad en las secciones de la parte que requerían resistencia y resistencia al desgaste elevadas. La alta densidad también permitió la carburación de la pieza para mejorar su dureza. La parte presinterizada se prensó de nuevo (a una densidad superior de 7.3 a 7.5 g/cm^3 en el área dentada) para mejorar la resistencia, en tanto que el cubo del engrane permaneció a su densidad de prensado de 6.4 a 6.6 g/cm^3. El peso del engrane era de 1 kg (2.25 libras).

EJEMPLO 17.4 Producción de carburo de tungsteno para herramentales y matrices o dados

El carburo de tungsteno es un material importante para herramentales y dados o matrices, sobre todo debido a su dureza, resistencia y resistencia al desgaste en una amplia variedad de temperaturas. En la fabricación de carburos se utilizan las técnicas de metalurgia de polvos. Primero, se mezclan los polvos de tungsteno y carbono en un molino de bolas o en un mezclador giratorio. La mezcla, que es básicamente 94% de W y 6% de C (en peso), se calienta a unos 1500 °C (2800 °F) en un horno de inducción al vacío. Como consecuencia, el tungsteno se carburiza y forma carburo de tungsteno en forma de polvo fino. A éste se le agrega después un agente aglutinante (por lo general, cobalto) junto con un fluido orgánico, como hexano, y la mezcla se muele en un molino de bolas para producir una mezcla uniforme y homogénea. Este proceso puede tardar varias horas, o incluso días.

La mezcla se seca y consolida, por lo general mediante el compactado en frío y bajo presiones de casi 200 MPa (30,000 psi). Después se sinteriza la parte en una atmósfera de hidrógeno u horno de vacío a una temperatura de entre 1350 °C y 1600 °C (2500 °F a 2900 °F), dependiendo de su composición. A esta temperatura, el cobalto se encuentra en fase líquida y actúa como aglutinante para las partículas de carburo. Los polvos también se pueden prensar en caliente a la temperatura de sinterización mediante matrices o dados de grafito.

El carburo de tungsteno sufre una contracción lineal de casi 16% durante el sinterizado, lo que corresponde a una contracción volumétrica de alrededor de 40%. En consecuencia, el control del tamaño y de la forma es importante para producir herramientas con las dimensiones y tolerancias deseadas. También se puede producir una combinación de otros carburos (como el de titanio y el de tantalio) por medio de este método, utilizando mezclas fabricadas mediante el método descrito. La tendencia es utilizar partículas cada vez más finas para mejorar las propiedades mecánicas de las estructuras de dicho compósito.

17.6 Consideraciones de diseño

Dadas las propiedades únicas de los polvos metálicos, sus características de flujo en la matriz y la fragilidad de los compactados crudos o en verde, existen ciertos principios de diseño que es necesario seguir (figs. 17.20 a 17.22).

1. La forma del compactado debe ser lo más simple y uniforme posible. Deben evitarse cambios abruptos de contorno, secciones delgadas, variaciones de espesor y las relaciones altas longitud a diámetro.
2. Deben tomarse precauciones para expulsar el compactado crudo de la matriz sin dañarlo, por lo que los orificios o depresiones tienen que ser paralelos al eje de avance del punzón. También deben proveerse biseles para evitar daños a las orillas durante la expulsión.
3. Las partes producidas mediante P/M se deben producir con las tolerancias dimensionales más amplias aceptables (congruentes con las aplicaciones a las que se destinan), para aumentar la vida de los herramentales y matrices y reducir los costos de producción.
4. Por lo general, el espesor de las paredes de la pieza no debe ser menor a 1.5 mm (0.060 pulgada); sin embargo, con cuidado especial se pueden prensar con éxito paredes delgadas hasta de 0.34 mm (0.0135 pulgada) en componentes de 1 mm (0.04 pulgada) de longitud. Las paredes con relaciones de longitud a espesor mayores a 8:1 son difíciles de prensar y las variaciones de densidad son virtualmente inevitables.
5. Se pueden producir escalones en las partes si son simples y su tamaño no excede 15% de la longitud total de la parte. Se pueden prensar escalones más grandes, pero requieren herramental más complejo, de movimientos múltiples.
6. Se pueden prensar letras si están orientadas de manera perpendicular a la dirección del prensado y se pueden realzar o rebajar. Las letras realzadas son más susceptibles a daños en la etapa cruda y también evitan el apilamiento durante el sinterizado.
7. Los rebordes o salientes se pueden producir mediante un escalón en el dado. Sin embargo, los rebordes grandes pueden romperse con la expulsión y requerir herramental más elaborado. Un reborde largo debe incorporar un ángulo de salida alrededor del mismo, un radio en la arista inferior y un radio en la unión del reborde y/o el cuerpo del componente para reducir las concentraciones de esfuerzo y la probabilidad de fractura.

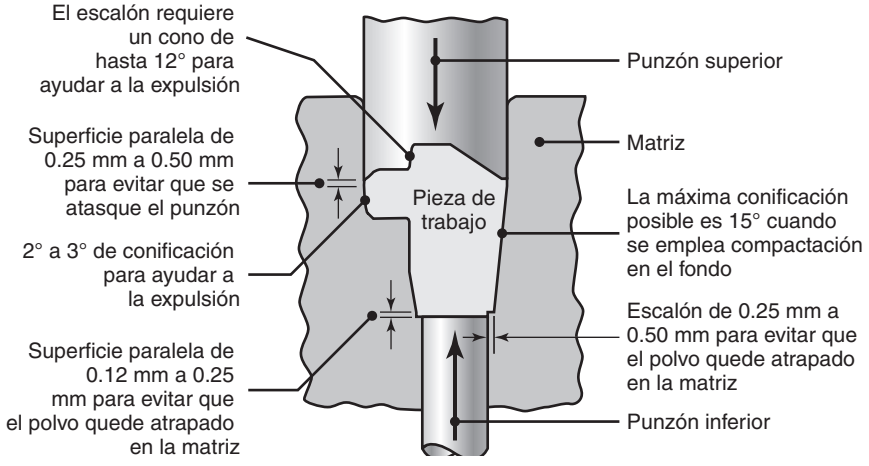


FIGURA 17.20 Geometría y características de diseño de la matriz o dado para compactación de polvos metálicos. *Fuente*: Cortesía de Metal Powder Industries Federation.

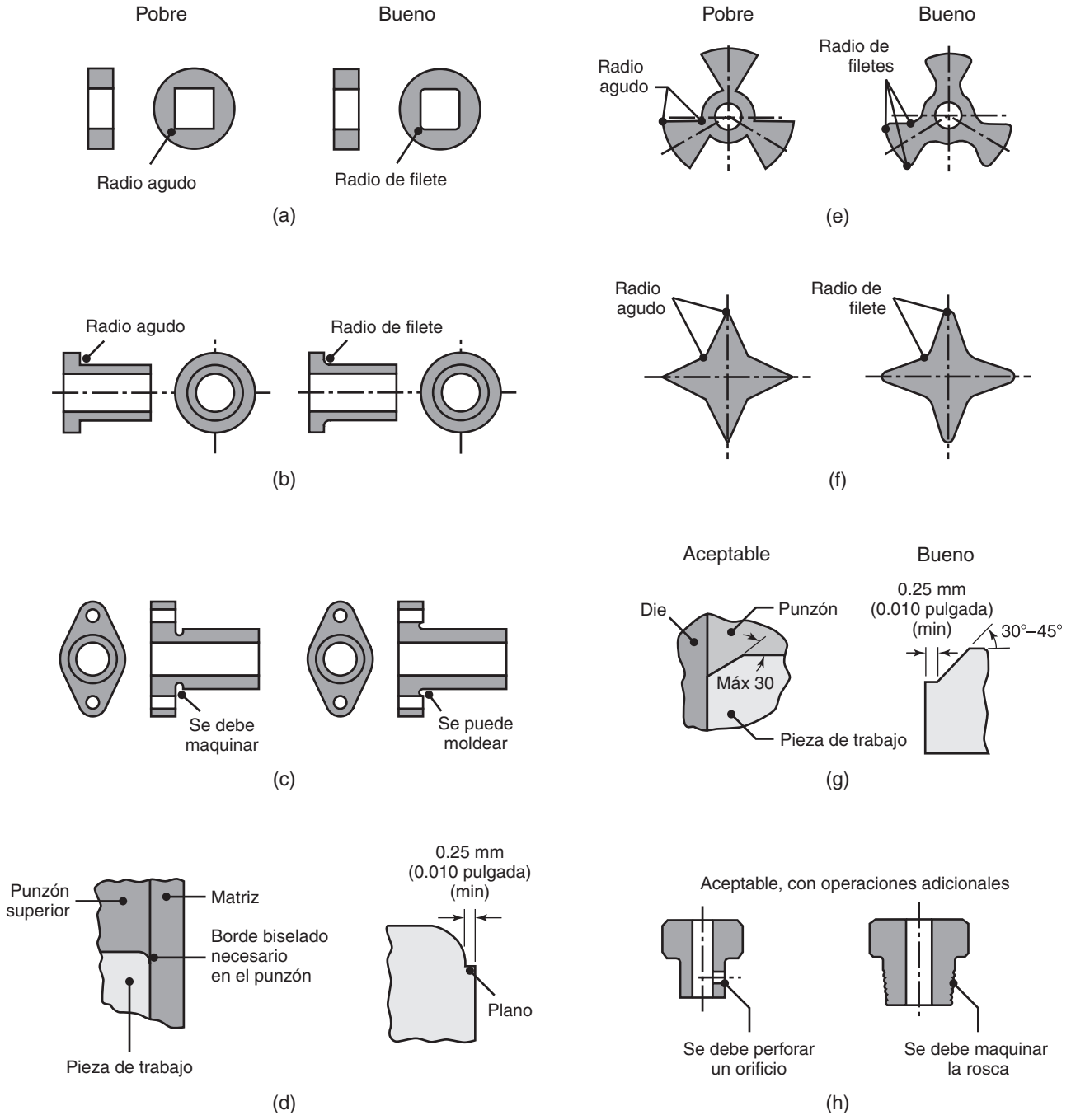


FIGURA 17.21 Ejemplos de partes de P/M que muestran diseños pobres y buenos. Obsérvese que deben evitarse los radios agudos y las esquinas entrantes, y que las cuerdas y los orificios transversales tienen que producirse por separado mediante operaciones adicionales de maquinado. *Fuente:* Cortesía de Metal Powder Industries Federation.

8. No se puede prensar un radio verdadero en la orilla de una parte porque requeriría que el punzón se biselara en forma vertical (que se conificara ligeramente) hasta un espesor de cero, como se muestra en la figura 17.21d. Es preferible prensar chaflanes o planos, y un método común de diseño es un ángulo de 45° en un plano de 0.25 mm (0.010 pulgada).
9. Las chavetas, las ranuras de chavetas y los orificios utilizados para transmitir torques en engranes y poleas se pueden formar durante la compactación de polvos. Es

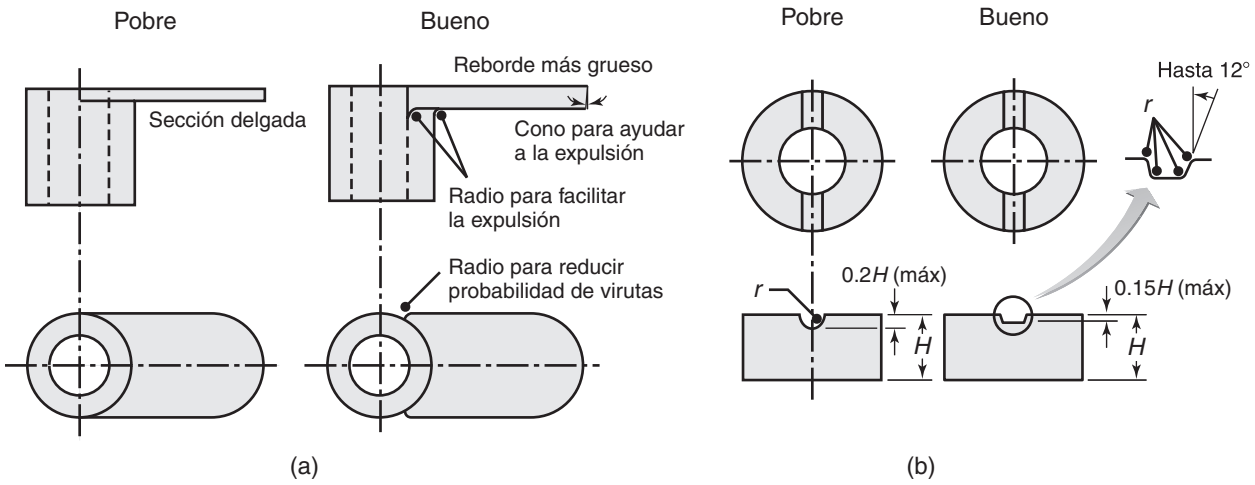


FIGURA 17.22 *(a)* Características de diseño para uso con rebordes sin soporte. *(b)* Características de diseño para su uso con ranuras. *Fuente:* Cortesía de Metal Powder Industries Federation.

posible producir resaltes siempre que se utilicen ángulos de salida adecuados y su longitud sea pequeña en comparación con el componente en general.

10. Se pueden hacer muescas y ranuras si se orientan perpendicularmente en la dirección del prensado. Se recomienda que las ranuras circulares no excedan una profundidad de 20% de todo el componente y que las ranuras rectangulares no excedan 15%.
11. Las partes producidas mediante moldeo por inyección de polvos tienen restricciones similares de diseño a las del moldeo por inyección de los polímeros. Con el PIM, los espesores de pared deben ser uniformes para minimizar la distorsión durante el sinterizado. Además, los moldes se deben diseñar con transiciones tersas para evitar la acumulación de polvo y permitir la distribución uniforme del mismo (fig. 17.23).
12. Por lo general, las tolerancias dimensionales de las partes sinterizadas mediante P/M son del orden de ±0.05 a 0.1 mm (±0.002 a 0.004 pulgada). Las tolerancias mejoran de modo significativo con operaciones adicionales, como dimensionamiento, maquinado y rectificado.

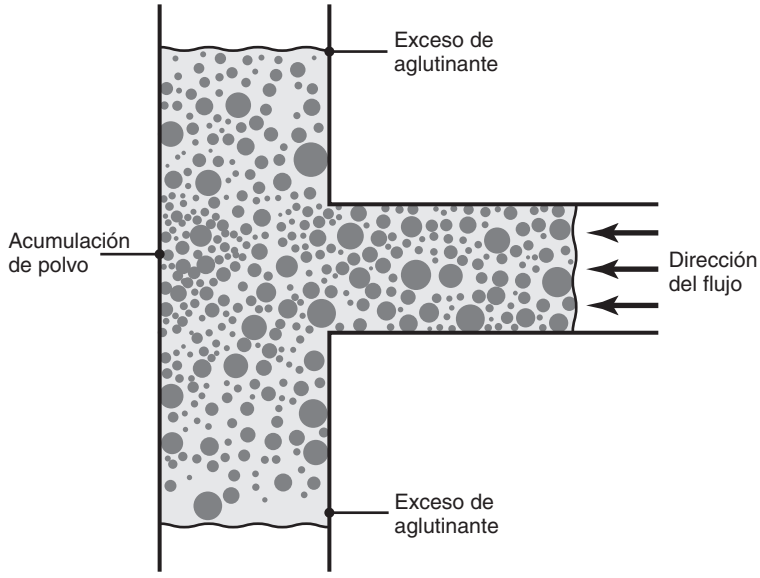


FIGURA 17.23 Ilustración de la distribución no uniforme de polvo debido a transiciones abruptas del canal en el moldeo por inyección del metal.

17.7 Capacidades del proceso

Las capacidades del proceso de metalurgia de polvos se pueden resumir de la siguiente manera:

- Es una técnica para fabricar partes de metales refractarios de alto punto de fusión, y partes cuya producción por otros métodos pueda ser difícil o poco económica.
- Son posibles altas velocidades de producción de partes relativamente complejas mediante equipo automatizado y que requiere poca mano de obra.
- El procesamiento de los polvos metálicos ofrece buen control dimensional y (en muchos casos) la eliminación de las operaciones de maquinado y acabado; de esta manera, reduce los desechos y desperdicios y ahorra energía.
- La disponibilidad de una amplia gama de composiciones permite obtener propiedades mecánicas y físicas especiales, como rigidez, amortiguamiento de la vibración, dureza, densidad, tenacidad y propiedades eléctricas y magnéticas específicas. Algunas de las recientes superaleaciones de alta aleación se pueden manufacturar como partes sólo por medio del procesamiento de la P/M.
- Ofrece la capacidad de impregnación e infiltración para aplicaciones específicas.

Las limitaciones de la P/M son:

- El alto costo de los polvos metálicos, en particular los destinados al moldeo por inyección de polvos, en comparación con los de las materias primas que se funden o forjan.
- El alto costo del herramental y del equipo para líneas pequeñas de producción.
- Limitaciones en el tamaño y complejidad de la forma de la pieza.
- Propiedades mecánicas, como la resistencia y la ductilidad, que por lo general son inferiores a las obtenidas mediante el forjado. Sin embargo, las propiedades de las partes producidas mediante P/M de densidad total, fabricadas mediante operaciones de HIP o forjado adicional, pueden ser tan altas como las de las fabricadas mediante otros procesos.

17.8 Economía de la metalurgia de polvos

Dado que mediante la metalurgia de los polvos se pueden producir partes en formas netas o casi netas y así eliminar muchas operaciones secundarias de manufactura y ensamble, se ha vuelto cada vez más competitiva respecto de la fundición, el forjado y el maquinado. Por otro lado, el alto costo inicial de los punzones, matrices y equipo para el procesamiento de la P/M significa que el volumen de producción debe ser suficientemente alto para justificar este gasto. A pesar de que existen excepciones, por lo general el proceso es económico para cantidades de más de 10,000 piezas.

Como en otras operaciones de trabajos de los metales, el costo de las matrices y el herramental en la metalurgia de polvos depende de la complejidad de la forma de la pieza y el método de procesamiento de los polvos metálicos. Por lo tanto, los costos de herramental para procesos como el prensado isostático en caliente y el moldeo por inyección de polvos son más elevados que para el procesamiento convencional de los polvos. Debido a su método de manufactura de formas casi netas, el costo de las operaciones de acabado para la P/M es bajo en comparación con otros procesos, como la fundición y el forjado. Sin embargo, si existen ciertas características de la parte (como orificios roscados, rebajos y cavidades y orificios transversales), entonces los costos de acabado aumentan. Por consiguiente, puede ser más importante apegarse a los lineamientos de diseño en P/M para minimizar o evitar dichas operaciones adicionales en este proceso que en los otros.

Los costos del equipo para procesamiento convencional de la P/M son de alguna manera similares a los del procesamiento de deformación volumétrica de los metales, co-

TABLA 17.6

Partes de titanio forjadas y de P/M y ahorro en los costos

Parte	Peso (kg)			
	Palanquilla forjada	P/M	Parte final	Ahorro en costo (%)
F-14 Soporte de fuselaje	2.8	1.1	0.8	50
F-18 Soporte de montaje de motor	7.7	2.5	0.5	20
F-18 Accesorio de soporte de gancho de arrestador	79.4	25	12.9	25
F-14 Bastidor de barquilla	143	82	24.2	50

mo el forjado. Sin embargo, el costo aumenta en forma significativa cuando se utilizan métodos como HIP y PIM. Los costos de mano de obra no son tan altos como los de otros procesos, sobre todo porque las operaciones individuales (como mezcla, compactación y sinterizado de polvos) se realizan en equipo altamente automatizado. En consecuencia, las habilidades requeridas no son tan altas.

La capacidad de formas casi netas de la P/M reduce o elimina de manera significativa el desperdicio. Por ejemplo, en la tabla 17.6 se muestran las comparaciones de peso de los componentes para aeronaves producidos mediante los procesos de forja o de P/M. Obsérvese que las partes de P/M se someten a procesos adicionales de maquinado, por lo que las partes finales pesan menos que las fabricadas mediante cualquiera de los dos procesos solos.

RESUMEN

- La metalurgia de polvos es un proceso de moldeado de forma neta que consiste en producir polvos metálicos, mezclarlos, compactarlos en matrices o dados y sinterizarlos para proporcionarles resistencia, dureza y tenacidad. La compactación también se puede efectuar mediante prensado isostático en frío o en caliente a fin de mejorar las propiedades. Aunque el tamaño y peso de sus productos están limitados, el proceso de la P/M tiene la capacidad de producir partes relativamente complejas de manera económica, como formas netas, a tolerancias dimensionales cerradas y con una gran variedad de polvos de metales y aleaciones.
- Se pueden realizar operaciones secundarias y de acabado en las partes producidas mediante P/M para mejorar su precisión dimensional, acabado superficial, propiedades físicas y mecánicas y su apariencia. Estas operaciones incluyen forjado, tratamiento térmico, maquinado, rectificado, recubrimiento, infiltración (con aceite, por ejemplo) e impregnación (con metales con punto de fusión bajo, por ejemplo).
- El control de la forma y calidad del polvo, las variables del proceso y las atmósferas de sinterización son factores que deben considerarse al analizar la calidad del producto. La densidad y las propiedades mecánicas y físicas se pueden controlar mediante el diseño del herramental y la presión de compactado.
- Un proceso importante de P/M es el moldeo por inyección de polvo, que comprende la mezcla de polvos metálicos muy finos con polímeros para hacer que fluyan más fácilmente en los moldes de la forma compleja durante el compactado. Los polímeros se evaporan después, durante la sinterización.
- Las consideraciones de diseño para la metalurgia de polvos incluyen la forma de la pieza, la capacidad de expulsar el compactado crudo o en verde de la matriz o dado y las tolerancias dimensionales aceptables para la aplicación en particular. El proceso de P/M es adecuado para líneas de producción de volumen medio a alto y para partes relativamente pequeñas. Tiene ciertas ventajas competitivas sobre otros métodos de producción, como la fundición, el forjado y el maquinado.

TÉRMINOS CLAVE

Aleación mecánica
Atomización
Carbonilos
Compactación
Compactación sin presión
Compactado crudo o en verde
Deposición electrolítica
Factor de forma
Impregnación
Infiltración
Metalurgia de polvos
Mezclado
Moldeado por inyección de metales
Moldeo por inyección
Moldeo por inyección de polvos
Prensado
Prensado isostático en caliente
Prensado isostático en frío
Reducción
Resistencia en crudo
Sinterizado
Sinterizado por chispas
Tamizado
Trituración o pulverizado

BIBLIOGRAFÍA

ASM Handbook, Vol. 7: *Powder Metal Technologies and Applications*, ASM International, 1998.
Atkinson, H. V. y Rickinson, B. A., *Hot Isostatic Pressing*, Adam Hilger, 1991.
Dowson, G., *Powder Metallurgy: The Process and its Products*, Adam Hilger, 1990.
Fayed, M. y Otten L. (eds.), *Handbook of Powder Science and Technology*, 2a. ed., Chapman & Hall, 1997.
German, R. M., *Powder Injection Molding*, Metal Powder Industries Federation, 1990.
_____, *Sintering Technology and Practice*, Wiley, 1996.
_____, y Bose, A., *Injection Molding of Metals and Ceramics*, Metal Powder Industries Federation, 1997.
Hausner, H. H. y Mall, M. K., *Handbook of Powder Metallurgy*, Chemical Publishing Company, 1982.
Kuhn, H. A. y Ferguson, B. L., *Powder Forging*, Metal Powder Industries Federation, 1990.
Lawley, A., *Atomization: The Production of Metal Powders*, Metal Powder Industries Federation, 1992.
Lenel, F. V., *Powder Metallurgy: Principles and Applications*, American Powder Metallurgy Institute, 1980.
Powder Metallurgy Design Manual, 2a. ed., Metal Powder Industries Federation, 1995.

PREGUNTAS DE REPASO

17.1 Describa brevemente los pasos de producción comprendidos en la fabricación de partes mediante la metalurgia de polvos.
17.2 Nombre los diversos métodos de producción de polvos y explique los tipos de polvos producidos.
17.3 Explique por qué se mezclan los polvos metálicos.
17.4 ¿Es importante la resistencia en crudo o en verde? Explique su respuesta.
17.5 Nombre los métodos utilizados en la compactación de polvos metálicos.
17.6 ¿Qué riesgos implica el procesamiento de la P/M? Explique sus causas.
17.7 ¿Qué requisitos deben reunir los punzones y matrices o dados en el procesamiento de la P/M?
17.8 Describa qué ocurre a los polvos metálicos durante el sinterizado.
17.9 ¿Por qué se efectúan operaciones secundarias y de acabado en partes producidas mediante P/M?
17.10 Explique la diferencia entre impregnación e infiltración. Proporcione algunas aplicaciones de cada una.
17.11 ¿Qué es una aleación mecánica? ¿Cuáles son sus ventajas sobre la aleación convencional de metales?
17.12 ¿Por qué son necesarias las atmósferas de protección en el sinterizado? ¿Cuáles serían los efectos en las propiedades de las partes producidas mediante P/M si no se utilizaran dichas atmósferas?
17.13 ¿Cómo se producen los polvos esféricos? ¿Cómo se producen los polvos con bordes puntiagudos?
17.14 ¿Qué es el "tamizado" de los polvos metálicos? ¿Por qué se realiza?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

17.15 ¿Por qué hay variación de densidad en el compactado de polvos? ¿Cómo se reduce?
17.16 ¿Cuál es la magnitud de los esfuerzos y las fuerzas comprendidas en el compactado de polvos?
17.17 Dé las razones por las que el moldeado por inyección de polvos es un proceso importante.
17.18 ¿Cómo varía el equipo utilizado para el compactado de polvos en relación con el usado en otras operaciones de trabajo de los metales?
17.19 ¿Por qué las propiedades mecánicas y físicas dependen de la densidad de las partes producidas mediante P/M?
17.20 ¿Cuáles son los efectos de las diferentes formas y tamaños de las partículas de metal en el procesamiento de la P/M?
17.21 Describa las ventajas y limitaciones relativas del prensado isostático en frío y en caliente.
17.22 ¿Son diferentes los requisitos de los materiales para punzones y matrices en la metalurgia de polvos que los de forja y extrusión? Explique su respuesta.
17.23 Ya indicamos que la P/M puede ser competitiva con respecto a procesos como la fundición y el forjado. Explique por qué es así, proporcionando gamas de aplicaciones.
17.24 Explique las razones de las formas de las curvas mostradas en la figura 17.10 y de sus posiciones relativas en los gráficos.
17.25 ¿Los compactados crudos deben llevarse a la temperatura de sinterización lenta o rápidamente? Explique sus razones.
17.26 Debido a que se someten a un procesamiento especial, los polvos metálicos son más costosos que los mismos metales en forma sólida, en especial los polvos utilizados en el moldeo por inyección de polvos. ¿Cómo se justifica el costo adicional en el proceso de partes por medio de la metalurgia de polvos?
17.27 En la figura 17.11e se observa que la presión no es uniforme a través del diámetro del compactado a una distancia particular del punzón. ¿Cuál es la razón de esta variación?
17.28 ¿Por qué la presión de compactado y la temperatura de sinterización dependen del tipo de polvo metálico?
17.29 Comente las formas e intervalos de las curvas de las capacidades de proceso en la figura 17.14.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

17.30 Estime el máximo tonelaje requerido para compactar una masa de latón de 2.5 pulgadas de diámetro. ¿La altura de la masa metálica provoca alguna diferencia en su respuesta? Explique sus razonamientos.
17.31 Respecto de la figura 17.10a, ¿cuál debería ser el volumen del polvo de hierro fino suelto para hacer un compactado cilíndrico sólido de 25 mm de diámetro y 15 mm de altura?
17.32 Determine los factores de forma para: *(a)* un cilindro con relaciones dimensionales de 1:1:1, y *(b)* una hojuela con relaciones de 1:10:10.
17.33 Estime el número de partículas en una muestra de 400 g de polvo de hierro, si el tamaño de las partículas es de 75 μm.
17.34 Supóngase que la superficie de una partícula de cobre se cubre con una capa de óxido de 0.1 mm de espesor. ¿Cuál es el volumen (y el porcentaje del volumen) ocupado por esta capa si la partícula de cobre tiene 60 μm de diámetro?
17.35 Investigue en la bibliografía técnica para obtener datos sobre la contracción durante el sinterizado de las partes producidas mediante la P/M. Comente sus observaciones.
17.36 Grafique el área total de la superficie de una muestra de 100 g de aluminio en función del logaritmo natural del tamaño de la partícula.
17.37 Un polvo grueso de cobre se compacta en una prensa mecánica a una presión de 20 toneladas/pulg^2. Durante la sinterización, la parte cruda se contrae un 8% adicional. ¿Cuál es la densidad final?
17.38 Un engrane se manufactura a partir de polvos de hierro. Se desea que tenga 90% de la densidad final de la del hierro fundido y se sabe que la contracción en la sinterización será de casi 5%. Para un engrane que tiene 2.5 pulgadas de diámetro y un cubo de 0.75 pulgada, ¿cuál es la fuerza de prensado requerida?
17.39 Suponga que es un instructor que cubre los temas descritos en este capítulo y realiza una prueba sobre diversos aspectos para examinar los conocimientos de los estudiantes. Prepare dos problemas cuantitativos y proporcione las respuestas.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

17.40 Dibuje los productos de P/M en los que serían deseables variaciones de densidad (ver fig. 17.11). Explique por qué en términos de las funciones de estas piezas.

17.41 Compare las consideraciones de diseño para productos de P/M con las de *(a)* fundición, y *(b)* forja. Describa sus observaciones.

17.42 ¿Existen aplicaciones en las que usted, como ingeniero de manufactura, no recomendaría un producto de P/M? Explique su respuesta.

17.43 Describa detalladamente otros métodos de manufactura de las partes que se muestran en la figura 17.1.

17.44 ¿Cuán grande es el tamaño de los granos de los polvos metálicos que se pueden producir en las cámaras de atomización? Investigue en la bibliografía para determinar la respuesta.

17.45 Grafique el tamaño de abertura contra el tamaño de la malla para tamices utilizados en la clasificación de tamaños de polvos.

17.46 Utilice Internet para localizar proveedores de polvos metálicos y compare los costos del polvo con el costo de los lingotes de cinco materiales.

17.47 Se sabe que en el diseño de engranes de P/M, el diámetro exterior del cubo debe estar lo más lejos posible de la raíz del engrane. Explique por qué éste es el caso.

17.48 Explique por qué las partes de polvos metálicos se utilizan comúnmente para elementos de máquinas que requieren buenas características de fricción y desgaste, y para partes producidas en masa.

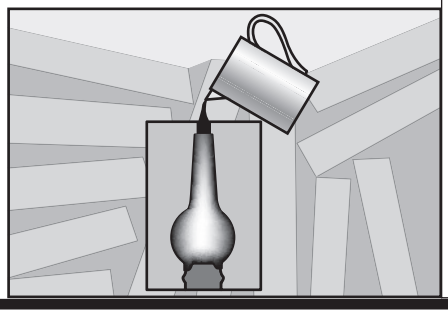
17.49 Se indicó que el moldeado por inyección de polvos compite bien con la fundición por revestimiento y los forjados pequeños de varios materiales, pero no con las fundiciones de matrices de zinc y aluminio. Explique por qué.

17.50 Describa de qué manera sería útil la información proporcionada en la figura 17.14 para diseñar partes de P/M.

17.51 Ya indicamos que en el proceso mostrado en la figura 17.18, las formas producidas se limitan a partes asimétricas. ¿Cree que sería posible producir otras formas también? Describa cómo modificaría el diseño de la configuración para fabricar dichas formas y explique las dificultades que se pueden encontrar.

Procesamiento de cerámicos, vidrio y superconductores

CAPÍTULO 18



En este capítulo se describen los procesos de manufactura utilizados para producir partes discretas de cerámicos y vidrio, así como cables y cintas superconductoras. En específico:

- Preparación de materias primas como partículas finas de cerámicos.
- Vaciado, prensado, extrusión y moldeo para producir formas de productos discretos.
- Secado y cocción para inducir resistencia y dureza.
- Operaciones de acabado para mejorar el tamaño y el acabado superficial.
- Producción de superconductores en forma de alambres y cintas.

Productos comunes fabricados: cerámicos: aislantes, rotores para turbinas de gas, componentes ligeros para maquinas de alta velocidad, rodamientos de bolas y de rodillos, sellos, utensilios para hornear, azulejos y vidrios: vidriado, vidrio laminado, vidrio a prueba de balas, focos, lentes, botellas, fibras de vidrio, barras y tuberías.

18.1 Introducción 513
18.2 Moldeado de cerámicos 514
18.3 Formado y moldeado de vidrio 521
18.4 Técnicas para reforzamiento y recocido de vidrio 525
18.5 Consideraciones de diseño para cerámicos y vidrios 528
18.6 Procesamiento de superconductores 529

EJEMPLO:

18.1 Cambios dimensionales durante el moldeo de los componentes de cerámicos 520

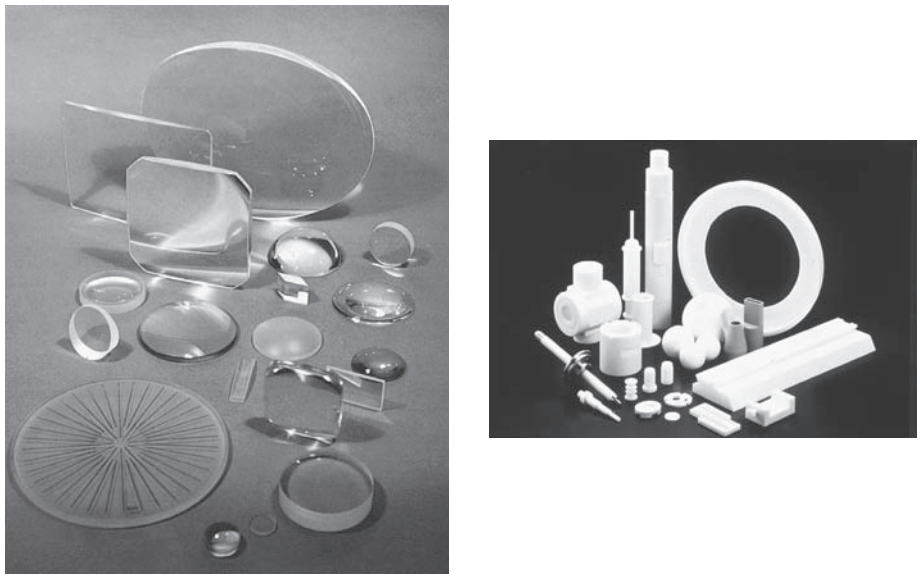
ESTUDIO DE CASO:

18.1 Producción de cintas superconductoras de alta temperatura 529

18.1 Introducción

En el capítulo 8 se describieron las propiedades y diversas aplicaciones de los cerámicos y los vidrios. Estos materiales tienen importantes características, como resistencia y dureza a alta temperatura, baja conductividad eléctrica y térmica, son inertes a los productos químicos y tienen resistencia al desgaste y a la corrosión. La amplia variedad de aplicaciones para estos materiales incluye partes tan simples como azulejos, vajillas, aislantes eléctricos, bujías, rodamientos de bolas y aislamiento térmico para el orbitador de los transbordadores espaciales.

En este capítulo se describen las técnicas existentes para procesar cerámicos y convertirlos en diversos productos útiles (fig. 18.1). Los métodos empleados en los materiales cerámicos consisten en triturar la materia prima, darle forma mediante diversos medios, secado, cocción y operaciones de acabado. Para los vidrios, los procesos comprenden la mezcla y el vaciado de la materia prima en un horno y el formado en moldes mediante diversas técnicas (dependiendo de la forma y el tamaño de la pieza), para productos discretos (botellas) y para productos continuos (vidrio plano, barras, tubería y fibras). Los vidrios también se refuerzan por medios térmicos y químicos y mediante la laminación con hojas de polímeros (como se hace con los parabrisas y el vidrio a prueba de balas).



(a) (b)

FIGURA 18.1 Ejemplo de partes comunes de vidrio. *Fuente*: *(a)* Cortesía de Commercial Optical Manufacturing, Inc. *(b)* Cortesía de Kyocera.

18.2 Moldeado de cerámicos

Existen diversas técnicas para procesar cerámicos y convertirlos en productos útiles (tabla 18.1), según el tipo de cerámico en cuestión y sus formas. Por lo general, la producción de algunas piezas de material cerámico (como la alfarería, los utensilios para hornear o las losetas para piso[N. del RT.]) no tiene el mismo nivel de control de los materiales y procesos que el dedicado a los componentes de alta tecnología (fabricados con cerámicos estructurales, como nitruro de silicio y carburo de silicio) y a las herramientas de corte (en las que se utiliza, por ejemplo, óxido de aluminio). Sin embargo, en general, el procedimiento comprende los siguientes pasos (fig. 18.2):

1. Trituración o molienda de la materia prima para producir partículas muy finas.
2. Mezclado con aditivos para proporcionarles ciertas características deseables.
3. Moldeado, secado y cocción del material.

N. del RT. A este tipo de productos sí es posible llamarles cerámicas.

TABLA 18.1

Características generales del procesamiento de cerámicos

Proceso	Ventajas	Limitaciones
Vaciado en barbotina	Partes grandes, formas complejas, costo bajo del equipo	Baja capacidad de producción, precisión dimensional limitada
Extrusión	Formas huecas y diámetros pequeños, alta capacidad de producción	Las partes tienen sección transversal constante, espesor limitado
Prensado en seco	Tolerancias cerradas, altas capacidades de producción (con automatización)	Variación de densidad en partes con relaciones altas de longitud a diámetro, las matrices requieren resistencia al desgaste abrasivo, el equipo puede ser costoso
Prensado en húmedo	Formas complejas, alta capacidad de producción	Tamaño y precisión dimensional limitadas de las partes, los costos del herramental pueden ser elevados
Prensado en caliente	Partes resistentes, de alta densidad	Se requieren atmósferas protectoras, la vida de la matriz puede ser corta
Prensado isostático	Distribución uniforme de densidad	El equipo puede ser costoso
Torneado con plantillas	Alta capacidad de producción con automatización, herramental de bajo costo	Limitado a partes simétricas con respecto a un eje, precisión dimensional limitada
Moldeo por inyección	Formas complejas, alta capacidad de producción	El herramental puede ser costoso

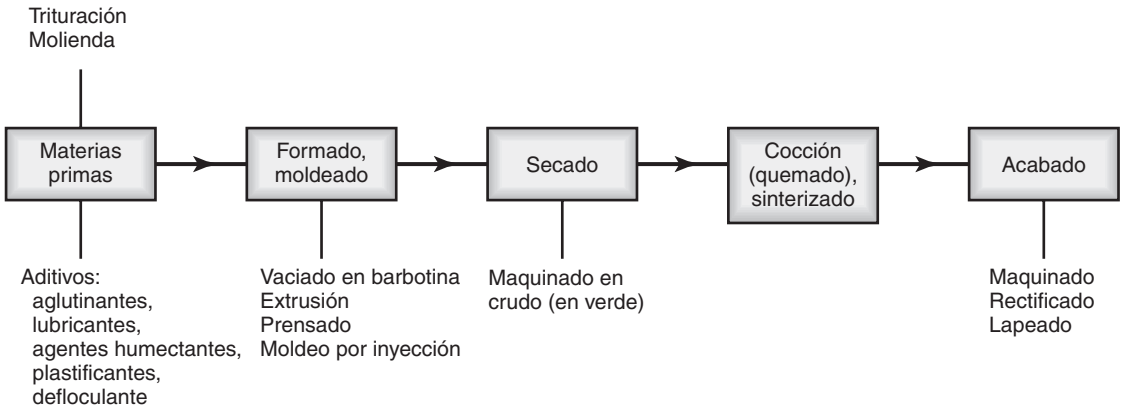


FIGURA 18.2 Pasos de procesamiento comprendidos en la fabricación de piezas de material cerámico.

Se pueden someter a procesamientos adicionales, como maquinado y rectificado, para mejorar su control dimensional y su acabado superficial.

El primer paso en el procesamiento de los cerámicos es la trituración (también conocida como pulverización o molienda) de las materias primas. Por lo general, se realiza en un molino de bolas (ver fig. 17.6), ya sea en seco o en húmedo. La trituración en húmedo es más efectiva, porque mantiene unidas las partículas y evita la suspensión de partículas finas en el aire. Éstas se pueden clasificar por tamaño (pasándolas a través de un tamiz), filtrar y lavar.

Después las partículas molidas se mezclan con *aditivos*, cuyas funciones son una o más de las siguientes:

- **Aglutinante:** mantiene unidas las partículas del cerámico.
- **Lubricante:** reduce la fricción interna entre las partículas durante el moldeo y ayuda a extraer la parte del molde.
- **Agente humectante:** mejora el mezclado.
- **Plastificante:** hace que la mezcla sea más plástica y moldeable.
- **Agentes:** controlan el espumado y la sinterización.
- **Defloculante:** hace más uniforme la suspensión del cerámico y el agua cambiando las cargas eléctricas en las partículas de arcilla (para que se repelan en vez de atraerse entre sí). Se agrega agua para hacer más fluida y menos viscosa la mezcla. Los defloculantes más comunes son Na_2CO_3 y Na_2SiO_3, en cantidades menores a 1%.

Los tres procesos básicos de moldeo para los materiales cerámicos son el vaciado, el formado plástico y el prensado, como se describen a continuación.

18.2.1 Vaciado

El proceso más común de vaciado es el **vaciado en barbotina** (también conocido como vaciado de **drenado**), como se muestra en la figura 18.3. Una **barbotina** es una suspensión de partículas *coloidales* del material cerámico (pequeñas partículas que no se sedimentan) en un *líquido inmiscible* (insoluble uno en otro), que por lo regular es agua. La barbotina se vierte en un molde poroso, generalmente fabricado con blanco de París. Los moldes también pueden estar integrados por diversos componentes.

La barbotina debe tener suficientes fluidez y baja viscosidad para fluir con facilidad dentro del molde, de manera muy similar a la fluidez de los metales fundidos, como se describe en la sección 10.3. El vaciado de la barbotina se tiene que realizar en forma apropiada, ya que el aire atrapado puede constituir un problema significativo durante el vaciado. El hierro y otros materiales magnéticos se extraen utilizando separadores en línea.

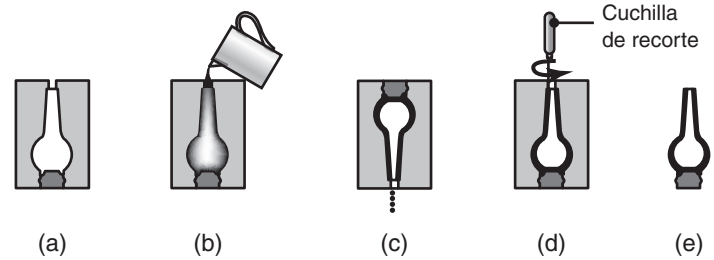


FIGURA 18.3 Secuencia de operaciones de la fundición en barbotina de una pieza de cerámico. Después de vaciar la barbotina, la parte se seca y se somete a cocción en un horno para proporcionarle resistencia y dureza. *Fuente*: F. H. Norton.

Una vez que el molde absorbe parte del agua de las capas exteriores de la suspensión, se invierte y se vacía el resto de la suspensión (para fabricar objetos huecos, como en la fundición por escurrimiento de metales que se describe en la sección 11.3.3). Después se recorta la parte superior de la pieza (obsérvese la herramienta de recorte en la fig. 18.3d), se abre el molde y se extrae la pieza.

Las piezas grandes y complejas (como los accesorios de plomería, los objetos de arte y las vajillas) se pueden fabricar mediante vaciado en barbotina. Aunque los moldes y el equipo son baratos, el control dimensional es deficiente y la capacidad de producción es baja. En algunas aplicaciones, los componentes del producto (como las asas de tazas y jarras) se fabrican por separado y después se pegan utilizando barbotina como adhesivo. Los moldes también pueden estar integrados por diversos componentes. El hierro y otros materiales magnéticos se extraen mediante separadores magnéticos en línea.

Para partes de cerámica sólida, la barbotina se alimenta de forma continua dentro del molde para reponer el agua absorbida; de lo contrario, la parte se contrae. En esta etapa, la pieza se describe como sólida blanda o semirrígida. Cuanto mayor sea la concentración de sólidos en la barbotina, menor cantidad de agua tendrá que extraerse. Después la parte (llamada *cruda o en verde*, como en la metalurgia de polvos) se somete a cocción.

Mientras las partes de cerámica se mantengan crudas o en verde, pueden maquinarse para producir ciertas características o proporcionarles precisión dimensional. Sin embargo, debido a la delicada naturaleza de los compactados crudos, el maquinado suele realizarse en forma manual o con herramientas simples. Por ejemplo, las rebabas en un vaciado en barbotina se pueden eliminar cuidadosamente con un cepillo de alambre fino, o se pueden perforar orificios en el molde. Por lo regular, el trabajo detallado (como la fabricación de roscas) no se efectúa en compactados crudos o en verde porque la distorsión (debida a la cocción) hace que el maquinado no sea viable.

Proceso de cuchilla de doctor. Se pueden fabricar hojas delgadas de material cerámico (menos de 1.5 mm [0.06 pulgada] de espesor) mediante la técnica de vaciado conocida como *proceso de cuchilla de doctor* (fig. 18.4). La barbotina se vacía sobre una banda móvil de plástico mientras se controla su espesor mediante una cuchilla. Las hojas de material cerámico también pueden producirse con otros métodos, incluyendo *(a)* **laminado** de la barbotina entre pares de rodillos, y *(b)* **vaciado** de la barbotina sobre una cinta de papel que se quema posteriormente, durante la cocción.

18.2.2 Formado plástico

El *formado plástico* (también conocido como *formado blando, húmedo* o *hidroplástico*) se puede efectuar mediante diferentes métodos, como la extrusión, moldeo por inyección, o moldeo y torneado (fig. 18.5). El formado plástico tiende a orientar la estructura en capas de arcilla a lo largo de la dirección de flujo del material y, de esa manera, tiende a provocar un comportamiento anisotrópico del material en el procesamiento posterior y en las propiedades finales del producto cerámico.

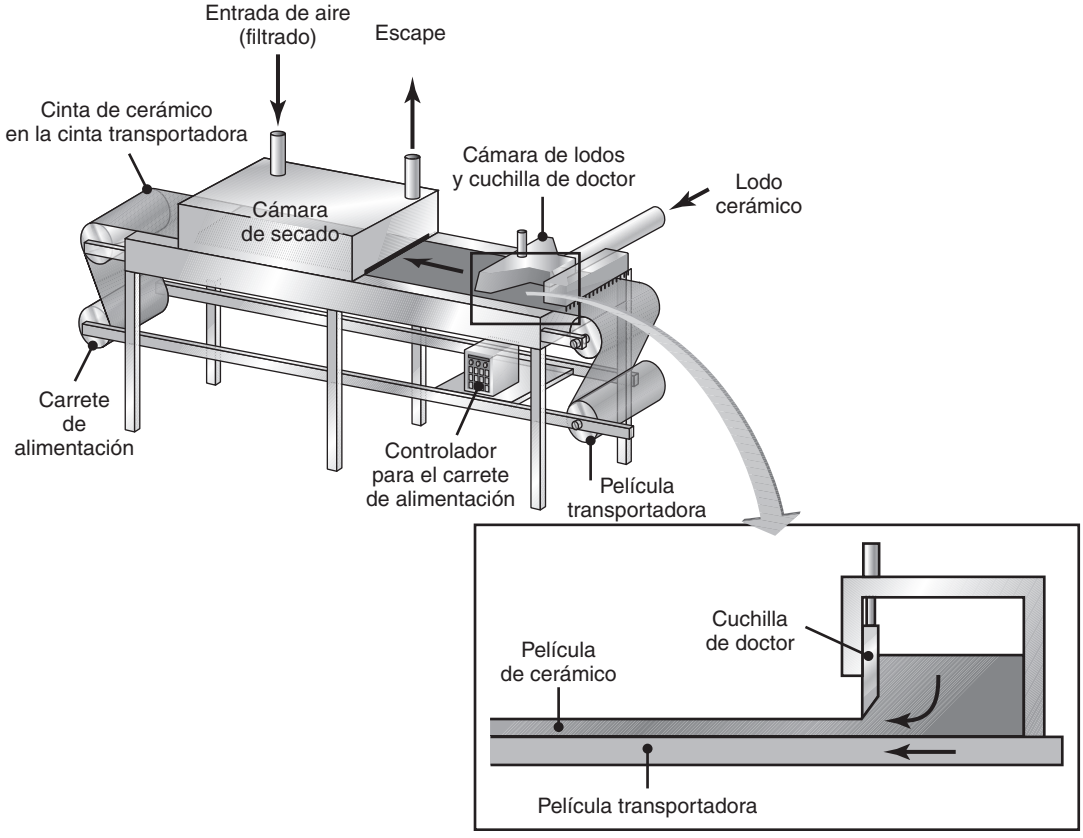


FIGURA 18.4 Producción de hojas de cerámico por medio del proceso de cuchilla de doctor.

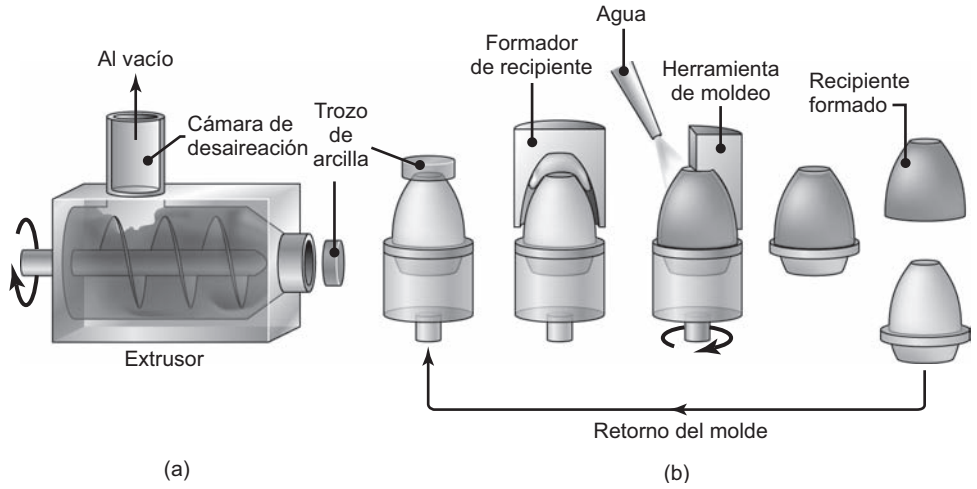


FIGURA 18.5 *(a)* Operaciones de extrusión, y *(b)* moldeo. *Fuente*: R. F. Stoops.

En la *extrusión*, la mezcla de arcilla (que contiene de 20% a 30% de agua) se hace pasar a través de la abertura de un dado o matriz mediante un equipo tipo tornillo. La sección transversal del producto extruido es constante y hay limitaciones en cuanto al espesor de pared para extrusiones huecas. Los productos extruidos se pueden someter a operaciones adicionales de formado. Los costos del herramental son bajos y las capacidades de producción son altas.

18.2.3 Prensado

Prensado en seco. Ésta es una técnica similar a la compactación en la metalurgia de polvos, como se describe en la sección 17.3. El *prensado en seco* se utiliza para formas relativamente simples, como utensilios de cerámico blanco, refractarios para hornos y productos abrasivos. Por lo regular, el contenido de humedad de la mezcla es inferior a 4%, pero puede ser hasta de 12%. Generalmente se agregan a la mezcla aglutinantes orgánicos e inorgánicos (como ácido esteárico, cera, almidón y alcohol polivinílico), que también actúan como lubricantes. Este proceso tiene las mismas altas capacidades de producción y control cerrado de las tolerancias dimensionales que en la metalurgia de polvos.

La presión de prensado va de 35 a 200 MPa (5 a 30 ksi). Las prensas modernas utilizadas para el prensado en seco están muy automatizadas. Por lo general, las matrices se fabrican con carburos o con acero endurecido. Deben tener alta resistencia al desgaste para soportar las partículas abrasivas del cerámico, por lo que pueden ser costosas.

En los materiales cerámicos prensados en seco, la densidad puede variar de manera significativa (al igual que en la compactación de la P/M) debido a la fricción entre las partículas y las paredes del molde. Las variaciones de densidad provocan distorsión durante la cocción, que es severa para las partes que tienen altas relaciones de longitud a diámetro. La máxima relación recomendada es 2:1. Se pueden utilizar diversos métodos para minimizar las variaciones de densidad, incluyendo: *(a)* diseño adecuado del herramental, *(b)* prensado vibratorio y formado por impacto (en particular para elementos combustibles de reactores nucleares), y *(c)* prensado isostático.

Prensado en húmedo. En el *prensado en húmedo*, la parte se forma en un molde mientras se somete a alta presión en una prensa hidráulica o mecánica. Por lo general, este proceso se utiliza para fabricar formas intrincadas. Es común que el contenido de humedad sea de 10% a 15%. Las capacidades de producción son elevadas; sin embargo, *(a)* el tamaño de la parte es limitado, *(b)* es difícil tener control dimensional debido a la contracción durante el secado, y *(c)* los costos del herramental son elevados.

Prensado isostático. De amplio uso en la metalurgia de polvos, el *prensado isostático* también se utiliza para los materiales cerámicos con el fin de obtener una distribución uniforme de la densidad en toda la parte durante la compactación. Por ejemplo, los aislantes de bujías se producen con este método a temperatura ambiente, en tanto que los álabes de nitruro de silicio para aplicaciones a alta temperatura (ver fig. 8.1) se fabrican mediante *prensado isostático en caliente*.

Torneado (formado con plantillas). Para fabricar placas de cerámico se utiliza una combinación de procesos. En este proceso, primero se extruyen piezas de arcilla y se moldean como *recipiente* sobre un molde de yeso. Después se tornea sobre un molde giratorio (ver fig. 18.5b). El *torneado* es un movimiento en el que el recipiente de arcilla adquiere forma mediante plantillas o rodillos. Luego se seca la parte y se somete a cocción (quemado). El proceso de torneado se limita a partes simétricas respecto de un eje y tiene una precisión dimensional limitada. La operación se automatiza para mejorar la productividad.

Moldeo por inyección. El *moldeo por inyección* se utiliza ampliamente para el moldeo de precisión de materiales cerámicos en aplicaciones de alta tecnología, como los componentes de motores para cohetes. La materia prima se mezcla con un aglutinante, como un polímero termoplástico (polipropileno, polietileno de baja densidad o acetato de vinil etileno) o cera. En general, el aglutinante se elimina por pirolisis (induciendo cambios químicos mediante calor); después la parte se sinteriza mediante quemado.

El proceso de moldeo por inyección puede producir secciones delgadas (por lo general, con espesor de 10 mm a 15 mm [0.4 a 0.6 pulgada]) de la mayoría de los cerámicos de ingeniería, como alúmina, zirconia, nitruro de silicio, carburo de silicio y sialón. Las secciones más gruesas requieren un control cuidadoso de los materiales utilizados y de los parámetros de procesamiento para evitar defectos, como huecos internos y agrietamientos, en particular los provocados por la contracción.

Prensado en caliente. En este proceso (también conocido como *sinterización a presión*) se aplican presión y calor de manera simultánea. Este método reduce la porosidad y hace que la parte sea más densa y resistente. Por lo general, se utiliza grafito como material para punzones y matrices y es común usar atmósferas de protección durante el prensado.

También se puede utilizar el *prensado isostático en caliente* (sección 17.3.2), sobre todo para mejorar la precisión de la forma y la calidad de los cerámicos de alta tecnología, como el carburo de silicio y el nitruro de silicio. Se ha demostrado que el procesamiento de HIP de encapsulado de vidrio es eficaz para este propósito.

18.2.4 Secado y cocción (quemado)

El siguiente paso en el procesamiento de los cerámicos consiste en secar y cocer la pieza para darle la resistencia y dureza adecuadas. El *secado* es una etapa crítica debido a que la parte tiende a distorsionarse o agrietarse por las variaciones en el contenido de humedad y en el espesor de la parte. Es importante controlar la humedad atmosférica y la temperatura ambiente para reducir la distorsión y el agrietamiento.

La pérdida de humedad durante el secado hace que la parte se contraiga entre 15% y 20% del tamaño original húmedo (fig. 18.6). En un ambiente húmedo, la velocidad de evaporación es baja y, por consiguiente, el gradiente de humedad a través del espesor de la parte es inferior al del ambiente seco. A su vez, este gradiente evita un gran gradiente irregular de contracción desde la superficie hasta el interior durante el secado.

Una parte del cerámico que se forme por medio de cualquiera de los métodos descritos hasta ahora se encuentra en estado *crudo* o *en verde*. Esta parte se puede maquinar para acercarla a una forma casi neta. Aunque la parte cruda debe manejarse con cuidado, el maquinado no es particularmente difícil debido a su relativa suavidad.

La *cocción* o quemado (también conocida como **sinterización**) consiste en calentar la parte a una temperatura elevada en un ambiente controlado. Durante la cocción ocurre cierta contracción. La cocción proporciona a la pieza de cerámico su resistencia y dureza. Este mejoramiento de las propiedades se debe a: *(a)* el desarrollo de una fuerte unión entre las partículas complejas de óxido en el cerámico, y *(b)* la porosidad reducida. Una tecnología más reciente (aunque aún no se comercializa) comprende la **sinterización por microondas** de los cerámicos en hornos que operan a más de 2 GHz. Su efectividad de costos depende de la disponibilidad de aislamientos poco costosos para el horno.

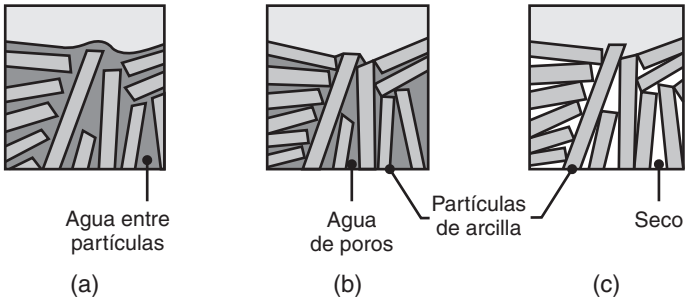


FIGURA 18.6 Contracción de arcilla húmeda causada por la eliminación de agua durante el secado. La contracción puede ser hasta de 20% del volumen. *Fuente*: F. H. Norton.

Los **cerámicos nanofase** (que se describen en la sección 8.2.5) se pueden sinterizar a temperaturas inferiores a las utilizadas para los cerámicos convencionales. Se fabrican con más facilidad porque pueden compactarse a temperatura ambiente a altas densidades, prensarse en caliente a la densidad teórica y moldearse como partes de forma neta sin usar aglutinantes o auxiliares para la sinterización.

18.2.5 Operaciones de acabado

Dado que la cocción provoca cambios dimensionales, se pueden efectuar operaciones adicionales para *(a)* dar a la parte del cerámico su forma final, *(b)* mejorar su acabado superficial y tolerancias dimensionales, y *(c)* eliminar cualquier defecto superficial. Aunque son duras y frágiles, se han hecho avances importantes en la producción de **cerámicos maquinables** y **cerámicos rectificables**, permitiendo así la producción de componentes del cerámico con alta precisión dimensional y buen acabado superficial. Un ejemplo es el carburo de silicio, que se puede maquinar para darle la forma final a partir de piezas en bruto sinterizadas.

Los procesos de acabado que se utilizan pueden ser una o más de las operaciones siguientes, que se describen de manera detallada en diversas secciones de la parte IV en este libro:

1. *Rectificado* (utilizando un disco de diamante).
2. *Lapeado* y *honeado* o *asentado*.
3. *Maquinado ultrasónico*.
4. *Perforado o taladrado* (utilizando una broca recubierta de diamante).
5. *Maquinado por descarga eléctrica*.
6. *Maquinado por rayo láser*.
7. *Corte con chorro de agua abrasivo*.
8. *Tamboreo* (para eliminar los extremos filosos y las marcas de rectificado).

La selección del proceso es un factor que debe considerarse debido a la naturaleza frágil de la mayoría de los cerámicos y a los costos adicionales comprendidos en algunos de estos procesos. También debe tomarse en cuenta el efecto de la operación de acabado en las propiedades del producto. Por ejemplo, debido a la sensibilidad a las muescas, cuanto más fino sea el acabado, mayores serán la resistencia de la parte y la capacidad de soporte de carga, en particular su resistencia a la fatiga (ver fig. 2.28). Las partes de cerámico también se pueden someter a fatiga estática, como se describe en la sección 18.5 para el vidrio.

Tanto para mejorar su apariencia y su resistencia como para volverlos impermeables, es frecuente recubrir los productos de cerámico con un **barniz** o **esmalte**, que forma un recubrimiento vidriado después de la cocción (algunas veces también se le llama horneado o esmaltado).

EJEMPLO 18.1 Cambios dimensionales durante el moldeo de los componentes de cerámicos

Se va a fabricar una parte sólida cilíndrica de cerámico con una longitud final, L, de 20 mm. Para este material, se ha establecido que las contracciones lineales durante el secado y la cocción son de 7% y 6%, respectivamente, en relación con la dimensión seca, L_d. Calcule: *(a)* la longitud inicial, L_o, de la parte, y *(b)* la porosidad seca, P_d, si la porosidad de la parte cocida, P_f, es 3%.

Solución

a. Con base en la información proporcionada y considerando que la cocción va precedida por el secado, podemos escribir:

$$\frac{(L_d - L)}{L_d} = 0.06$$

o

$$L = (1 - 0.06)L_d$$

Por lo que,

$$L_d = \frac{20}{0.94} = 21.28 \text{ mm}$$

$$L_o(1 + 0.07)L_d = (1.07)(21.28) = 22.77 \text{ mm}$$

b. Puesto que la porosidad final es de 3%, el volumen real (V_a) del material sólido en la parte es

$$V_a = (1 - 0.03)V_f = 0.97V_f$$

en la que V_f es el volumen de la parte cocida. Dado que su contracción lineal durante la cocción es de 6%, podemos determinar que el volumen seco (V_d) de la parte es:

$$V_d = \frac{V_f}{(1 - 0.06)^3} = 1.2V_f$$

Por lo tanto,

$$\frac{V_a}{V_d} = \frac{0.97}{1.2} = 0.81, \text{ o } 81\%$$

Por lo que la porosidad (P_d) de la parte seca es 19%.

18.3 Formado y moldeado de vidrio

El vidrio se procesa fundiéndolo y después formándolo, ya sea en moldes, en diversos dispositivos o mediante soplado. Entre las formas de vidrio producidas están las hojas y placas planas, barras, tubería, fibras de vidrio y productos discretos, como botellas y faros. Los objetos de vidrio pueden ser tan gruesos como los espejos grandes para telescopios y tan delgados como los ornamentos para árboles navideños. La resistencia del vidrio se puede mejorar mediante tratamientos térmicos y químicos (que inducen esfuerzos residuales en la superficie) o laminándolo con una hoja delgada de plástico tenaz.

Por lo general, los productos de vidrio se pueden clasificar de la siguiente manera:

1. **Hojas** o **placas planas**, que tienen un espesor de entre 0.8 mm y 10 mm (0.03 a 0.4 pulgada), como los vidrios de ventanas, las puertas de vidrio y las cubiertas para mesas.
2. **Barras** y **tubería**, utilizadas para sustancias químicas, luces de neón y artefactos decorativos.
3. **Productos discretos**, como botellas, floreros, faros de luz y cinescopios para televisores.
4. **Fibras de vidrio** para reforzar los materiales compósitos (sección 9.2.1) y para uso en fibra óptica.

Todos los procesos de formado y moldeo de vidrio empiezan con vidrio fundido, por lo general en el intervalo de 1000 °C a 1200 °C (1830 °F a 2200 °F). Tiene la apariencia de un jarabe rojo vivo, viscoso, y se alimenta desde un horno o tanque de fundición.

18.3.1 Vidrio en hojas (láminas) y placas planas

El vidrio en hojas planas se puede fabricar mediante el método de vidrio flotado o por estirado o laminado a partir del estado fundido. Los tres métodos son procesos continuos.

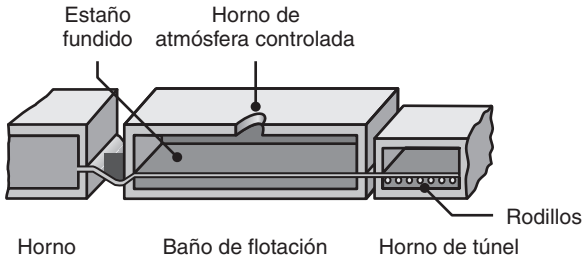


FIGURA 18.7 Método de flotado para formado de hojas de vidrio. *Fuente*: Cortesía de Corning Glass Works.

1. En el **método de flotado** (fig. 18.7), el vidrio fundido del horno alimenta un largo baño en el que el vidrio, en una atmósfera controlada y a una temperatura de 1150 °C (2100 °F), flota sobre un baño de estaño fundido. Después el vidrio pasa sobre rodillos a una temperatura de unos 650 °C (1200 °F) hacia otra cámara (*horno de túnel*), en la que se solidifica. El *vidrio flotado* tiene superficies lisas (*pulidas por cocción)* y ya no se requiere rectificado ni pulido. La anchura puede ser hasta de 4 m (13 pies). Por medio de este proceso se fabrica vidrio delgado y placas.
2. El proceso de **estirado** para la fabricación de hojas o placas planas (vidrio plano) comprende una máquina en la que el vidrio fundido pasa a través de un par de rodillos (fig. 18.8a), en un arreglo similar al de un viejo exprimidor de ropa. El vidrio, que se encuentra en solidificación, se comprime entre estos dos rodillos (que le dan forma de hoja) y después se pasa a través de una serie de rodillos más pequeños.
3. En el proceso de **laminado** (fig. 18.8b), el vidrio fundido se comprime entre rodillos y forma una hoja. Las superficies del vidrio se pueden realzar con un modelo, utilizando rodillos texturizados. De esta manera, la superficie de vidrio producida mediante el estirado o laminado tiene una apariencia superficial áspera.

18.3.2 Tubería y rodillos

La tubería de vidrio se manufactura mediante el proceso mostrado en la figura 18.9. El vidrio fundido se envuelve alrededor de un mandril hueco giratorio (cilíndrico o cónico) y se estira con un conjunto de rodillos. Se sopla aire a través del mandril para evitar que el tubo se colapse. Estas máquinas pueden ser horizontales, verticales o inclinadas hacia

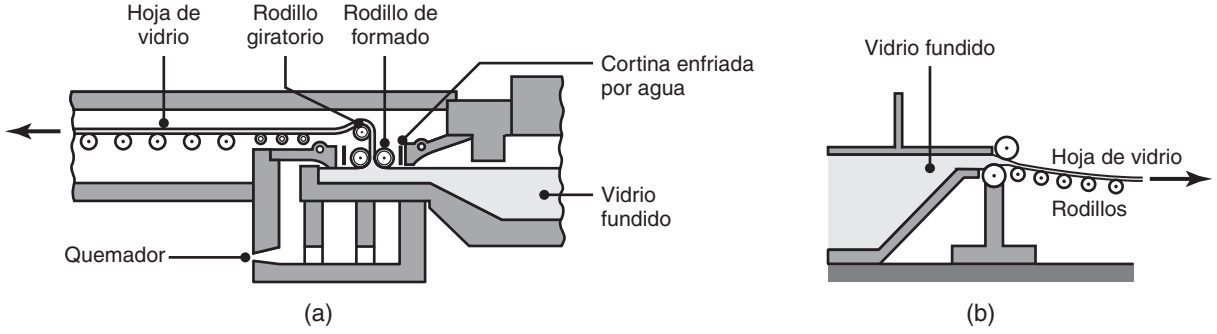


FIGURA 18.8 *(a)* Proceso de estirado para estirar hojas de vidrio a partir de un baño fundido. *(b)* Proceso de laminado. *Fuente:* W. D. Kingery.

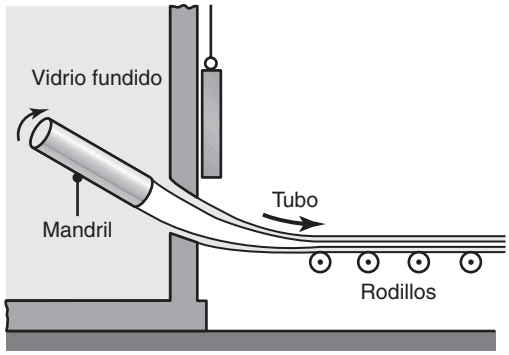


FIGURA 18.9 Proceso de manufactura de tubería de vidrio. Se sopla aire a través del mandril para evitar que el tubo se colapse. Los tubos de vidrio para focos se fabrican mediante este método.

abajo. Éste es el método utilizado en la fabricación de tubos de vidrio para lámparas fluorescentes, por medio de máquinas (como la de cintas de Corning) capaz de producir 2000 focos por minuto. Las barras de vidrio se fabrican de manera similar, pero no se sopla aire a través del mandril. El producto estirado se convierte en una barra sólida de vidrio.

18.3.3 Productos discretos de vidrio

Se utilizan diversos procesos para fabricar objetos discretos de vidrio, como se describe a continuación.

Soplado. Se fabrican piezas de vidrio huecas y de pared delgada (como botellas, floreros y frascos) mediante el *soplado*, un proceso similar al moldeo por soplado de los termoplásticos (sección 19.4). En la figura 18.10 se muestran los pasos comprendidos en la producción de una botella de vidrio ordinaria mediante el proceso de soplado. El aire soplado expande un trozo hueco de vidrio calentado contra las paredes internas del molde. Éste, por lo general, se recubre con un agente de separación (como aceite o emulsión) a fin de evitar que el vidrio se pegue a él. Al soplado le puede seguir una segunda operación de soplado para finalizar la forma del producto, conocida como proceso de *soplado y soplado*.

El acabado superficial de los productos fabricados mediante el proceso de soplado es aceptable para la mayoría de las aplicaciones, como botellas y frascos. Es difícil controlar el espesor de pared del producto, pero este proceso resulta económico para la producción de alta velocidad. Los tubos de luz incandescente (ver fig. I.3) se fabrican en máquinas de soplado altamente automatizadas a una velocidad de 2000 bulbos o focos por minuto.

Prensado. En el proceso de *prensado*, se coloca un trozo de vidrio fundido en un molde y se prensa para darle una forma confinada por medio de un émbolo. De este modo, el proceso es similar al forjado a presión en matriz. El molde puede ser de una pieza (como el que se muestra en la fig. 18.11) o dividido (fig. 18.12). Después de prensado, el vidrio en solidificación adquiere la forma de la cavidad del molde con el émbolo. Debido al ambiente confinado, el producto tiene una precisión dimensional más elevada que la que se puede obtener con el soplado. El prensado en moldes de una pieza no se puede utilizar para *(a)* formas de productos en los cuales no se pueda retraer el émbolo, o *(b)* piezas de pared delgada. Por ejemplo, los moldes divididos se usan para elaborar botellas, mientras que para piezas de pared delgada se puede combinar el prensado con el soplado. Esto se conoce como *prensado y soplado*: la parte prensada se somete a presión de aire (de ahí el término *soplado*), que expande más el vidrio dentro del molde.

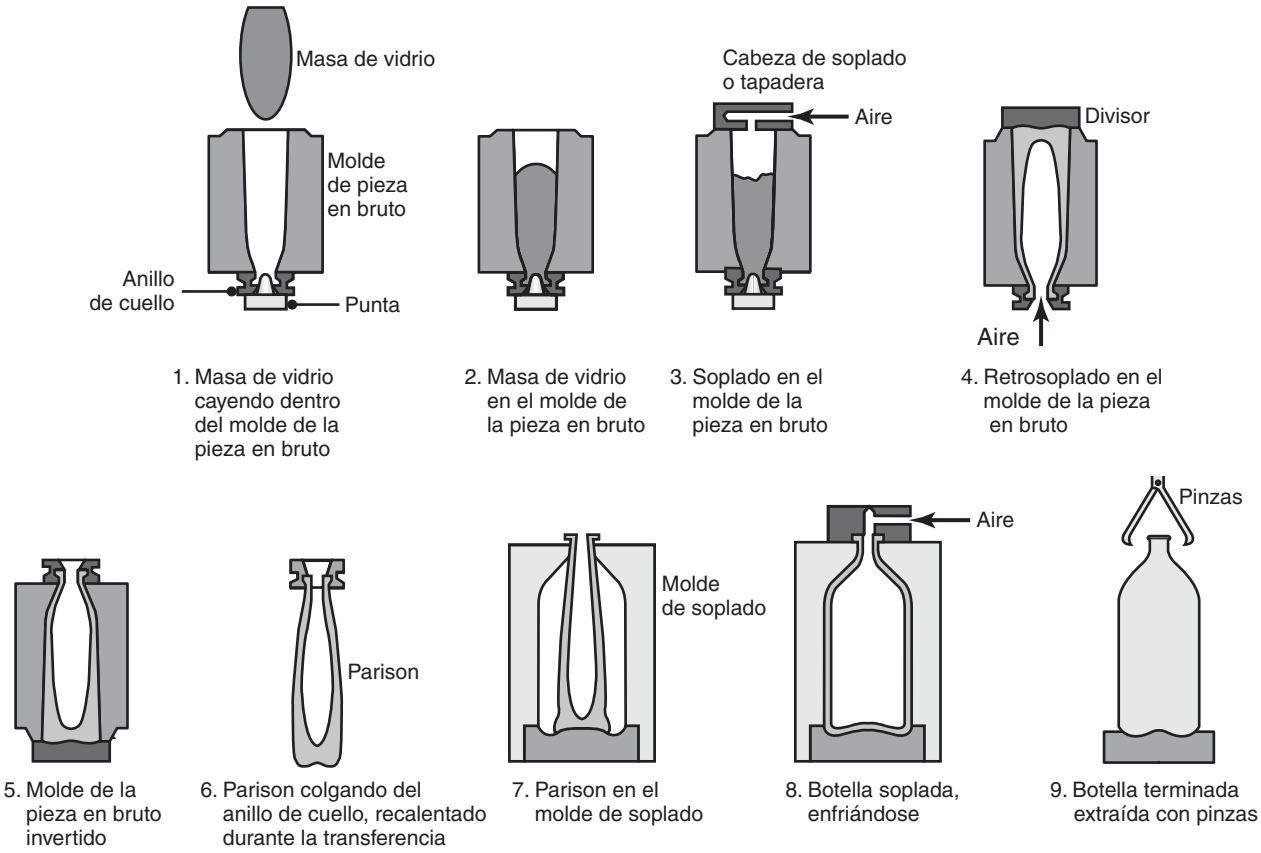


FIGURA 18.10 Pasos en la manufactura de una botella de vidrio ordinaria. *Fuente*: H. Norton.

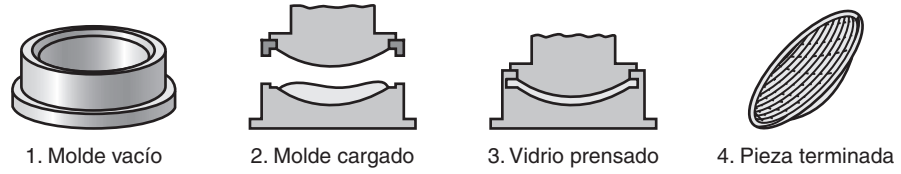


FIGURA 18.11 Manufactura de una pieza de vidrio prensando vidrio en un molde. *Fuente*: Cortesía de Corning Glass Works.

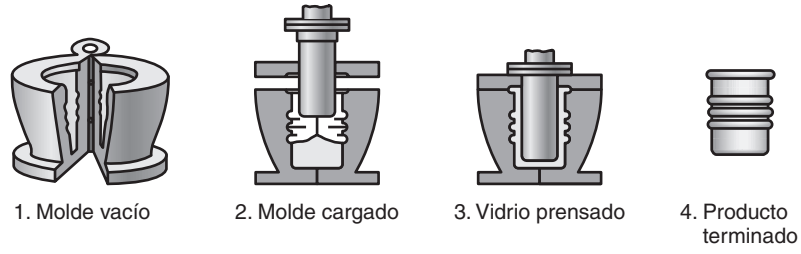


FIGURA 18.12 Vidrio prensado en un molde dividido. *Fuente*: E. B. Shand.

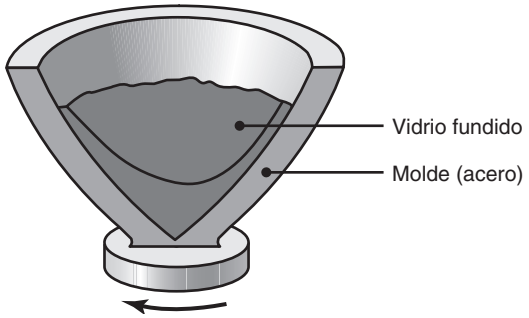


FIGURA 18.13 Fundición centrífuga de vidrio. Las lentes para telescopios grandes y los cinescopios de televisores se fabrican mediante este proceso. *Fuente*: Cortesía de Corning Glass Works.

Fundición centrífuga. También conocido en la industria del vidrio como **rotado o rotación** (fig. 18.13), este proceso es similar al utilizado para elaborar metales. La fuerza centrífuga impele el vidrio fundido contra la pared del molde, en la que se solidifica. Los productos comunes fabricados por este método son los cinescopios para televisores y los conos de las puntas de misiles.

Hundimiento o asentamiento. Las partes de vidrio con forma de plato poco hondo o ligeramente saliente se pueden realizar mediante el proceso de *hundimiento*: se coloca una hoja de vidrio sobre el molde y se calienta; el vidrio se hunde por su propio peso y adquiere la forma del molde. Este proceso es similar al termoformado de termoplásticos (sección 19.6), pero no requiere presión ni vacío. Las aplicaciones típicas son platos, lentes para el sol, espejos para telescopios y marquesinas o tableros luminosos.

Manufactura de cerámicos vidriados. Los cerámicos vidriados (marcas comerciales: *Pyroceram*, *Corningware*) contienen gran cantidad de diversos óxidos, como se indica en la sección 8.5, por lo que su fabricación combina los métodos utilizados para cerámicos y vidrios. Los cerámicos vidriados se moldean como productos discretos (por ejemplo, platos y recipientes para hornear) y después se tratan térmicamente, por lo cual el vidrio se *desvitrifica* (recristaliza).

18.3.4 Fibras de vidrio

Las fibras de vidrio continuas se estiran a través de orificios múltiples (de 200 a 400 orificios) en placas calientes de platino, a velocidades tan altas como 500 m/s (1700 pies/s). Mediante este método se pueden producir fibras tan pequeñas como 2 μm (80 μpulg) de diámetro. Para proteger sus superficies, las fibras se recubren posteriormente con productos químicos. Las fibras cortas (*seccionadas*) se producen sometiendo fibras largas a una corriente de aire comprimido o de vapor conforme salen del orificio.

La *lana de vidrio* (fibras cortas de vidrio), utilizada como material de aislamiento térmico o acústico, se fabrica mediante el proceso de *rocío centrífugo*, en el que el vidrio fundido (hilado) se lanza (*por rotación*) de una cabeza giratoria. Por lo general, el diámetro de las fibras va de 20 a 30 μm (800 a 1200 μpulg).

18.4 Técnicas para reforzamiento y recocido del vidrio

El vidrio se puede reforzar mediante los procesos que se describen a continuación, en tanto que los productos discretos de vidrio se pueden someter a recocido u otras operaciones de acabado para adquirir las propiedades y características superficiales deseadas.

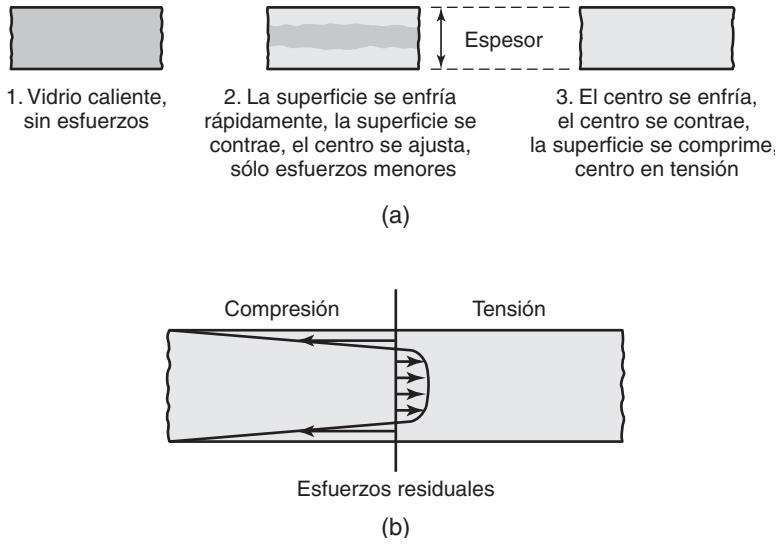


FIGURA 18.14 *(a)* Etapas comprendidas en la inducción de esfuerzos residuales de compresión en la superficie para mejorar la resistencia. *(b)* Esfuerzos residuales en una placa de vidrio templado.

Temple térmico. En este proceso (también conocido como *revenido físico* o *revenido frío*), las superficies del vidrio caliente se enfrían con rapidez por medio de una corriente de aire (fig. 18.14), se contraen y (al principio) se desarrollan esfuerzos de tensión en ellas. Conforme el volumen de vidrio empieza a enfriarse, se contrae. Después las superficies del vidrio, ya solidificadas, son forzadas a contraerse y en consecuencia desarrollan esfuerzos residuales de compresión, en tanto que el interior desarrolla esfuerzos de tensión (ver también la sección 2.11). Los esfuerzos superficiales de compresión mejoran la resistencia del vidrio, de la misma manera que lo hacen en metales y otros materiales.

Cuanto mayor sea el coeficiente de expansión térmica del vidrio y menor su conductividad térmica, mayor será el nivel de esfuerzos residuales desarrollados y, por lo tanto, el vidrio se volverá más resistente. El temple térmico requiere un tiempo relativamente corto (minutos) y se puede aplicar a la mayoría de los vidrios. Debido a la gran cantidad de energía almacenada en los esfuerzos residuales, el **vidrio templado** se desmorona en una gran cantidad de piezas cuando se rompe. Las piezas rotas no son tan filosas ni peligrosas como las del vidrio ordinario para ventanas.

Revenido químico. En este proceso, el vidrio se calienta en un baño de KNO_3, K_2SO_4 o $NaNO_3$ fundido, dependiendo del tipo de vidrio. Después se producen intercambios iónicos con átomos más grandes que reemplazan a los más pequeños en la superficie del vidrio, por lo que se desarrollan esfuerzos residuales de compresión en la superficie. Esta condición es similar a la creada al forzar una cuña entre dos ladrillos en una pared.

El tiempo requerido para el revenido químico es alrededor de una hora más que para el revenido térmico. Se puede formar a diversas temperaturas. A bajas temperaturas, la distorsión de la parte es mínima, por lo que se pueden tratar formas complejas. A temperaturas elevadas, es posible que ocurra alguna distorsión de la pieza, pero después se puede utilizar a temperaturas más elevadas sin que pierda resistencia.

Vidrio laminado. El vidrio laminado es producto de otro método de reforzamiento llamado *reforzamiento por laminado*. Consta de dos piezas de vidrio plano con una hoja delgada de plástico tenaz en medio. Cuando el vidrio laminado se agrieta, sus piezas se mantienen adheridas a la hoja de plástico, fenómeno que se observa comúnmente al romperse el parabrisas de un automóvil.

Tradicionalmente, el vidrio plano para ventanas y puertas vidriadas se ha reforzado con una malla de alambre (*tela metálica*, con malla hexagonal) embebida en el vidrio durante su producción. Cuando un objeto duro golpea la superficie, el vidrio se destroza, pero las piezas siguen unidas debido a la tenacidad del alambre, que tiene resistencia y ductilidad.

Vidrio a prueba de balas. El vidrio laminado tiene una resistencia considerable y puede evitar la penetración total de objetos sólidos debido a la presencia de una película de polímero tenaz entre las dos capas de vidrio. El *vidrio a prueba de balas* (utilizado en automóviles, vehículos blindados bancarios y construcciones) es un diseño más desafiante. Esto se debe tanto a la muy alta velocidad y el nivel de energía de la bala como al pequeño tamaño y la forma de su punta, un área pequeña de contacto y altos esfuerzos localizados. Dependiendo del calibre del arma, las velocidades de las balas van de 350 a 950 m/s (1150 a 3100 pies/s).

El vidrio a prueba de balas (también conocido como *vidrio resistente a balas*) tiene espesores que van de 7 mm a 75 mm (0.3 a 3 pulgadas). Los más delgados son para armas de mano y los más gruesos para rifles. Aunque existen variaciones, el vidrio a prueba de balas fundamentalmente está integrado por vidrio laminado con una hoja de polímero; su capacidad para detener una bala depende de *(a)* el tipo y espesor del vidrio; *(b)* el tamaño, la forma, el peso y la velocidad de la bala, y *(c)* las propiedades y el espesor de la hoja de polímero.

Es común utilizar hojas de policarbonato en el vidrio a prueba de balas. Como material empleado en gran medida para cascos de seguridad, parabrisas y guardas para maquinaria, el policarbonato es un polímero tenaz y flexible. En combinación con un vidrio grueso, puede detener una bala, aunque el vidrio desarrolla una región astillada circular. Debe verificarse que la unión de estas capas sobre la superficie del vidrio sea la adecuada, ya que, por lo general, durante dichos encuentros se dispara más de una ronda. Además, para mantener la transparencia del vidrio y minimizar la distorsión, los índices de refracción del vidrio y del polímero deben ser casi idénticos.

Si se coloca una hoja de polímero sólo en uno de los lados del vidrio, se trata de un vidrio a prueba de balas *unidireccional*. En un vehículo, la capa de polímero se coloca en la superficie interna del vidrio. Una bala externa no penetra la ventana porque golpea primero el vidrio y lo despedaza, absorbiéndose así parte de la energía de la bala y disminuyendo su velocidad. La energía restante se disipa en la hoja de polímero que después detiene la bala. En cambio, cualquiera dentro del vehículo puede disparar en sentido contrario. Una bala del interior penetra la hoja de polímero y hace que el vidrio se rompa hacia fuera, permitiendo que pase la bala. Por lo tanto, un vidrio unidireccional detiene un disparo del exterior, pero permite disparar desde el interior.

Un diseño más reciente del vidrio a prueba de balas consta de dos capas adyacentes de hoja de polímero termoplástico sobre la misma superficie del vidrio y se basa en un principio diferente.

- La capa exterior (el lado por donde entra la bala) es una hoja acrílica (polimetilmetacrilato, PMMA) que *achata* la punta de la bala, reduciendo así su velocidad y su capacidad para penetrar fácilmente. Además, la película de acrílico tiene alta resistencia a la intemperie, lo que la hace apropiada como capa exterior.
- La siguiente capa es una hoja de policarbonato. Debido a que tiene alta tenacidad, la capa de policarbonato detiene la bala, que ya se acható al penetrar primero la hoja de acrílico. El vidrio se despedaza de la misma manera que en los otros diseños.

18.4.1 Operaciones de acabado

Como en los productos metálicos, también se pueden desarrollar esfuerzos residuales en productos de vidrio si no se enfrían a una velocidad suficientemente baja. Para asegurar que el producto no tenga estos esfuerzos, se **recoce** mediante un proceso similar al reco-

cido para relevado de esfuerzos de los metales. El vidrio se calienta a cierta temperatura y después se enfría gradualmente. Dependiendo del tamaño, espesor y tipo de vidrio, los tiempos de recocido pueden variar de unos cuantos minutos hasta 10 meses, como el caso de un espejo de 600 mm (24 pulgadas) para un telescopio en un observatorio.

Además del recocido, los productos de vidrio se pueden someter a más operaciones, como el corte, taladrado, rectificado y pulido. Los bordes y las esquinas puntiagudas pueden alisarse mediante *(a)* el esmerilado (como se ve en las cubiertas de vidrio para escritorios y estantes), o *(b)* colocando un soplete contra los bordes (**pulido con fuego**), que los redondea, suavizando el vidrio y la tensión superficial.

En todas las operaciones de acabado para vidrio y otros materiales frágiles, es necesario tener cuidado para garantizar que no existan daños en la superficie, en especial concentradores de esfuerzos, como acabado superficial rugoso y rayaduras. Debido a su sensibilidad a las muescas, incluso una sola rayadura puede provocar la falla prematura de la parte, sobre todo si la rayadura se localiza en una dirección donde las fuerzas de tensión se encuentran al máximo.

18.5 Consideraciones de diseño para cerámicos y vidrios

Los productos cerámicos y el vidrio requieren una selección cuidadosa respecto de la composición, métodos de procesamiento, operaciones de acabado y métodos de ensamble con otros componentes. Las consecuencias potenciales de la falla de una parte siempre son un factor que debe tomarse en cuenta al diseñar los productos de cerámico y vidrio. Es importante conocer sus limitaciones (como la falta general de resistencia a la tensión, sensibilidad a defectos internos y externos y baja tenacidad ante impactos). Por otro lado, es necesario equilibrar estas limitaciones con las características deseables, como dureza, resistencia a rayaduras, resistencia a la compresión a temperatura ambiente y a temperatura elevada y una amplia variedad de propiedades físicas deseables.

Es importante controlar los parámetros de procesamiento, la calidad y el nivel de impurezas en las materias primas. Como en todas las decisiones de diseño, existen prioridades y limitaciones y es necesario considerar diversos factores de manera simultánea, incluyendo el número de piezas requeridas y los costos del herramental, el equipo y la mano de obra.

Los cambios dimensionales y la distorsión, así como la posibilidad de agrietamiento durante el procesamiento y la vida útil, son factores importantes en la selección de métodos para formar estos materiales. Cuando un componente cerámico o de vidrio es parte de un ensamble más grande, también es esencial considerar su compatibilidad con otros componentes. Es fundamental el tipo de carga y su dilatación térmica (como en los sellos y ventanas con marcos metálicos). En la tabla 3.1 se vio la amplia variedad de coeficientes de dilatación térmica que hay para diversos materiales metálicos y no metálicos. Por lo tanto, cuando una placa de vidrio se ajusta estrechamente en un marco metálico para ventana, las variaciones de temperatura (como la energía solar sobre un punto de la ventana) pueden provocar esfuerzos térmicos que producirían agrietamiento, fenómeno que suele observarse en algunos edificios altos. Una solución común consiste en colocar sellos de hule entre el vidrio y el marco para evitar esfuerzos debido a las diferencias de dilatación térmica.

Como se indica en las secciones 8.3.1 y 8.4.2, cerámicos y vidrios sufren un fenómeno conocido como *fatiga estática*, por el cual se pueden romper repentinamente bajo una carga estática después de cierto periodo. Aunque no ocurre en vacío o en aire seco, deben tomarse provisiones para evitar dicha falla. Una guía general es que, para que una pieza de vidrio soporte una carga de 1000 horas o más, el máximo esfuerzo que se puede aplicar sobre ella es de alrededor de un tercio del esfuerzo máximo que puede soportar durante el primer segundo de carga.

18.6 Procesamiento de superconductores

Aunque los *superconductores* (ver la sección 3.7) tienen un importante potencial de ahorro de energía en la generación, el almacenaje y la distribución de energía eléctrica, su procesamiento en formas y tamaños útiles para aplicaciones prácticas ha presentado dificultades significativas. Dos tipos básicos de superconductores son:

- Los metales, conocidos como **superconductores de baja temperatura** (LTSC, por sus siglas en inglés), incluyen combinaciones de niobio, estaño y titanio.
- Los cerámicos, conocidos como **superconductores de alta temperatura** (HTSC, por sus siglas en inglés), incluyen diversos óxidos de cobre. Aquí, "alta" temperatura significa la más aproximada a la temperatura ambiente, y por eso los HTSC son de mayor uso práctico.

Los materiales superconductores de cerámico existentes tienen la forma de polvo. Las principales dificultades para su fabricación son *(a)* su fragilidad inherente, y *(b)* su anisotropía, lo que dificulta la alineación de los granos en la dirección apropiada para lograr una alta eficiencia. Cuanto más pequeño sea el tamaño de los granos, más difícil será alinearlos.

El proceso básico de manufactura de superconductores consta de los siguientes pasos:

1. Preparar el polvo, mezclarlo y triturarlo en un molino de bolas hasta un tamaño de grano de 0.5 a 10 μm.
2. Dar forma al polvo.
3. Someterlo a tratamiento térmico.

El proceso más común de formado es el método de **polvo de óxido en tubo** (OPIT, por sus siglas en inglés). Primero se empaca el polvo en tubos de plata (ya que ésta tiene la conductividad eléctrica más alta de cualquier metal, tabla 3.2) y se sellan ambos extremos. Después los tubos se trabajan mecánicamente mediante procesos como estampado, estirado, extrusión, prensado isostático y laminado. Las formas finales pueden ser alambre, cinta, bobina o trozo.

Otros métodos principales de procesamiento son *(a)* recubrimiento de alambre de plata con un material superconductor, *(b)* deposición de películas de superconductores mediante ablación láser, *(c)* proceso de cuchilla de doctor, *(d)* revestimiento explosivo, y *(e)* aspersión o rocío químico. Después puede someterse la parte formada a tratamiento térmico para mejorar la alineación de los granos del polvo superconductor.

ESTUDIO DE CASO 18.1 Producción de cintas superconductoras de alta temperatura

En años recientes ha habido avances significativos en la comprensión de los materiales superconductores de alta temperatura y su uso potencial como conductores eléctricos. Para diversas aplicaciones militares y comerciales, como la propulsión eléctrica de embarcaciones y submarinos, sistemas de barrido de minas acuáticas y terrestres, generadores de cables de transmisión y almacenamiento de energía magnética de superconducción (SMES, por sus siglas en inglés), se pueden elegir dos óxidos con base de bismuto como materiales superconductores de material cerámico. Se han explorado varios métodos de procesamiento para producir alambres y cintas de filamentos múltiples. El proceso del polvo en tubo (fig. 18.15) se ha utilizado con éxito para fabricar tramos largos de alambres y cintas con base bismuto de propiedades deseables. El siguiente ejemplo demuestra este método para producir cintas de filamentos múltiples, superconductoras a alta temperatura.

La producción de cintas de filamentos múltiples comprende los siguientes pasos:

1. Primero se produce una palanquilla con características de compósito utilizando un contenedor de plata y polvo cerámico. La cubierta es plata recocida de alta pureza que se llena con el polvo de cerámico de bismuto en una atmósfera inerte.

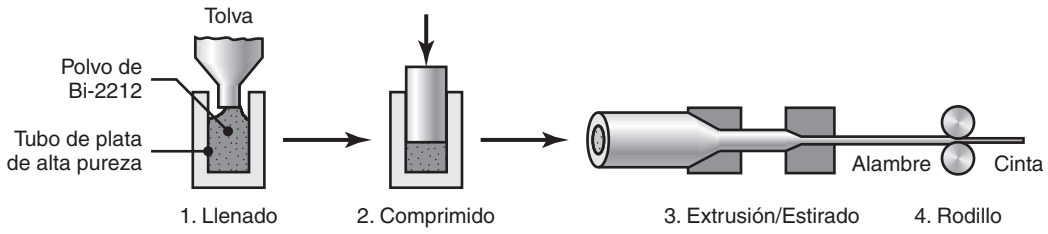


FIGURA 18.15 Esquema del proceso de polvo en tubo.

Se compacta gradualmente a una densidad relativa de 30% utilizando un ariete de acero. Para minimizar los gradientes de densidad (como los mostrados en la fig. 17.11), se agrega un gramo de polvo a la palanquilla por cada recorrido del pistón. Cada palanquilla se pesa y se mide para verificar la densidad inicial de compactación. Después se sellan sus extremos con una aleación de plata para evitar la contaminación durante el procesamiento posterior de deformación.

2. La palanquilla se extruye y estira para reducir su diámetro y aumentar la densidad del polvo. Las palanquillas se estiran a un diámetro final de 1.63 mm en un banco de estirado, utilizando 12 pases con una reducción de 20.7% por pase. Las matrices tienen un ángulo semicónico de 8° y la velocidad de estirado es de casi 1.4 m/min. Se usa un rocío de aceite semisoluble y estearato de zinc como lubricante.
3. Después del estirado, el alambre se transforma progresivamente en una cinta en un molino de laminado de una sola estación, con configuraciones de dúo y trío. Para el caso de cuatro rodillos, el diámetro de los rodillos de soporte (que son los rodillos de trabajo para la configuración dúo) es de 213 mm y el diámetro de los rodillos de trabajo es de 63.5 mm. Las dimensiones de la cinta final son de 100 a 200 μm de espesor, 2 a 3 mm de ancho, con un núcleo de cerámico de 40 a 80 μm de espesor y 1.0 a 1.5 mm de ancho.

Fuente: Cortesía de S. Vaze y M. Pradheeradhi, Concurrent Technologies Corporation.

RESUMEN

- Los productos cerámicos se moldean mediante diversas técnicas de vaciado, formado plástico o prensado. Después las partes se secan y se someten a cocción para proporcionarles resistencia y dureza. Las operaciones de acabado (como el maquinado y el rectificado) se pueden realizar para darle a la pieza su forma y precisión dimensional finales, o para someterla a tratamientos de superficie. Debido a su fragilidad inherente, los cerámicos se procesan con la debida consideración de distorsión y agrietamiento. También es importante controlar la calidad de la materia prima y los parámetros de procesamiento.
- Los productos de vidrio se fabrican mediante diversos procesos de moldeo que son similares a los utilizados para cerámicos y plásticos. Estos productos tienen una amplia variedad de formas, composiciones y propiedades mecánicas, físicas y ópticas. Su resistencia se puede mejorar mediante tratamientos térmicos y químicos.
- Algunos métodos continuos de procesamiento de vidrio son el estirado, laminado y flotado. Se pueden manufacturar productos de vidrio discretos mediante soplado, prensado, fundición centrífuga o hundimiento. Posteriormente, las partes se pueden recocer para relevar esfuerzos residuales.

- Las consideraciones de diseño para cerámicos y vidrios están orientadas por factores como su falta general de resistencia a la tensión y tenacidad y su sensibilidad a defectos externos e internos. También deben tomarse en cuenta la distorsión y el agrietamiento durante la producción.
- La manufactura de superconductores para convertirlos en productos útiles es desafiante debido a la anisotropía y la fragilidad inherente de los materiales correspondientes. Aunque también se están desarrollando nuevos procesos, el básico consiste en empacar el polvo en un tubo de plata y deformarlo plásticamente para darle las formas deseadas.

TÉRMINOS CLAVE

Agente humectante
Aglutinante
Barbotina
Cocción o quemado
Defloculante
Estirado
Formado plástico
Fundición centrífuga
Hundimiento
Método de polvo de óxido en tubo
Moldeo por inyección
Prensado
Prensado en caliente
Prensado y soplado
Proceso de cuchilla de doctor
Pulido con fuego
Revenido químico
Sinterización por microondas
Soplado
Soplado y soplado
Superconductores de alta temperatura
Superconductores de baja temperatura
Temple térmico
Torneado con plantillas
Vaciado en barbotina
Vidrio a prueba de balas
Vidrio flotado
Vidrio laminado
Vidrio templado

BIBLIOGRAFÍA

Bourdillon, A., *High Temperature Superconductors: Processing and Science*, Academic Press, 1994.

Concise Encyclopedia of Advanced Ceramics, The MIT Press, 1991.

Engineered Materials Handbook, Vol. 4: *Ceramics and Glasses*, ASM International, 1991.

German, R. M. y Bose, A., *Injection Molding of Metals and Ceramics*, Metal Powder Industries Federation, 1997.

Ghosh, A., Hiremath, B. y Halloran, J. (eds.), *Design for Manufacturability of Ceramic Components*, American Ceramic Society, 1995.

Green, D. J., *An Introduction to the Mechanical Properties of Ceramics*, Cambridge University Press, 1998.

Handbook of Ceramics and Composites, 3 vols., Marcel Dekker, 1991.

Hiremath, B., Gupta, T. y Nair, K. M. (eds.), *Ceramic Manufacturing Practices and Technologies*, American Ceramic Society, 1997.

Hiremath, B., Bruce, A. y Ghosh, A. (eds.), *Manufacture of Ceramic Components*, American Ceramic Society, 1995.

Hlavac, J., *The Technology of Glass and Ceramics*, Elsevier, 1983.

McHale, A. E. (ed.), *Phase Diagrams and Ceramic Processes*, Chapman & Hall, 1997.

McLellen, G. W. y Shand, E. B., *Glass Engineering Handbook*, McGraw-Hill, 1984.

Mistler, R. E. y Twiname, E. R., *Tape Casting: Theory and Practice*, American Ceramic Society, 1999.

Musikant, S., *What Every Engineer Should Know About Ceramics*, Marcel Dekker, 1991.

Mutsuddy, B. C., *Ceramic Injection Molding*, Chapman & Hall, 1995.

Rahaman, M. N., *Ceramics Processing and Sintering*, Marcel Dekker, 1998.

Reed, J. S., *Principles of Ceramics Processing*, 2a. ed., Wiley, 1995.

Reimanis, I., Henager, C. y Tomsia, A. (eds.), *Ceramic Joining*, American Ceramic Society, 1997.

Richerson, D. W., *Modern Ceramic Engineering*, 2a. ed., Marcel Dekker, 1992.

Sabia, R., Greenhurt, V. y Pantano, C. (eds.), *Finishing of Advanced Ceramics and Glasses*, American Ceramic Society, 1999.
Schwartz, M. M. (ed.), *Handbook of Structural Ceramics*, McGraw-Hill, 1992.
Wachtman, J. B. (ed.), *Ceramic Innovations in the 20th Century*, American Ceramic Society, 1999.
Weimer, A. (ed.), *Carbide, Nitride and Boride Materials: Synthesis and Processing*, Chapman & Hall, 1997.

PREGUNTAS DE REPASO

18.1 Indique los pasos comprendidos en el procesamiento de *(a)* los cerámicos, y *(b)* los vidrios.
18.2 Liste y describa las funciones de los aditivos en los cerámicos.
18.3 Describa la secuencia comprendida en el proceso de vaciado en barbotina.
18.4 ¿Cuál es el proceso de cuchilla de doctor?
18.5 Explique las ventajas del prensado isostático.
18.6 ¿Qué es el torneado con plantillas? ¿Qué formas produce?
18.7 Nombre los parámetros que son importantes en el secado de los productos cerámicos.
18.8 ¿Qué tipos de operaciones de acabado se utilizan en los cerámicos? ¿Y en el vidrio? ¿Por qué?
18.9 Describa los métodos con los que se fabrica el vidrio en hojas.
18.10 ¿Cómo se produce la tubería de vidrio? ¿Existen limitaciones en su longitud máxima?
18.11 Describa el proceso de soplado de vidrio.
18.12 ¿Cuál es la diferencia entre el revenido físico y el químico del vidrio?
18.13 ¿Cuál es la estructura del vidrio laminado? ¿Y del vidrio a prueba de balas?
18.14 ¿Cómo se fabrican las fibras de vidrio? ¿Qué tamaños tienen?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

18.15 Revise diversos productos en su casa, el trabajo o en tiendas. Observe su forma, color y transparencia. Identifique los que están fabricados con *(a)* cerámicos, *(b)* vidrio y *(c)* cerámicos vidriados.
18.16 Describa las diferencias y similitudes en el procesamiento de polvos metálicos contra cerámicos.
18.17 ¿Cuáles deben ser los requisitos de las propiedades de las bolas metálicas en un molino de bolas?
18.18 ¿Qué propiedad de los vidrios les permite dilatarse a grandes dimensiones mediante el soplado? ¿Se pueden someter los metales a dicho comportamiento? Explique su respuesta.
18.19 Explique por qué las partes de cerámico se pueden distorsionar o alabear durante el secado. ¿Qué precauciones se deben tomar para evitar esta situación?
18.20 ¿Qué propiedades deben tener las hojas plásticas para utilizarlas en el vidrio laminado? ¿Por qué?
18.21 Se indicó que cuanto mayor sea el coeficiente de dilatación térmica de un vidrio y menor sea su conductividad térmica, mayor será el nivel de esfuerzos residuales desarrollados. Explique por qué.
18.22 ¿Son similares algunos de los procesos utilizados para fabricar productos discretos de vidrio y los descritos en los capítulos anteriores? Descríbalos.
18.23 El moldeo por inyección es un proceso que se utiliza para metalurgia de polvos, polímeros y cerámicos. Explique por qué.
18.24 ¿Existe alguna similitud entre los mecanismos de reforzamiento utilizados en vidrio y los usados en materiales metálicos? Explique su respuesta.
18.25 Explique el fenómeno de fatiga estática y cómo afecta la vida útil de un componente de material cerámico o un vidrio.
18.26 Describa y explique las diferencias en la manera en que cada una de las siguientes superficies planas se fracturaría al golpearlas con un pedazo pesado de roca: *(a)* vidrio ordinario de ventana, *(b)* vidrio templado y *(c)* vidrio laminado.
18.27 ¿Existe alguna rebaba que se desarrolle en el vaciado en barbotina? ¿Cómo propondría eliminar dichas rebabas?
18.28 ¿Existen similitudes entre el vaciado en barbotina y la fundición por moldeo en cáscara? Explique su respuesta.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

18.29 Para el ejemplo 18.1, calcule *(a)* la porosidad de la parte seca si la porosidad de la parte cocida va a ser 9%, y *(b)* la longitud inicial, L_o, de la parte si las contracciones lineales durante el secado y la cocción son 8% y 7%, respectivamente.

18.30 ¿Cuáles serían las respuestas al problema 18.29 si las cantidades proporcionadas se dividieran a la mitad?

18.31 Suponga que es un instructor que abarca los temas descritos en este capítulo y realiza una prueba sobre diversos aspectos para probar la comprensión de los alumnos. Prepare dos problemas cuantitativos y proporcione las respuestas.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

18.32 Describa las similitudes y diferencias entre los procesos descritos en este capítulo y los de: *(a)* la parte II sobre la fundición de metales, y *(b)* la parte III sobre el formado.

18.33 Considere algunos productos cerámicos con los que esté familiarizado e indique una secuencia de procesos que crea que se hayan utilizado para manufacturarlos.

18.34 Investigue en la bibliografía técnica y describa las diferencias (en su caso) entre la calidad de las fibras de vidrio fabricadas para usarse en plásticos reforzados y las producidas para uso en comunicaciones mediante fibra óptica. Comente sus observaciones.

18.35 ¿Qué diferencias existen entre las consideraciones de diseño de los cerámicos y las de otros materiales? Explique su respuesta.

18.36 Busque un taller de cerámica/alfarería e investigue las diferentes técnicas utilizadas para colorear y decorar una pieza cerámica. ¿Cuáles son los diferentes métodos de aplicación de acabado metálico sobre la pieza?

18.37 Dé ejemplos de diseños y aplicaciones en las que se deba considerar la fatiga estática.

18.38 Investigue en la bibliografía y liste algunas partes automotrices fabricadas con cerámicos. Explique por qué se fabrican con cerámicos.

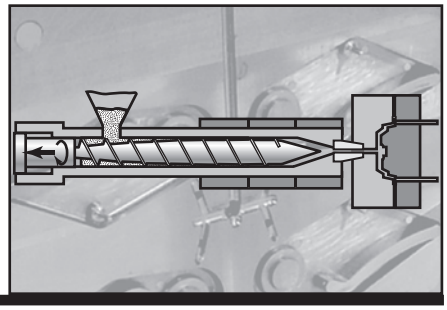
18.39 Describa sus ideas sobre los procesos que se pueden utilizar para *(a)* hacer estatuas pequeñas de cerámica (o material cerámico), *(b)* cerámica para baños, *(c)* ladrillos comunes, y *(d)* loseta para piso.

18.40 Como hemos visto, un método para producir alambre y cinta superconductora consiste en compactar polvos de estos materiales, colocarlos en un tubo y estirarlos a través de matrices o laminarlos. Describa sus ideas respecto de los pasos y posibles dificultades comprendidas en cada paso de esta producción.

18.41 Ya explicamos brevemente las características del vidrio a prueba de balas. Describa sus propias ideas sobre nuevos diseños posibles para este tipo de vidrio. Explique sus razonamientos.

CAPÍTULO

19 Formado y moldeo de plásticos y materiales compósitos



19.1 Introducción 534
19.2 Extrusión 536
19.3 Moldeo por inyección 544
19.4 Moldeo por soplado 552
19.5 Rotomoldeo 554
19.6 Termoformado 555
19.7 Moldeo por compresión 556
19.8 Moldeo por transferencia 557
19.9 Colado 558
19.10 Moldeo de espuma 559
19.11 Formado en frío y formado de fase sólida 560
19.12 Procesamiento de elastómeros 561
19.13 Procesamiento de compósitos de matriz polimérica 562
19.14 Procesamiento de compósitos de matriz metálica y de matriz cerámica 570
19.15 Consideraciones de diseño 572
19.16 Economía del procesamiento de plásticos y materiales compósitos 574

EJEMPLOS:

19.1 Película soplada 541
19.2 Fuerza requerida en el moldeo por inyección 551
19.3 Raquetas de tenis fabricadas con materiales compósitos 567
19.4 Partes de carrocerías automotrices de polímeros moldeadas mediante diversos procesos 570
19.5 Revestimientos para rotores y cilindros de frenos de compósitos de matriz metálica 571

ESTUDIO DE CASO:

19.1 Prótesis de cadera EPOCH 547

En este capítulo se describen los procesos de manufactura comprendidos en la producción de polímeros y materiales compósitos para productos de consumo e industriales. En especial, se describe lo siguiente:

- La extrusión como proceso básico para producir barras, tubería y pellets para uso posterior.
- Cómo se fabrican piezas discretas de plásticos (como botellas, partes automotrices y partes eléctricas con componentes metálicos).
- Producción de láminas y películas de plástico.
- Cómo se producen los plásticos reforzados y diversos materiales compósitos.
- Características de la maquinaria utilizada, diseño de moldes y consideraciones económicas.

Partes comunes fabricadas: una gran variedad de productos de consumo e industriales con una amplia gama de colores y características, pero con una resistencia a la tensión y a la temperatura típicamente limitadas.

Procesos alternativos: Colado, formado, metalurgia de polvos y maquinado, según las posibilidades del material de sustitución.

19.1 Introducción

El procesamiento de los plásticos y elastómeros comprende operaciones similares a las utilizadas en el formado y moldeo de metales, que se describen en los capítulos anteriores. El procesamiento de hules y elastómeros empezó en el siglo XIX con el descubrimiento de la vulcanización, realizado por C. Goodyear en 1839. Los plásticos comenzaron a desarrollarse en la década de 1920; su rápido crecimiento en la década de 1940 y siguientes produjo avances importantes en el diseño y la manufactura de diversos equipos de procesamiento para fabricar grandes cantidades de productos de consumo e industriales. En la década de 1970 empezaron a introducirse los plásticos reforzados, lo que llevó a un rápido avance en el uso de materiales compósitos, con propiedades únicas y los retos concurrentes para su producción.

Como ya se consideró en el capítulo 7, los termoplásticos se funden y los termofijos se curan a temperaturas relativamente bajas. Por lo tanto, a diferencia de los metales, son fáciles de manejar y su procesamiento requiere mucho menos fuerza y energía. En general, los plásticos se pueden moldear, fundir, formar y maquinar como formas com-

TABLA 19.1

Características generales de los procesos de formado y moldeo para plásticos y materiales compósitos

Proceso	Características
Extrusión	Secciones transversales continuas, uniformemente sólidas o huecas y complejas; altas capacidades de producción; costos de herramental relativamente bajos; tolerancias amplias.
Moldeo por inyección	Formas complejas de diversos tamaños; paredes delgadas; capacidades de producción muy altas; herramentales costosos; buena precisión dimensional.
Moldeo de espuma estructural	Partes grandes con alta relación de rigidez a peso; herramental menos costoso que en el moldeo por inyección; bajas capacidades de producción.
Moldeo por soplado	Partes huecas de pared delgada y botellas de varios tamaños; altas capacidades de producción; costos relativamente bajos de herramental.
Rotomoldeo	Accesorios grandes, huecos, de forma relativamente simple; costos relativamente bajos del herramental; capacidades de producción relativamente bajas.
Termoformado	Cavidades huecas o relativamente profundas; costos bajos de herramental; capacidades medias de producción.
Moldeo por compresión	Partes similares al forjado de matriz de impresión; herramental costoso; capacidades medias de producción.
Moldeo por transferencia	Partes más complejas que las de moldeo por compresión; capacidades más altas de producción; altos costos de herramental; cierta pérdida en desperdicios.
Fundición	Formas simples o intrincadas fabricadas con moldes rígidos o flexibles de bajo costo; bajas capacidades de producción.
Procesamiento de materiales compósitos	Tiempos largos de los ciclos; operación costosa; los costos del herramental dependen del proceso.

plejas con pocas operaciones, de manera fácil y a tasas de producción elevadas (tabla 19.1). También se pueden unir por diferentes medios (sección 32.6) y recubrir (por lo regular, para mejorar la apariencia) mediante diversas técnicas (descritas en el capítulo 32). Los plásticos adquieren formas de productos discretos o como láminas, placas, barras y tubería a los que después se da forma mediante procesos secundarios para obtener una variedad de productos discretos. Los tipos y las propiedades de los polímeros y la forma y complejidad de los componentes que pueden producirse con ellos se ven afectados por el método de manufactura y los parámetros de procesamiento.

Por lo general, los plásticos se envían a plantas manufactureras en forma de pellets, gránulos o polvos y se funden (en el caso de los termoplásticos) justo antes del proceso de moldeo. En particular, los plásticos líquidos que adquieren una forma sólida cuando se curan se utilizan en la fabricación de termofijos y partes de plástico reforzado. Debido a una creciente conciencia ecológica, las materias primas también pueden estar constituidas por plásticos molidos o cortados que se obtienen de centros de reciclaje. Sin embargo, como podría esperarse, la calidad del producto no es tan alta para dichos materiales.

En este capítulo seguimos el esquema mostrado en la figura 19.1, que describe los procesos básicos y la economía del formado y moldeo de los plásticos y los plásticos reforzados. También se describen las técnicas de procesamiento de los compósitos de matriz metálica y de matriz cerámica, que se vuelven cada vez más importantes en diversas aplicaciones con requerimientos críticos. Comenzamos con las técnicas de *procesamiento de fusión* (empezando con la extrusión) y continuamos con los procesos de moldeo; ambas categorías comprenden la aplicación de presión externa durante el procesamiento.

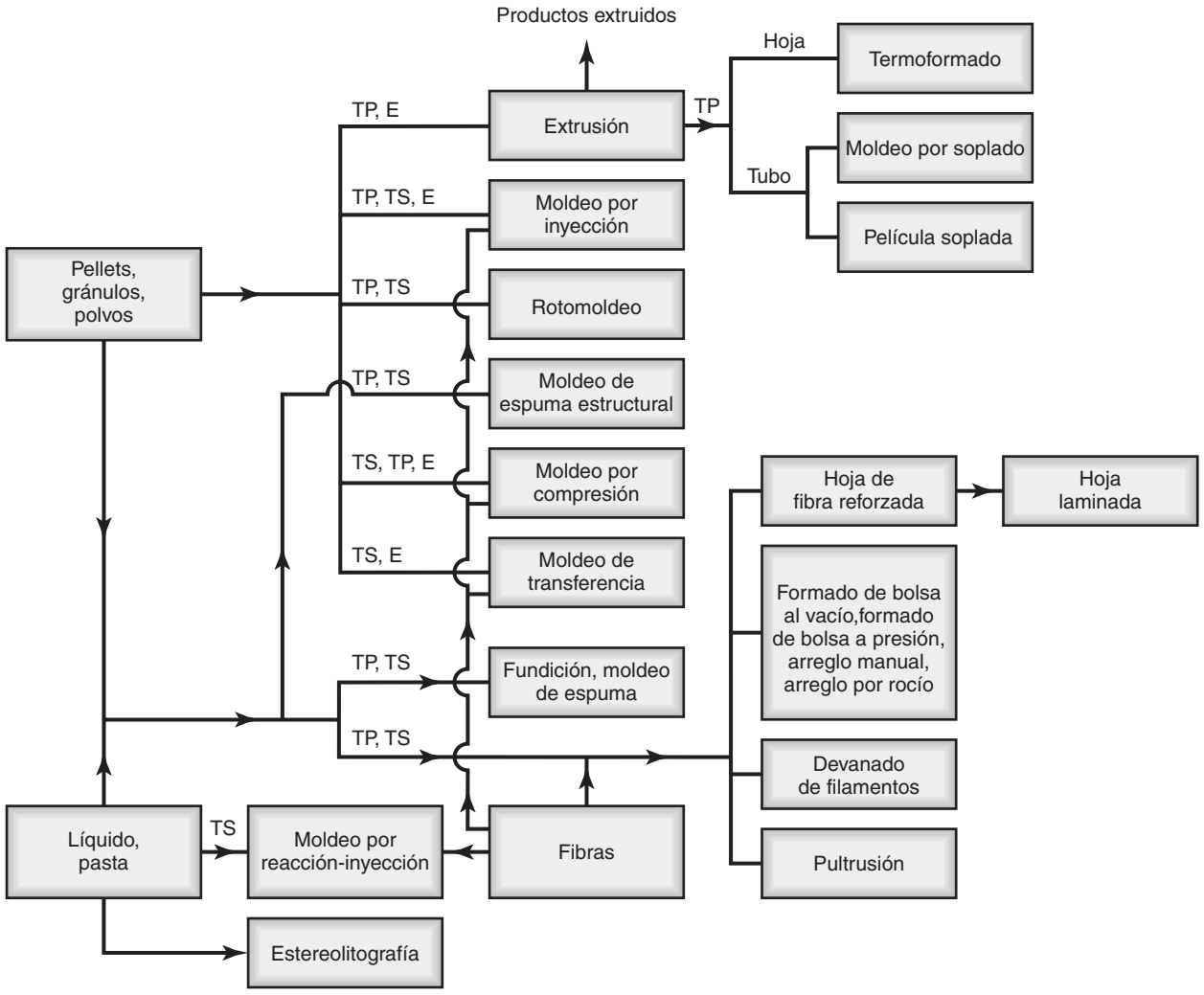


FIGURA 19.1 Esquema de los procesos de formado y moldeo de plásticos, elastómeros y materiales compósitos. (TP = Termoplástico; TS = Termofijo; E = Elastómero.)

19.2 Extrusión

En la *extrusión*, que constituye el volumen más grande de plásticos producidos, las materias primas en forma de pellets, gránulos o polvo termoplástico se colocan en una *tolva* y alimentan el barril de un *extrusor de tornillo* (fig. 19.2). Dicho barril se equipa con un tornillo helicoidal que mezcla los pellets y los transporta hacia el dado. La fricción interna por la acción mecánica del tornillo calienta y funde los pellets. La acción del tornillo también aumenta la presión dentro del barril.

Los tornillos tienen tres secciones diferentes:

1. *Sección de alimentación*: transporta el material de la tolva a la región central del barril.
2. *Sección de fusión* (también conocida como *sección de compresión* o *transición*): en ella, el calor generado por el cizallamiento viscoso de los pellets de plástico y los calentadores externos hace que empiece la fusión.
3. *Sección de bombeo*: aquí ocurre un cizallamiento adicional (a alta velocidad) y la fusión por el aumento de presión que se produce en la matriz.

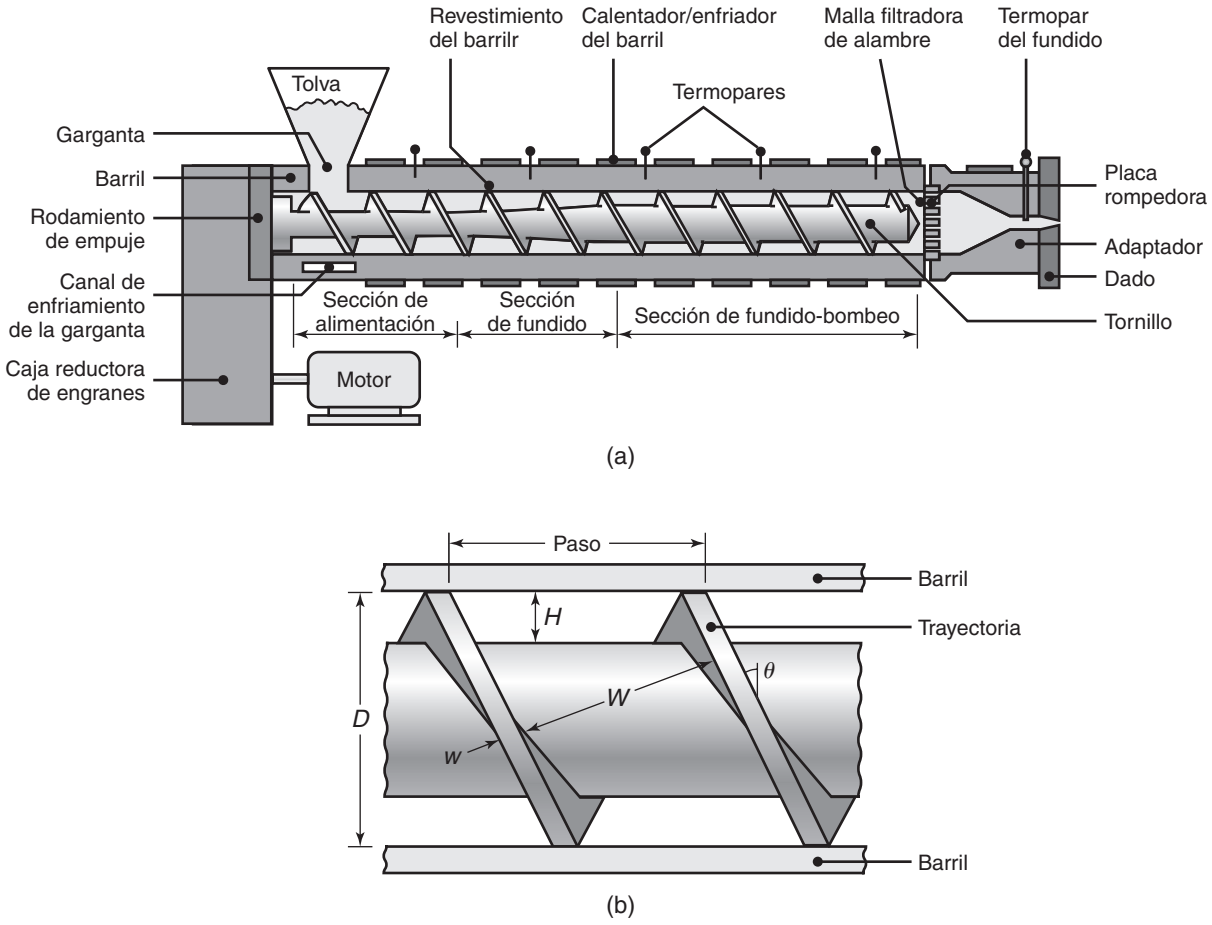


FIGURA 19.2 *(a)* Esquema de un extrusor de tornillo característico. *(b)* Geometría de un tornillo de extrusor. Se pueden extruir formas complejas con dados relativamente simples y poco costosos.

Se pueden cambiar las longitudes de estas secciones individuales para adaptarlas a las características de fusión de diferentes tipos de plásticos. El plástico fundido se fuerza a través de un dado mediante un proceso similar al de la extrusión de metales. Por lo general, se coloca una malla de alambre metálico (fig. 19.2a) justo antes del dado para filtrar la resina sin fundir o sólida. Esta malla también ayuda a producir una contrapresión en el barril; se reemplaza en forma periódica. Entre la malla y el dado se coloca una *placa rompedora*, que cuenta con orificios pequeños y ayuda a mejorar la mezcla del polímero antes de que entre en el dado. Después, el producto extruido se enfría, por lo común exponiéndolo al aire soplado o pasándolo a través de un canal lleno de agua (conducto).

Para minimizar la contracción y distorsión del producto, es importante controlar la velocidad y uniformidad del enfriamiento. Además de los extrusores de tornillo simple, otros diseños incluyen *tornillos gemelos* (dos tornillos paralelos) y *tornillos múltiples* para polímeros que son difíciles de extruir (ver también *tornillo alternativo* en la sección 19.3).

En la figura 19.2b se muestra un tornillo helicoidal común y se indican los parámetros importantes que afectan la mecánica de la extrusión de polímeros. En todo momento el plástico fundido tiene la forma de una cinta helicoidal con espesor (H) y anchura (W) y se transporta hacia la salida del extrusor a través de la trayectoria creada por los tornillos giratorios. La forma, el paso y el ángulo de trayectoria del tornillo helicoidal son parámetros esenciales, ya que afectan el flujo del polímero a través del extrusor. La relación de longitud (L) del barril a su diámetro (D) también es importante. La relación de L/D

en los extrusores comerciales típicos va de 5 a 30 y, por lo general, los diámetros de los barriles van de 25 a 200 mm (1 a 8 pulgadas).

Por su impacto directo sobre la calidad del producto extruido y el diseño del extrusor y de los dados, se han realizado muchos estudios acerca de la mecánica de esta operación. Se han establecido diversas relaciones entre las dimensiones mostradas en la figura 19.2b, la velocidad giratoria del tornillo y la viscosidad del polímero para describir lo que se conoce como *características del extrusor* y *características del dado*. Éstas determinan después cantidades como la presión y la velocidad de flujo en cualquier lugar durante la operación. En este libro ya no se incluyen más detalles porque se encuentran fuera de su alcance, pero están disponibles en diversas referencias citadas en la bibliografía al final del capítulo.

Debido a que existe una alimentación continua de materia prima en la tolva, se pueden extruir diversos productos largos en forma continua (como barras redondas y de secciones, canales, hoja, tubería, tubos y componentes arquitectónicos sólidos). Es posible extruir formas complejas con sección transversal constante con herramental relativamente económico. En la figura 19.3 se muestran perfiles comunes de dados. Obsérvese que algunos de éstos no son intuitivos, lo cual se debe al polímero, que por lo general experimenta una recuperación mucho mayor, aunque no uniforme, que la que se encuentra en la extrusión de metales. Además, puesto que el polímero se *dilata* cuando sale del dado, las aberturas mostradas en la figura 19.3 son más pequeñas que las secciones transversales extruidas. Después de enfriarse, el producto extruido se puede *estirar* (*dimensionar*) mediante un extractor y enrollarse o cortarse a las longitudes deseadas.

El control de los parámetros de procesamiento, como la velocidad de rotación del tornillo extrusor, las temperaturas de las paredes del barril, el diseño del dado y las velocidades de enfriamiento y estirado, es importante para garantizar la integridad y precisión dimensional uniforme del producto. Los *defectos* observados en los plásticos extruidos son similares a los de la extrusión de metales (descritos en la sección 15.5). La forma del dado es básica, ya que puede inducir altos esfuerzos en el producto, provocando que desarrolle fracturas en la superficie (como también ocurre en los metales). Otros defectos de la superficie son los *efectos tipo bamboo* y *de piel de tiburón*, debido a la combinación de fricción en las interfaces dado-polímero, la recuperación elástica y la deformación no uniforme de las capas exteriores del producto respecto de su masa durante la extrusión.

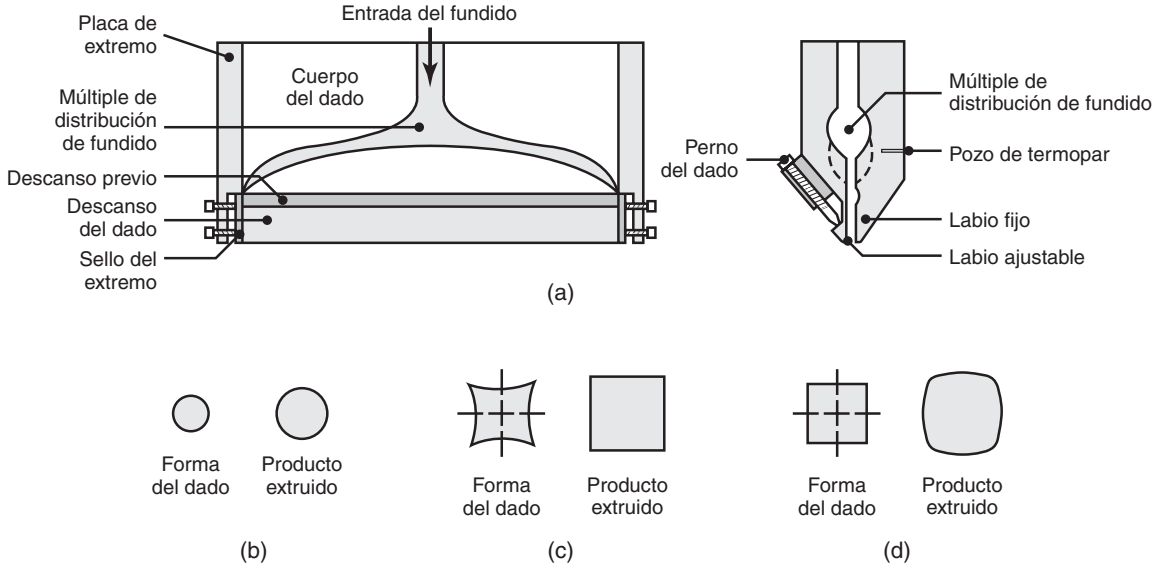


FIGURA 19.3 Geometrías de dados comunes de extrusión: *(a)* dado de gancho para ropa para extruir lámina; *(b)* dado redondo para producir barras, y *(c)* y *(d)* recuperación no uniforme de la parte después que sale del dado. *Fuente*: *(a) Encyclopedia of Polymer Science and Engineering* (2a. ed.). Copyright © 1985. Reimpreso con permiso de John Wiley & Sons, Inc.

Por lo general, los extrusores se clasifican por el diámetro (D) del barril y la relación de longitud a diámetro (L/D) del mismo. Los costos de la maquinaria pueden ser de 300,000 dólares, incluyendo el costo del equipo para enfriamiento corriente abajo y enrollado del producto extruido.

19.2.1 Diversos procesos de extrusión

Existen múltiples variaciones del proceso básico de extrusión para producir los siguientes tipos de productos.

Tubos y tubería de plástico. Éstos se producen en un extrusor con un *dado de araña*, como se muestra en la figura 19.4a (ver también fig. 15.8 para detalles). Los refuerzos de fibra tejida o de alambre también se pueden alimentar mediante matrices especialmente diseñadas para esta operación para producir mangueras reforzadas que

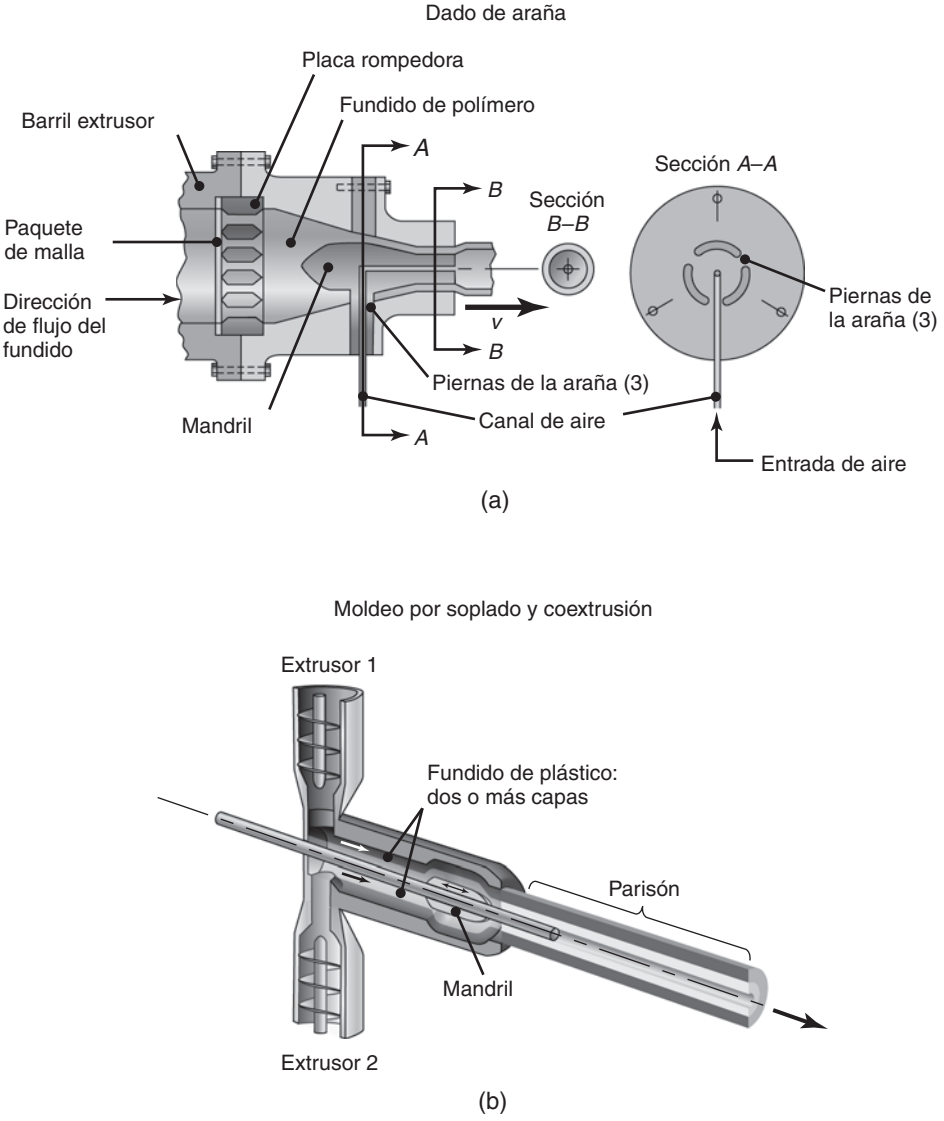


FIGURA 19.4 Extrusión de tubos. *(a)* Extrusión utilizando un dado de araña (ver también la figura 15.8) y aire presurizado. *(b)* Coextrusión para producir una botella.

requieren soportar presiones superiores. La extrusión de tubos también es un primer paso necesario para otros procesos relacionados con éste, como el moldeo de extrusión por soplado y la película soplada.

Tubería de plástico rígido. Extruida mediante un proceso en el que la matriz se gira, la tubería de plástico rígido provoca que el polímero se cizalle y oriente biaxialmente durante la extrusión. Como resultado, el tubo tiene más resistencia al aplastamiento y una mayor relación de resistencia a peso que los tubos extruidos de manera convencional.

Coextrusión. Como se muestra en la figura 19.4b, la coextrusión comprende la extrusión simultánea de dos o más polímeros a través de una matriz simple. Por lo tanto, la sección transversal del producto contiene diferentes polímeros, cada uno con sus propias características y función. Es común utilizar la coextrusión en formas como láminas planas, películas y tubos; se usa además de manera específica en empaques de alimentos, en los que distintas capas de polímeros tienen diferentes funciones, como *(a)* ser inertes para los alimentos, *(b)* servir de barrera a fluidos como el agua o el aceite, y *(c)* etiquetar el producto.

Cable eléctrico con recubrimiento plástico. El cable eléctrico de alambre y las cintas también se extruyen y recubren con plástico mediante este proceso. El alambre se alimenta por la abertura del dado a una velocidad controlada, junto con el plástico extrudido, para producir un recubrimiento uniforme. Los *sujetadores para papel forrados de plástico* también se fabrican por medio de extrusión. Con el propósito de asegurar el aislamiento apropiado, se verifica de manera continua la resistencia de los cables eléctricos extrudidos conforme salen del dado; también se marcan automáticamente con un rodillo para identificar el tipo específico de cable.

Láminas y películas de polímeros. Éstos se pueden producir por medio de un dado de extrusión plana diseñado especialmente, como el que se muestra en la figura 19.3a. También conocido como *dado de gancho para ropa*, está diseñado para distribuir el polímero fundido de manera uniforme a lo ancho. El polímero se extruye forzándolo a través del dado, después de lo cual se hace pasar la lámina extruida primero sobre rodillos enfriados con agua y luego por un par de rodillos de extracción recubiertos con hule. Por lo general, la *lámina* de polímero tiene un espesor mayor a 0.5 mm y la *película* tiene un espesor menor a 0.5 mm.

Películas delgadas de polímero. Las *bolsas de plástico* comunes y otros productos de polímeros de película delgada se fabrican con **película soplada**, que se fabrica a partir de un tubo de pared delgada producido por un extrusor (fig. 19.5). En este proceso se extruye un tubo de modo continuo y vertical hacia arriba; después se expande en forma de globo, soplando aire a través del centro del dado de extrusión hasta que se llega al espesor deseado de la película. Debido a la orientación molecular de los termoplásticos (sección 7.3), en este proceso se desarrolla una *línea mate* en el globo, con el cual se reduce su transparencia.

Por lo regular, el globo se enfría con aire proveniente de un anillo de enfriamiento que está a su alrededor, el cual también puede actuar como barrera para evitar una expansión mayor del globo, controlando así sus dimensiones. Después la burbuja enfriada se *corta* a lo largo convirtiéndose en una *película para envoltura*, o se sella y se corta transversalmente convirtiéndose en *bolsa de plástico*. La anchura de la película producida luego de cortarse a lo largo puede ser del orden de 6 m (20 pies) o más.

La relación del diámetro soplado al diámetro del tubo extrudido se conoce como *relación de soplado*, que en este proceso es de 3:1. Obsérvese que, como se describe en la sección 2.2.7, el polímero debe tener un exponente elevado de sensibilidad a la velocidad de deformación (m), para que mediante este proceso se sople con éxito sin rasgarlo.

Películas de plástico. Las películas de plástico, en particular el politetrafluoroetileno (PTFE; nombre comercial: *Teflón*), pueden producirse mediante el *rasurado* de la circunferencia de una palanquilla de plástico redonda utilizando navajas diseñadas especialmente, igual a como se produce la chapa de una pieza grande de madera redonda. El proceso se conoce como **pelado** (ver también la sección 24.4).

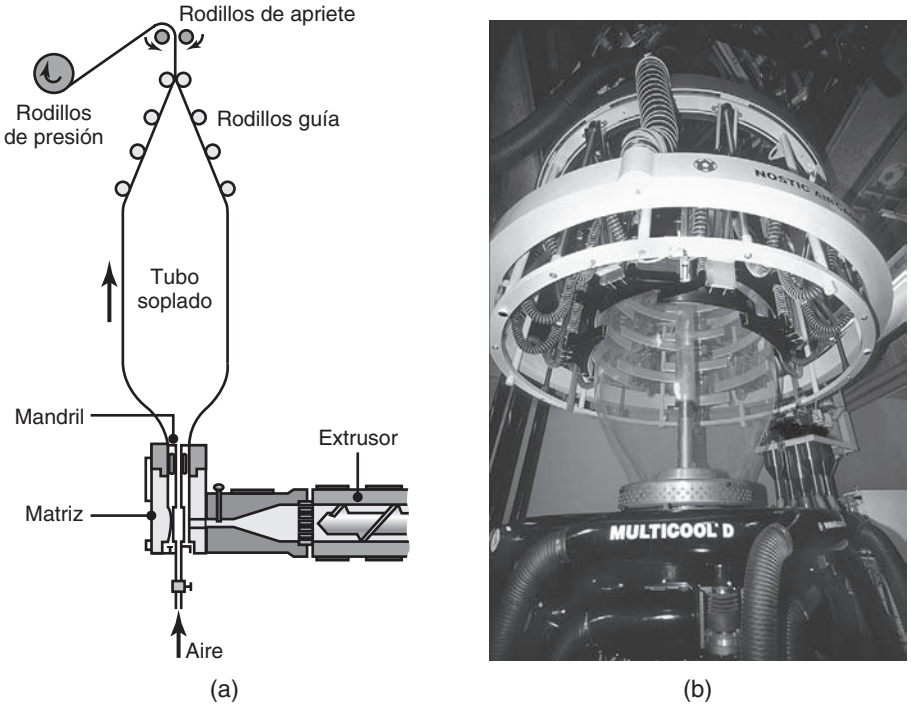


FIGURA 19.5 *(a)* Esquema de la producción de película delgada y bolsas de plástico a partir de tubo, elaborado primero con un extrusor y después soplado con aire. *(b)* Operación de película soplada. Este proceso está bien desarrollado, produciendo cantidades muy grandes de película y bolsas de plástico para compras a muy bajo costo. *Fuente*: Cortesía de Windmoeller & Hoelscher Corp.

Pellets. Utilizadas como materia prima para otros métodos de procesamiento de plásticos que se describen en este capítulo, los pellets también se fabrican por extrusión. Se extruye una barra sólida de diámetro pequeño en forma continua y después se *corta* en secciones cortas (*pellets*). Con algunas modificaciones, los extrusores también se pueden usar como fundidores simples para otros procesos de moldeo, como el moldeo por inyección y por soplado.

EJEMPLO 19.1 Película soplada

Supóngase que una bolsa común de plástico para compras, fabricada con película soplada, tiene una dimensión lateral (anchura) de 400 mm. *(a)* ¿Cuál sería el diámetro del dado de extrusión? *(b)* Estas bolsas son relativamente resistentes durante el uso. ¿Cómo se logra esta resistencia?

Solución

a. El perímetro de la bolsa plana es (2)(400) = 800 mm. Como la sección transversal original de la película es redonda, el diámetro soplado debe ser $\pi D = 800$; por lo tanto, $D = 255$ mm. Recuérdese que en este proceso se expande un tubo de 1.5 a 2.5 veces el diámetro del dado de extrusión. Tomando el valor máximo de 2.5, calculamos el diámetro del dado como 255/2.5 = 100 mm.

b. Obsérvese en la figura 19.5a que, después de extrudido, el globo se jala hacia arriba con los rodillos de prensado. Por lo tanto, además del ensanchado diametral y la orientación molecular concurrente, la película se *ensancha* y *orienta* en dirección longitudinal. La orientación biaxial resultante de las moléculas del polímero mejora de manera significativa la resistencia y tenacidad de la bolsa de plástico.

19.2.2 Producción de fibras de polímeros para refuerzo

Las fibras de polímeros tienen diversas aplicaciones importantes. Además de utilizarse como refuerzo en materiales compósitos, se emplean en una amplia variedad de productos de consumo e industriales, incluyendo ropa, alfombras, telas, cuerdas y empaques.

La mayoría de las fibras sintéticas utilizadas en los plásticos reforzados son polímeros que se extruyen a través de los pequeños agujeros de un dispositivo conocido como **cabeza de hilar** (parecido a una regadera), a fin de formar filamentos continuos de polímero semisólido. El extrusor fuerza el polímero a través de la cabeza de hilar, que puede tener de uno a varios cientos de agujeros. Si los polímeros son termoplásticos, primero se funden en el extrusor como se describe en la sección 19.2. Los polímeros termofijos también se pueden formar como fibras disolviéndolos o tratándolos químicamente primero, de manera que puedan extruirse. Estas operaciones se efectúan a altas velocidades de producción y con una confiabilidad muy grande.

Conforme salen los filamentos de los agujeros en la cabeza de hilar, el polímero líquido pasa primero a un estado gomoso y después se solidifica. Este proceso de extrusión y solidificación de filamentos continuos se conoce como **rechazado**. El término también se utiliza para la producción de textiles naturales (como el algodón o la lana), en el que las piezas de fibra cortadas se trenzan como hilados. Existen cuatro métodos de torcido de fibras: torcido fundido, en húmedo, en seco y en gel.

1. En el **torcido fundido** (que se muestra en la fig. 19.6), el polímero se funde para extruirlo a través de la cabeza de hilar y después se solidifica directamente por enfriamiento. Una cabeza de hilar característica de esta operación tiene unos 50 agujeros de 0.25 mm (0.01 pulgada) de diámetro y alrededor de 5 mm (0.2 pulgada) de espesor. Las fibras que emergen de la cabeza de hilar se enfrían mediante convección de aire forzado y se jalan simultáneamente, de manera que su diámetro final se vuelve mucho más pequeño que la abertura de la cabeza de hilar. Los polímeros (como nailon, olefina, poliéster y PVC) se producen de esta manera. Debido a las importantes aplicaciones de las fibras de nailon y poliéster, el torcido fundido es el proceso más importante de manufactura de fibras.
   Las fibras torcidas fundidas también pueden extruirse de la cabeza de hilar en varias otras secciones transversales, como en el triángulo de lados curvos y en formas pentagonales, octagonales y huecas. Las fibras huecas atrapan el aire y, así, proporcionan aislamiento térmico adicional, mientras que otras secciones transversales tienen aplicaciones específicas.
2. El **torcido en húmedo** es el proceso más antiguo de producción de fibras y se utiliza para polímeros que se disuelven en un solvente. Las cabezas de hilar se sumergen en un baño químico; conforme emergen los filamentos, se precipitan en el baño químico, produciendo una fibra que después se teje en una bobina. El término "torcido en húmedo" se refiere al uso de un baño de líquido precipitador, el cual produce fibras húmedas que es necesario secar antes de emplearlas. Con este proceso se pueden producir fibras de acrílico, rayón y aramidas.
3. El **torcido en seco** se utiliza para termofijos transportados por un solvente. Sin embargo, en vez de precipitar el polímero por dilución como en el torcido en húmedo, la solidificación se logra evaporando el solvente en una corriente de aire o gas inerte. Los filamentos no entran en contacto con un líquido precipitador, eliminando así la necesidad de secado. El torcido en seco puede utilizarse para producir fibras de acetato, triacetato, elastano base poliéter y acrílico.
4. El **torcido en gel** es un proceso especial que se utiliza para obtener propiedades de alta resistencia o especiales en las fibras. El polímero no se funde por completo ni se disuelve en líquido, sino que sus moléculas se unen en varios puntos en forma de cristales líquidos. Esta operación produce fuerzas entrelazadas resistentes en los filamentos elaborados que pueden aumentar de manera significativa la resistencia a

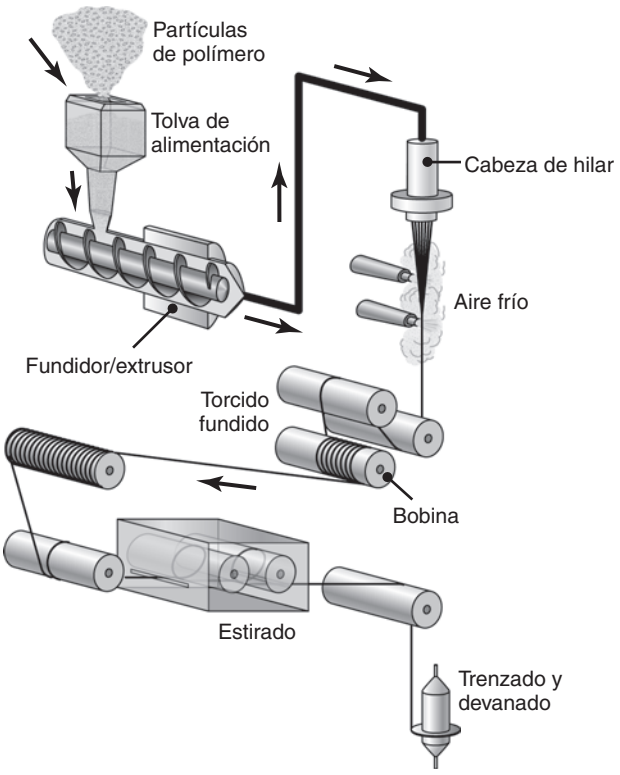


FIGURA 19.6 Proceso de torcido fundido para producir fibras de polímero. Las fibras se utilizan en una variedad de aplicaciones, incluyendo telas y como refuerzos para materiales compósitos.

la tensión de las fibras. Además, los cristales líquidos se alinean a lo largo del eje de la fibra por la distorsión encontrada durante la extrusión. Los filamentos emergen de la cabeza de hilar con un alto grado de orientación, poco usual, de unos con respecto a los otros, mejorando así su resistencia. Este proceso también se conoce como *torcido en seco y en húmedo*, porque los filamentos primero pasan a través del aire y después se enfrían aún más en un baño líquido. Algunas fibras de polietileno y aramida de alta resistencia se producen mediante torcido en gel.

Un paso necesario en la producción de la mayoría de las fibras es la aplicación de *estirado* para orientar las moléculas del polímero en la dirección de la fibra. Esta orientación es el motivo principal de la alta resistencia de las fibras en comparación con el polímero en forma volumétrica. El estirado se puede realizar mientras el polímero siga flexible (justo después de la extrusión de la cabeza de hilar) o se puede efectuar como una operación de estirado en frío. La deformación inducida puede llegar a ser de 800%. Las **fibras de grafito** se producen con diferentes fibras de polímeros por *pirólisis*. En esta operación se aplica un calor controlado de 1500 °C a 3000 °C (2730 °F a 5400 °F) a la fibra de polímero (generalmente poliacrilonitrilo, PAN) para extraer todos los elementos, excepto el carbono. La fibra está bajo tensión para desarrollar un alto grado de orientación en la estructura de la fibra resultante. (Ver también la sección 9.2.1 sobre las propiedades de las fibras de grafito y otros detalles).

19.3 Moldeo por inyección

El *moldeo por inyección* es similar a la fundición a presión en cámara caliente (fig. 19.7; ver también la sección 11.3.5). Los pellets o gránulos alimentan al cilindro caliente y el fundido se fuerza dentro del molde mediante un *émbolo* hidráulico o con un sistema de *tornillo giratorio* de un extrusor. Como sucede en la extrusión de plásticos, el barril (cilindro) se calienta por fuera para estimular la fusión del polímero. Sin embargo, en las máquinas de moldeo por inyección, una parte mucho mayor del calor transferido al polímero se debe al calentamiento por fricción.

Las máquinas modernas son del *tipo tornillo alternativo* o *plastificante* (fig. 19.7b), con la secuencia de operación mostrada en la figura 19.8. Conforme aumenta la presión a la entrada del molde, el tornillo giratorio empieza a retroceder por la presión hasta una distancia predeterminada. Este movimiento controla el volumen del material a inyectar. Después el tornillo deja de girar y se empuja hidráulicamente hacia delante, precipitando el plástico fundido dentro de la cavidad del molde. Por lo general, las presiones desarrolladas van de 70 a 200 MPa (10,000 a 30,000 psi).

En la figura 19.9 se muestran algunos productos moldeados por inyección. Otros son vasos, contenedores, alojamientos, mangos de herramientas, perillas, juguetes, accesorios de plomería, receptores telefónicos y componentes eléctricos y de equipo de comunicación. Para los termoplásticos, los moldes se mantienen relativamente fríos, a unos 90 °C (190 °F). Las partes de termofijos se moldean en moldes calientes a unos 200 °C (400 °F), donde tiene lugar la *polimerización* y el *encadenamiento cruzado*.

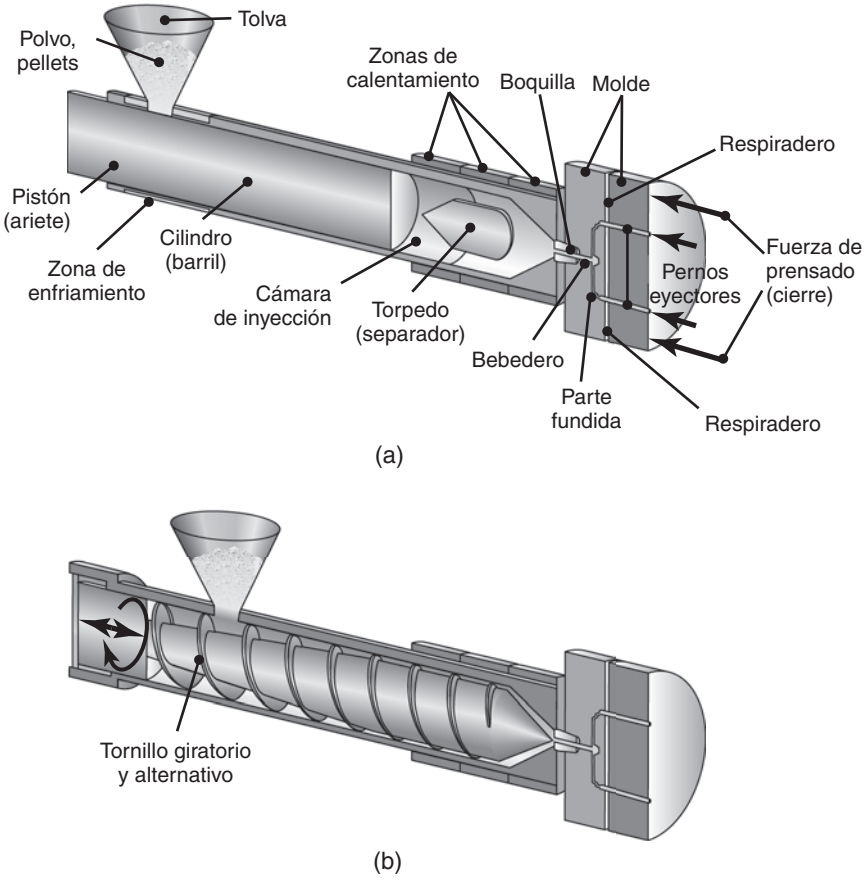


FIGURA 19.7 Esquema del moldeo por inyección con: *(a)* émbolo, y *(b)* tornillo giratorio alternativo.

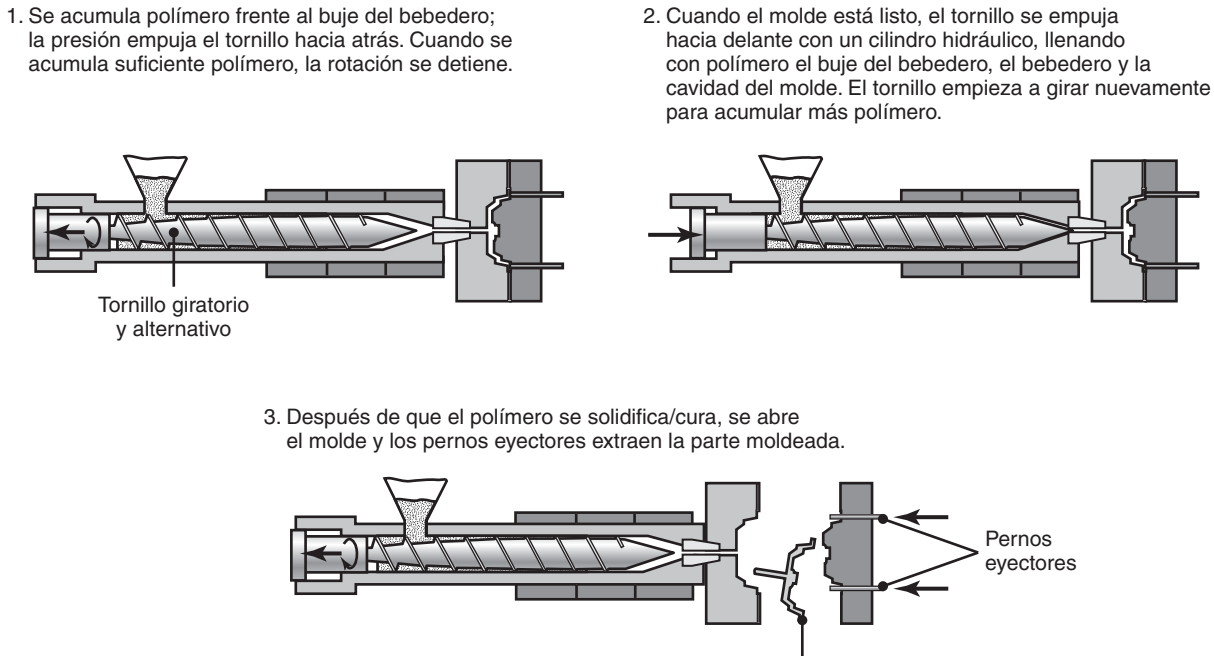


FIGURA 19.8 Secuencia de operaciones en el moldeo por inyección de una parte con un tornillo alternativo. Este proceso se utiliza ampliamente para diversos productos de consumo y comerciales, como juguetes, contenedores, perillas y equipo eléctrico (ver fig. 19.9).



FIGURA 19.9 Productos comunes fabricados mediante moldeo por inyección, incluyendo ejemplos de moldeo con insertos. *Fuente*: *(a)* Cortesía de Plainfield Molding, Inc. *(b)* Cortesía de Rayco Mold y Mfg. LLC.

Después de que la parte se ha enfriado lo suficiente (para los termoplásticos) o curado (para los termofijos), los moldes se abren y se extrae la pieza por medio de *expulsores*. Los moldes se cierran y el proceso se repite en forma automática. Los elastómeros también se moldean por inyección para obtener productos discretos mediante estos procesos. El material se funde al inyectarlo en el molde, por lo que pueden obtenerse formas complejas con buena precisión dimensional. Sin embargo, debido al enfriamiento no uniforme de la pieza dentro del molde, se desarrollan esfuerzos residuales en la misma.

En el moldeo por inyección también se utilizan moldes con mandriles móviles y destornilladores, ya que permiten el moldeo de partes que tienen cavidades múltiples o roscas internas y externas. Para adaptarse al diseño de la parte, los moldes pueden tener varios componentes (fig. 19.10), incluyendo canales (como los usados en las matrices de fundición para metales), machos o corazones, cavidades, canales de enfriamiento, insertos, pernos de expulsión y eyectores. Existen tres tipos básicos de moldes:

1. **Molde de canal frío de dos placas:** este diseño es el más simple y común, como se muestra en la figura 19.11a.
2. **Molde de canal frío de tres placas** (fig. 19.11b)**:** el sistema de canales se separa de la parte al abrir el molde.
3. **Molde de canal caliente** (fig. 19.11c), también conocido como **molde sin canal**: el plástico fundido se mantiene caliente en una placa de canal caliente.

En los moldes de canal frío debe extraerse el plástico solidificado que permanece en los canales que conectan la cavidad del molde con el extremo del barril, lo que suele hacerse mediante recortado. Posteriormente, este desperdicio se puede cortar y reciclar. En los moldes de canal caliente (que son más costosos) no existen compuertas, canales ni bebederos sujetos a la parte moldeada. Los tiempos de los ciclos son más cortos, porque sólo se debe enfriar y expulsar la parte moldeada.

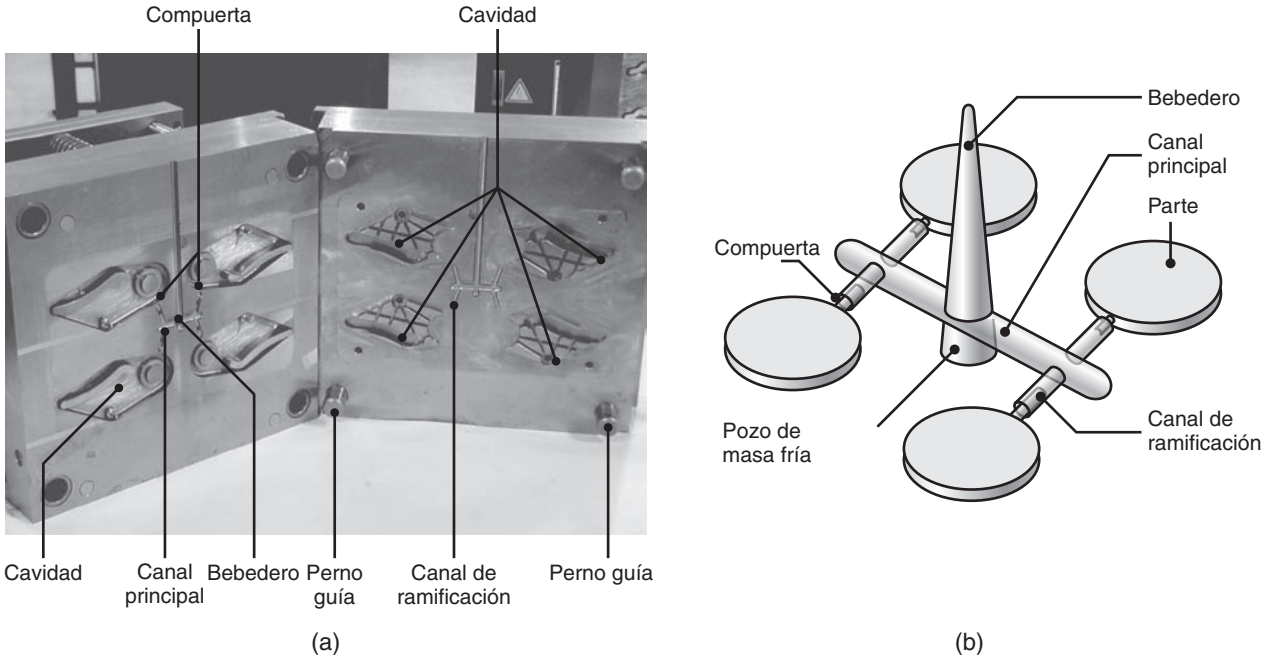


FIGURA 19.10 Ilustración de las características de un molde para moldeo por inyección. *(a)* Molde de dos placas con características importantes identificadas. *(b)* Esquema de las características en un molde. *Fuente*: Cortesía de Tooling Molds West, Inc.

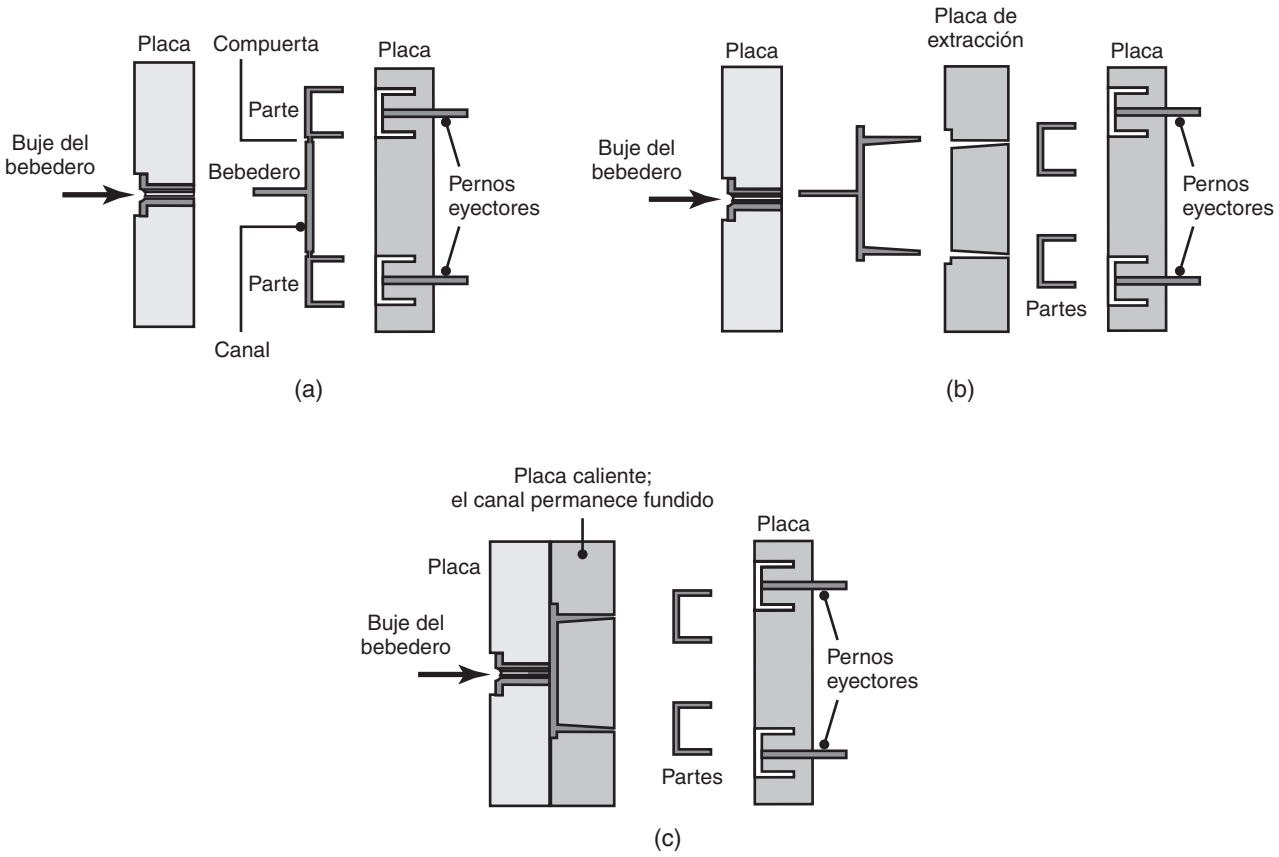


FIGURA 19.11 Tipos de moldes utilizados en moldeo por inyección: *(a)* molde de dos placas; *(b)* molde de tres placas y *(c)* molde de canal caliente.

El **moldeo por inyección de múltiples componentes** (también conocido como *moldeo por coinyección* o *de sándwich*) permite el formado de partes con una combinación de diversos colores y formas. Un ejemplo es el moldeo de las cubiertas para luces traseras de automóviles, que se fabrican con diferentes materiales y colores, como rojo, ámbar y blanco. Además, para algunas partes se puede colocar una película impresa en la cavidad del molde, de manera que no necesitan decorarse ni marcarse después del moldeo.

El **moldeo con insertos** comprende componentes metálicos (como tornillos, pernos y cintas) que se colocan en la cavidad del molde antes de la inyección y después se convierten en parte integral del producto moldeado (fig. 19.9). Los ejemplos más comunes de dichas combinaciones son los componentes eléctricos y automovilísticos y las partes de grifos.

ESTUDIO DE CASO 19.1 Prótesis de cadera EPOCH

Cada año se hacen prótesis para alrededor de un millón de articulaciones artificiales a nivel mundial, eliminando así el dolor y mejorando la calidad de vida de sus receptores. Por lo general, la prótesis de la cadera completa consta de dos componentes principales: *(a)* un componente femoral colocado en la pierna, y *(b)* un componente acetabular para la cadera. En el ejemplo I.5 de la Introducción General se describió la

manufactura de los vástagos para la cadera; el vástago para cadera EPOCH es un desarrollo reciente basado en la tecnología de procesamiento de polímeros.

Uno de los problemas que se han encontrado en las prótesis totales de cadera es la reabsorción del hueso. Para evitar que se rompa y el cuerpo lo reasimile, el hueso sano debe someterse a esfuerzos para mantener su resistencia y vigor. Sin embargo, los implantes metálicos que son muy rígidos tienden a transferir carga al fémur de manera diferente a como lo hace la cadera natural del paciente, pues gran parte del hueso en la parte superior del fémur se somete a muy poco esfuerzo. El cuerpo reacciona a esto resorbiendo el hueso. Su pérdida de masa puede provocar una falla del mismo y causar falla por fatiga del implante debido al nuevo y dañino ambiente de carga. Esto es grave, ya que la reparación y modificación de un implante son bastante más dolorosas e implican una rehabilitación mucho mayor y modificaciones que por lo general no tienen tanto éxito como el primer implante.

Un nuevo e innovador diseño de implante es el sistema de EPOCH, que se muestra en la figura 19.12. En este sistema, la cadera consta de tres capas: (1) una exterior, compuesta por una malla de aleación de titanio unida por difusión (ver la sección 31.7) al hueso en crecimiento; (2) una capa de polímero termoplástico, cuyo objetivo es proporcionar rigidez similar a la del hueso, y (3) un núcleo de aleación de cobalto para proporcionar resistencia estática y a la fatiga. El polímero utilizado en esta cadera es de la familia de las poliariletercetonas (PAEK, por sus siglas en inglés) y las capas se dimensionan para imitar la rigidez del hueso, al tiempo que se maximiza la resistencia a la fatiga.

La cadera EPOCH se manufactura mediante una operación de moldeo por inyección de inserto, como se muestra en la figura 19.13. Se utiliza una máquina de moldeo por inyección vertical de 85 toneladas (en sentido contrario a la máquina de moldeo por inyección horizontal) para facilitar la localización de los insertos. Se colocan dos almohadillas flexibles en los asientos de las mitades del molde. Se precalienta un inserto de aleación de cobalto maquinada y se coloca en la mitad inferior del molde; éste se cierra y el polímero se inyecta en la cavidad para adherirse al inserto, penetrando parcialmente en la almohadilla porosa y entrelazando en forma íntegra todos los componentes. Después de expulsar la parte del molde, se recorta la rebaba y se termina el

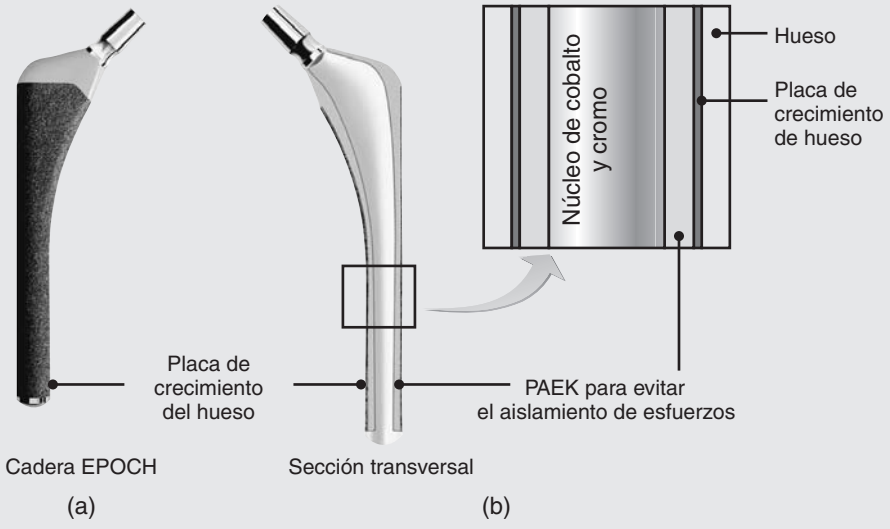


FIGURA 19.12 Vástago de cadera EPOCH. Este diseño utiliza una capa de PAEK (poliariletercetona) y una placa de crecimiento del hueso alrededor de un núcleo de cobalto y cromo para maximizar el crecimiento interno del hueso. *Fuente*: Cortesía de Zimmer, Inc.



FIGURA 19.13 Extracción de una cadera EPOCH del molde después de la operación de moldeo por inyección de insertos. *Fuente*: Cortesía de Zimmer, Inc.

vástago de la cadera para obtener el acabado superficial deseado. En la figura 19.12b se muestra una sección transversal de la estructura resultante.

La cadera EPOCH ha mejorado en gran medida la capacidad del hueso para mantenerse sano alrededor del implante, lo que proporciona una vida más larga a éste, pocas modificaciones y menos dolor para los receptores de articulaciones artificiales.

Fuente: Cortesía de M. Hawkins, Zimmer, Inc.

Sobremoldeo. Éste es un proceso para fabricar productos (como las articulaciones abisagradas y las de rótula esférica) en una operación y sin necesidad de ensamble después del moldeo. Por lo general, se utilizan dos plásticos para garantizar que no se formen uniones entre las mitades moldeadas de la articulación, ya que de otra manera se impediría el movimiento.

En el **moldeo con punto frío** se utiliza el mismo tipo de plástico para formar ambos componentes de la articulación. La operación se efectúa en una máquina estándar de moldeo por inyección y en un ciclo. Se usa un molde de dos cavidades con insertos de enfriamiento colocados en el área de contacto entre el primero y el segundo componentes moldeados de la articulación. Así no se desarrollan uniones entre las dos piezas y los dos componentes tienen movimientos libres, como en una bisagra o mecanismo de deslizamiento.

Capacidades del proceso. El moldeo por inyección es un proceso de producción de alta velocidad y permite un buen control dimensional. Aunque la mayoría de las partes suelen pesar de 100 a 600 g (3 a 20 onzas), pueden ser más pesadas, como las piezas de las carrocerías automotrices y los componentes exteriores. Los tiempos comunes de los ciclos van de 5 a 60 segundos, aunque pueden durar varios minutos para materiales termofijos.

El moldeo por inyección es un proceso versátil capaz de producir formas complejas con buena precisión dimensional y a altas velocidades. Como sucede en otros procesos de formado, el diseño del molde y el control del flujo de material en las cavidades de la matriz son factores que determinan la calidad del producto y, por lo tanto, sirven pa-

ra evitar defectos. Debido a las similitudes básicas con la fundición de metales respecto del flujo del material y la transferencia de calor, los *defectos* observados en el moldeo por inyección son de la misma naturaleza, como se indica a continuación. El método para evitar defectos consiste en el control adecuado de las temperaturas, presiones y modificaciones de diseño del molde mediante programas de simulación.

- Por ejemplo, en la figura 10.13g el metal fundido fluye desde dos canales opuestos y después se une a la mitad de la cavidad del molde, por lo que un punto frío en fundición es equivalente a las *líneas de soldadura* en el moldeo por inyección.
- Si las secciones transversales del canal son demasiado pequeñas, el polímero puede solidificarse de manera prematura, evitando que la cavidad del molde se llene. La solidificación de las capas exteriores en las secciones gruesas puede provocar *porosidad* o *huecos* por contracción, como en las partes metálicas mostradas en la figura 12.2.
- Si por alguna razón las matrices no cierran por completo o se desgasta la matriz, se forma una *rebaba* en forma similar a la formación de rebaba en el forjado de matriz de impresión (véanse figs. 14.5 y 19.19c).
- También se observa un defecto conocido como *marcas de hundimiento* (chupado) en las partes moldeadas por inyección, de manera similar al mostrado en la figura 19.31c.

Se ha avanzado mucho en el análisis y diseño de los moldes y el flujo de material en el moldeo por inyección. Se han desarrollado *técnicas de modelado* y *programas de simulación* para estudiar sistemas óptimos de alimentación, llenado de moldes, enfriamiento de moldes y distorsión de las partes. En la actualidad existen *programas de aplicación (software)* para acelerar el proceso de diseño de las partes moldeadas con buenas dimensiones y características. Dichos programas toman en cuenta factores como la presión de inyección, temperatura, transferencia de calor y condiciones de la resina.

Máquinas. Por lo general, las máquinas de moldeo por inyección son horizontales (fig. 19.14). Las máquinas verticales se utilizan para fabricar partes pequeñas de tolerancia

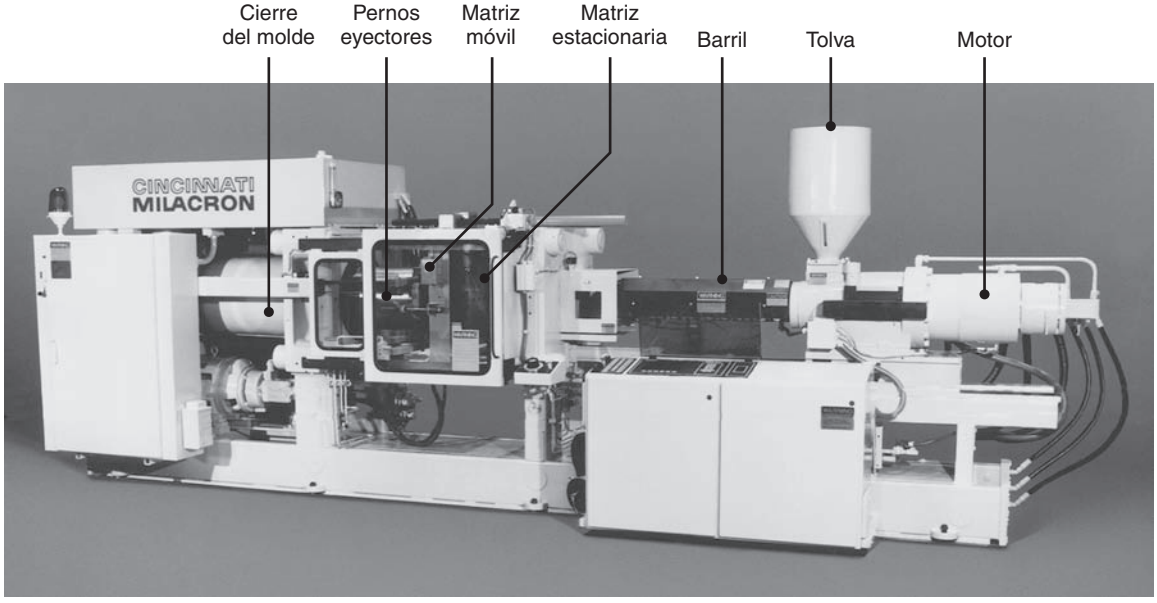


FIGURA 19.14 Máquina de moldeo por inyección de 2.2 MN (250 toneladas). El tonelaje es la fuerza aplicada para mantener las matrices cerradas durante la inyección del plástico fundido en las cavidades del molde y para mantenerlo ahí hasta que las partes se enfrían y se vuelven suficientemente rígidas para extraerlas de la matriz. *Fuente*: Cortesía de Cincinnati Milacron, Plastics Machinery Division.

cerrada y para moldeo con insertos. Por lo general, la fuerza de cierre de las matrices se suministra por medios hidráulicos, aunque también se utilizan medios eléctricos (que pesan menos y son menos ruidosos que aquéllos). Las máquinas modernas se equipan con microprocesadores y microcomputadoras en un tablero de control y supervisan todos los aspectos de la operación.

Las máquinas se clasifican de acuerdo con la capacidad del molde y la fuerza de sujeción; en la mayoría esta fuerza va de 0.9 a 2.2 MN (100 a 250 toneladas). La máquina más grande en operación tiene una capacidad de 45 MN (5000 toneladas) y puede producir partes de 25 kg (55 libras). El costo de una máquina de 100 toneladas va de unos $60,000 a $90,000 dólares, y en el caso de una máquina de 300 toneladas, de $85,000 a $140,000 dólares. Por lo general, las matrices cuestan de $20,000 a $200,000 dólares; por consiguiente, es fundamental producir altos volúmenes para justificar tan alto costo.

Los moldes suelen fabricarse con aceros para herramientas, berilio y cobre o aluminio. Pueden tener múltiples cavidades, de manera que es posible fabricar más de una parte en un ciclo (ver también fig. 11.19). Los costos de los moldes pueden ser de $100,000 dólares para los grandes, en tanto que su vida puede ser de 2 millones de ciclos para los moldes de acero, pero de sólo unos 10,000 ciclos para los moldes de aluminio.

EJEMPLO 19.2 Fuerza requerida en el moldeo por inyección

Se va a utilizar una máquina de moldeo por inyección de 250 toneladas cortas para hacer engranes rectos de 4.5 pulgadas de diámetro y 0.5 pulgada de espesor. Los engranes tienen un perfil de dientes finos, ¿cuántos se pueden moldear por inyección en un juego de moldes? ¿Su espesor influye en la respuesta?

Solución Debido al detalle fino involucrado (dientes finos del engrane), supóngase que las presiones requeridas en la cavidad del molde son de 100 MPa (15 ksi). El área transversal (proyectada) del engrane es de $\pi (4.5)^2/4 = 15.9$ pulg^2. Si el plano de partición de las dos mitades del molde está en medio del engrane, la fuerza requerida es de (15.9)(15,000) = 238,500 libras.

Como la capacidad de la máquina es de 250 toneladas cortas, tenemos (250)(2000) = 500,000 libras de fuerza de cierre disponible. Por lo tanto, el molde puede soportar dos cavidades y producir dos engranes por ciclo. Debido a que no influye sobre el área transversal del engrane, su espesor no afecta directamente las presiones implicadas y, por lo tanto, no cambia la respuesta.

19.3.1 Moldeo por reacción-inyección

En el proceso de *moldeo por reacción-inyección* (RIM, por sus siglas en inglés) se fuerzan un monómero y dos o más fluidos reactivos dentro de una cámara mezcladora a alta velocidad, a una presión de 10 a 20 MPa (1400 a 2800 psi), y después se fuerzan dentro de la cavidad del molde (fig. 19.15). Las reacciones químicas ocurren con rapidez en el molde y el polímero se solidifica. Los polímeros característicos son poliuretano, nailon y resina epóxica. Los tiempos de los ciclos pueden ser de unos 10 minutos, dependiendo de los materiales, el tamaño y la forma de la parte.

Las aplicaciones principales de este proceso incluyen partes automotrices (como defensas, volantes y tableros de instrumentos), aislamiento térmico para refrigeradores y congeladores, esquís acuáticos y refuerzos para componentes estructurales. Las partes fabricadas pueden ser hasta de 50 kg (110 libras). También se pueden utilizar fibras de refuerzo (como vidrio o grafito) a fin de mejorar la resistencia y rigidez del producto. Según el número de partes a producir y la calidad requerida de las mismas, los moldes se pueden fabricar de materiales comunes, como acero o aluminio.

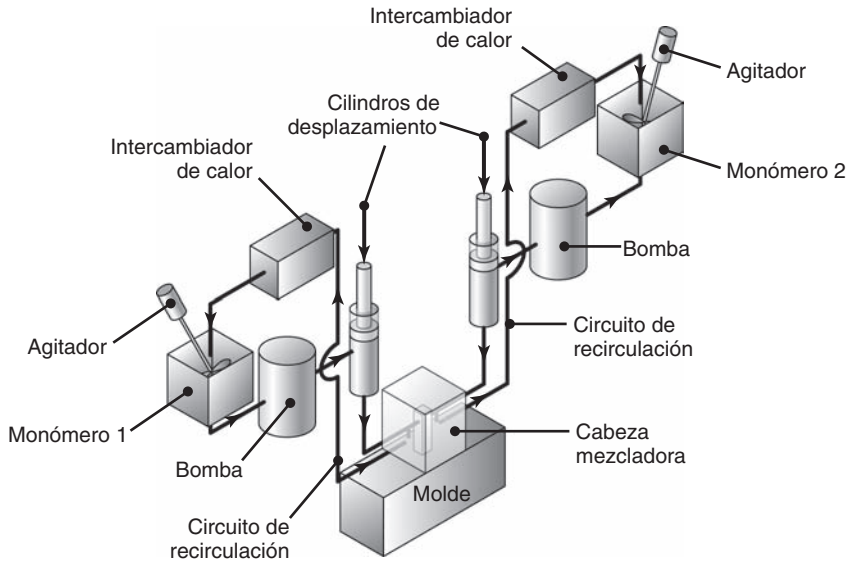


FIGURA 19.15 Esquema del proceso de moldeo por reacción-inyección. Las partes típicas fabricadas son piezas de carrocerías automotrices, esquíes acuáticos y aislamiento térmico para refrigeradores y congeladores.

19.4 Moldeo por soplado

El *moldeo por soplado* es un proceso modificado de extrusión y moldeo por inyección. En el **moldeo por extrusión y soplado**, primero se extruye un tubo o preforma (por lo regular se orienta de manera que quede vertical). Se encierra dentro de un molde con una cavidad mucho más grande que el diámetro del tubo y se sopla hacia fuera para llenar la cavidad (fig. 19.16a). Dependiendo del material, la relación de soplado puede ser tan alta como 7:1. Por lo general, el soplado se realiza con un chorro de aire caliente a una presión de 350 a 700 kPa (50 a 100 psi). Mediante este proceso se pueden moldear tambores de volúmenes tan grandes como 2000 litros (530 galones). Los materiales característicos de la matriz son acero, aluminio y cobre-berilio.

En algunas operaciones, la extrusión es continua y los moldes se mueven con la parte tubular; se cierran alrededor de ella, sellando un extremo, dividiendo el tubo largo en secciones individuales y moviéndose mientras se inyecta aire en la pieza tubular. Después la parte se enfría y se expulsa del molde. El tubo y la tubería de plástico corrugado se fabrican mediante moldeo por soplado continuo, en el que el tubo o tubería se extruye horizontalmente y se sopla en moldes móviles.

En el **moldeo por inyección y soplado**, primero se moldea por inyección (fig. 19.16b) una pieza tubular corta (**parisón**) en matrices frías (los parisones se pueden fabricar y guardar para su uso posterior). Se abren las matrices y el parisón se transfiere a una matriz de moldeo por soplado mediante un mecanismo de indización (fig. 19.16c). Se inyecta aire caliente en el parisón, expandiéndolo hasta las paredes de la cavidad del molde. Productos comunes son las botellas de plástico para bebidas (por lo general fabricadas con polietileno y polieteretercetona, PEEK, por sus siglas en inglés) y contenedores pequeños huecos. Un proceso relacionado con éste es el **moldeo por ensanchado y soplado**, en el que el parisón se expande y estira al mismo tiempo, sometiendo al polímero a un estiramiento biaxial y mejorando así sus propiedades.

El **moldeo por soplado de capas múltiples** comprende el uso de tubos o parisones coextruidos y permite la producción de una estructura de capas múltiples (ver fig.

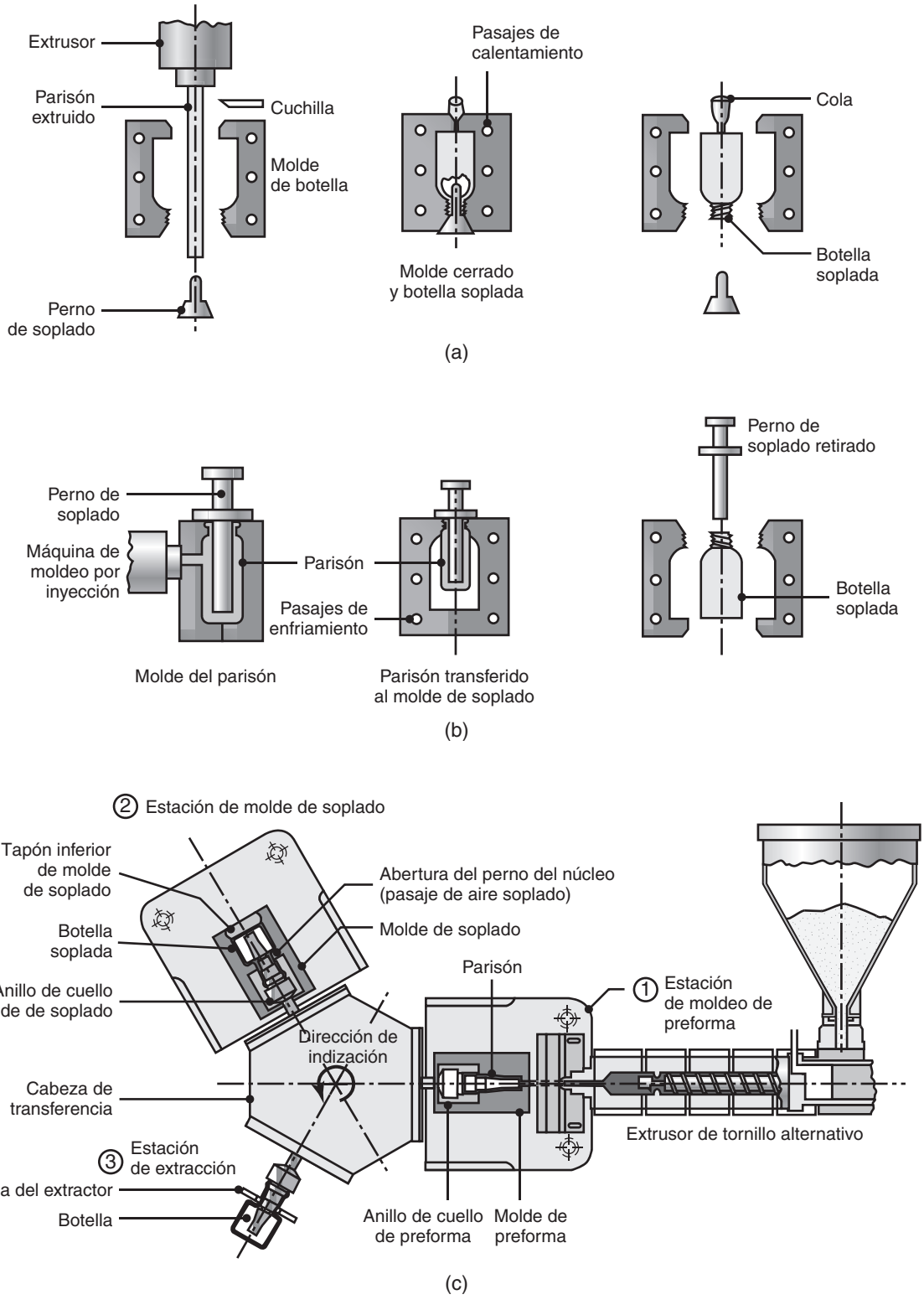


FIGURA 19.16 Esquemas de: *(a)* el proceso de moldeo por extrusión y soplado para fabricar botellas de plástico para bebidas; *(b)* el proceso de moldeo por inyección y soplado, y *(c)* una máquina de tres estaciones de moldeo por inyección y soplado para fabricar botellas de plástico.

19.4b). Un ejemplo común de dicho producto es el material de la envoltura de plástico para alimentos y bebidas, que constituye una barrera para el olor y la permeabilidad, protege sabor y aroma, da resistencia ante posibles rasgaduras, proporciona capacidad de impresión y se puede llenar con fluidos calientes. Otras aplicaciones de este proceso ocurren en contenedores de las industrias de cosméticos y farmacéutica.

19.5 Rotomoldeo

La mayoría de los termoplásticos y algunos termofijos pueden adquirir formas grandes y huecas mediante *rotomoldeo*. En este proceso, se fabrica un molde metálico de pared delgada de dos piezas (molde hembra dividido) y se diseña para que gire alrededor de dos ejes perpendiculares (fig. 19.17). Para el ciclo de una parte, una cantidad de material plástico en polvo, medida previamente, se coloca dentro del molde tibio. (El polvo se obtiene de un proceso de polimerización que lo precipita desde un líquido). Después el molde se calienta (por lo general en un horno grande) y se gira en forma continua alrededor de los dos ejes principales.

Esta acción hace que el polvo sea lanzado contra el molde, donde el calor lo derrite sin fundirlo. Para las partes de termofijos, un agente químico se agrega al polvo; el encadenamiento cruzado ocurre después de que la parte se forma en el molde. Las máquinas se automatizan en gran medida con partes que se mueven mediante un mecanismo de indización similar al mostrado en la figura 19.16c.

Mediante rotomoldeo se fabrica una gran variedad de partes, como tanques de almacenamiento de varios tamaños, botes de basura, cascos de embarcaciones, cubetas,

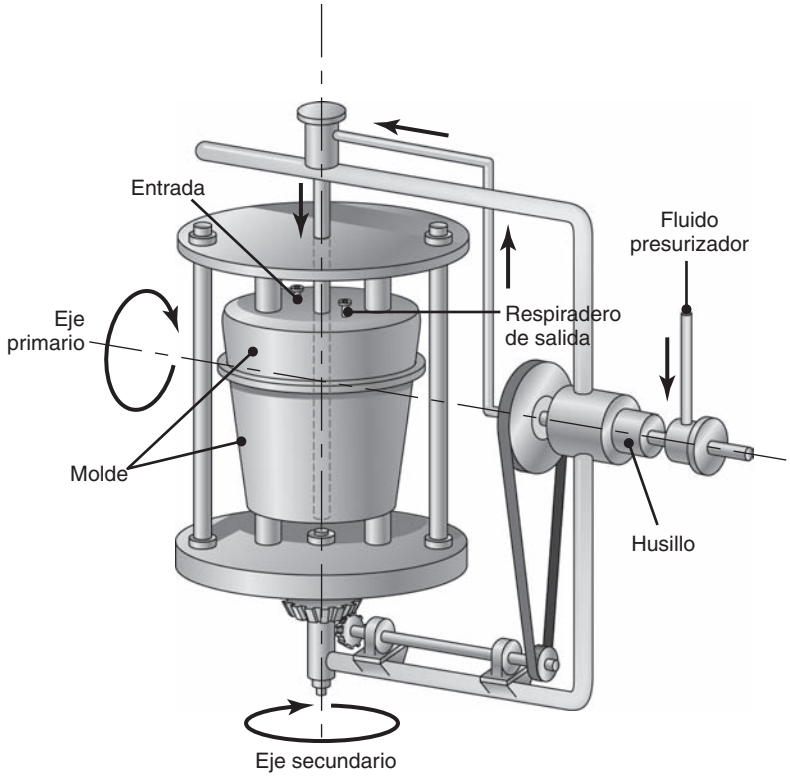


FIGURA 19.17 Proceso de rotomoldeo (moldeo rotativo o rotofundición). Con este proceso se pueden fabricar botes de basura, cubetas y balones de fútbol de plástico.

cajas, juguetes grandes y huecos, cajas de transporte y balones de fútbol. También se pueden moldear de manera integral partes de diversos insertos o componentes, metálicos o plásticos, que se fabrican por este proceso.

Además de polvos, también se pueden utilizar polímeros líquidos (**plastisoles**) en el rotomoldeo; los plastisoles de PCV son el material más común. En esta operación (conocida como **moldeo hueco** o *fundición hueca*), el molde se calienta y gira simultáneamente. Debido a la acción giratoria, el polímero se fuerza contra las paredes internas del molde, a las cuales recubre luego de fundirse. La parte se enfría mientras sigue girando y se extrae abriendo el molde. Por lo general, las partes fabricadas son productos de pared delgada, como botas y juguetes.

Capacidades del proceso. El rotomoldeo puede producir partes con formas complejas, huecas, con espesores de pared pequeños, hasta de 0.4 mm (0.016 pulgada). Se han producido partes grandes, hasta de 1.8 m × 1.8 m × 3.6 m (6 pies × 6 pies × 12 pies), con un volumen tan grande como 80,000 litros (21,000 galones). El acabado superficial exterior de la parte es una réplica del acabado superficial de las paredes interiores del molde. Los tiempos del ciclo son más largos que en otros procesos de moldeo. Por lo general, el control de calidad comprende peso exacto del polvo, velocidad rotacional adecuada del molde y relaciones de temperatura y tiempo durante el ciclo del horno.

19.6 Termoformado

El *termoformado* es un proceso para el formado de láminas o películas de termoplástico sobre un molde mediante la aplicación de calor y presión (fig. 19.18). En este proceso, una lámina *(a)* se sujeta y calienta al *punto de hundimiento* (arriba de la *temperatura de transición del vidrio* [T_g] del polímero; tabla 7.2), generalmente por calentamiento por radiación, y *(b)* se fuerza contra las superficies del molde mediante la aplicación de vacío o presión de aire. Las láminas utilizadas en el termoformado suelen fabricarse por extrusión de hojas y están disponibles como cintas bobinadas o como longitudes y anchuras de distintos tamaños. También existen llenas con diversos materiales para fabricar partes con aplicaciones específicas.

Por lo general el molde se encuentra a temperatura ambiente, de modo que la forma producida se define al contacto con el molde. Debido a la baja resistencia de los materiales formados, el diferencial de presión provocado por el vacío es suficiente para el formado. Sin embargo, las partes más gruesas o complejas requieren presión de aire, que puede ser de 100 a 2000 kPa (15 a 300 psi), dependiendo del tipo de material y del espesor de la lámina. Los medios mecánicos, como el uso de *tapones*, también pueden em-

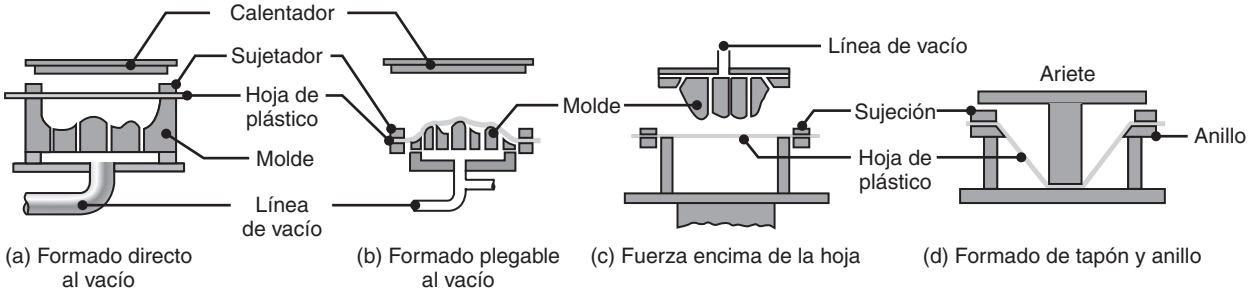


FIGURA 19.18 Diversos procesos de termoformado para una hoja de termoplástico. Es común utilizar estos procesos en la fabricación de anuncios publicitarios, charolas de galletas y dulces, paneles para baños y empaques.

plearse para ayudar a formar las partes. En la figura 19.18 se muestran variaciones del proceso básico de termoformado.

Capacidades del proceso. Partes comunes fabricadas mediante termoformado son los empaques, charolas para galletas y dulces, anuncios publicitarios, recubrimientos de refrigeradores, electrodomésticos y paneles para cuartos de baño. Las partes con aberturas u orificios no se pueden formar con este proceso porque es imposible mantener el diferencial de presión durante el formado. Debido a que el termoformado es una combinación de las operaciones de *embutido* y *ensanchamiento* (muy similar al formado de algunas láminas metálicas), el material debe tener una elongación elevada y uniforme; de lo contrario, se estrangula y fallará. Los termoplásticos tienen altas capacidades de elongación uniforme por su alto exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación (m), como se describe en la sección 2.2.7.

Por lo general, los moldes de termoformado se fabrican con aluminio porque no se requiere alta resistencia; de este modo, el herramental es relativamente poco costoso. Los moldes de termoformado tienen pequeños orificios para crear vacío. Estos orificios suelen tener un diámetro menor a 0.5 mm (0.02 pulgada); de lo contrario, dejarían marcas en las partes formadas. Las consideraciones de calidad incluyen rasgaduras de la lámina durante el formado, espesor no uniforme de la pared, llenado inadecuado de los moldes, definición deficiente de la parte y falta de detalles de la superficie.

19.7 Moldeo por compresión

En el *moldeo por compresión* se coloca una carga preformada de material, un volumen de polvo medido previamente o una mezcla viscosa de resina líquida y un relleno directamente en la cavidad caliente de un molde que, por lo general, se encuentra a unos 200 °C (400 °F), pero que puede ser mucho mayor. El formado se realiza bajo presión a partir de un tapón o a partir de la mitad superior de la matriz (fig. 19.19), por lo que el proceso es de alguna manera similar al forjado en matriz cerrada de los metales.

Las presiones van de 10 a 150 MPa (1400 a 22,000 psi). Como se ve en la figura 19.19, se forma una rebaba que luego se elimina por recortado o algún otro método. Las partes comunes fabricadas por este medio son platos, mangos, tapones de contenedores, accesorios, componentes eléctricos y electrónicos, agitadores para lavadoras y alojamientos. Las partes con refuerzo de fibras cortadas también se forman mediante este proceso.

El moldeo por compresión se utiliza sobre todo con plásticos termofijos, con el material virgen en estado parcialmente polimerizado. Sin embargo, también se pueden formar termoplásticos. Los enlaces cruzados se completan en la matriz caliente. Los tiempos de curado van de 0.5 a 5 minutos, dependiendo del material y del espesor y la forma de la pieza. Cuanto más grueso sea el material, más tiempo tomará curarlo. Los elastómeros también se forman mediante moldeo por compresión.

Capacidades del proceso. Existen tres tipos de moldes de compresión:

- *Tipo rebaba:* para partes superficiales o planas.
- *Tipo positivo:* para partes de alta densidad.
- *Tipo semipositivo:* para producción de calidad.

No se recomiendan los rebajes en las partes; sin embargo, las matrices se pueden diseñar con laterales abiertos (fig. 19.19d) que permitan extraer la parte moldeada. En general, la complejidad de las partes producidas es menor a la del moldeo por inyección, pero el control dimensional es mejor. Las áreas de las superficies de las partes moldeadas por compresión pueden ser hasta de 2.5 m^2 (8 $pies^2$). Debido a su relativa simplicidad,

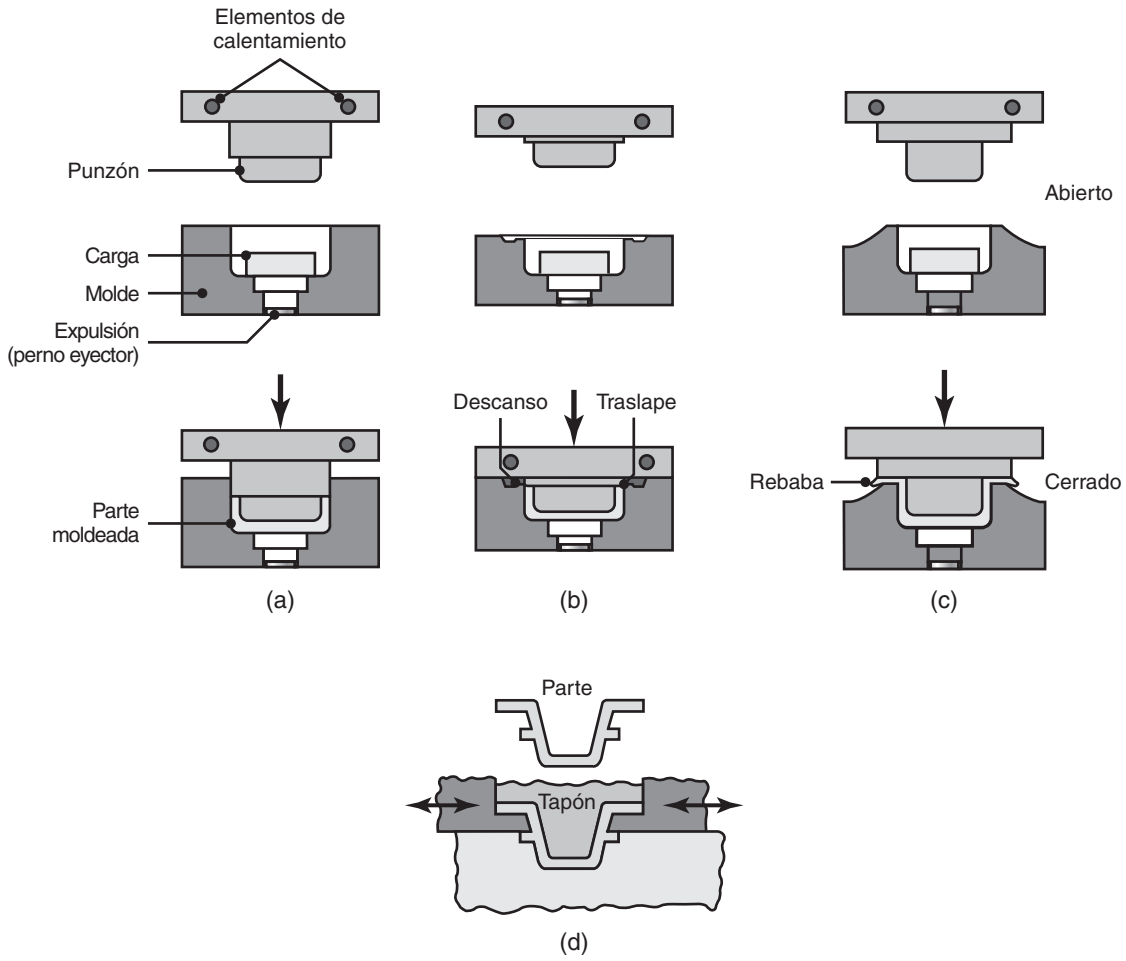


FIGURA 19.19 Tipos de moldeo por compresión; proceso similar al forjado: *(a)* positivo, *(b)* semipositivo y *(c)* rebaba, que se recorta posteriormente. *(d)* Diseño de matriz para fabricar una parte de moldeo por compresión con rebajes externos.

las matrices para moldeo por compresión son menos costosas que las utilizadas en el moldeo por inyección. Generalmente, se fabrican con aceros para herramientas y se pueden cromar o pulir para mejorar el acabado superficial del producto moldeado.

19.8 Moldeo por transferencia

El *moldeo por transferencia* es un desarrollo adicional del proceso de moldeo por compresión. La resina termofija sin curar se coloca en un recipiente o cámara de transferencia de calor (fig. 19.20) y, después de que se calienta, se inyecta en moldes cerrados calientes. Dependiendo del tipo de máquina utilizada, una leva, émbolo o alimentador de tornillo giratorio hace que el material fluya a través de canales angostos al interior de la cavidad del molde a presiones hasta de 300 MPa (43,000 psi). Este flujo viscoso genera un calor considerable, que aumenta la temperatura del material y lo homogeniza. El curado ocurre por enlaces cruzados. Puesto que la resina está fundida cuando entra en el molde, la complejidad de las partes y el control dimensional se aproximan a los del moldeo por inyección.

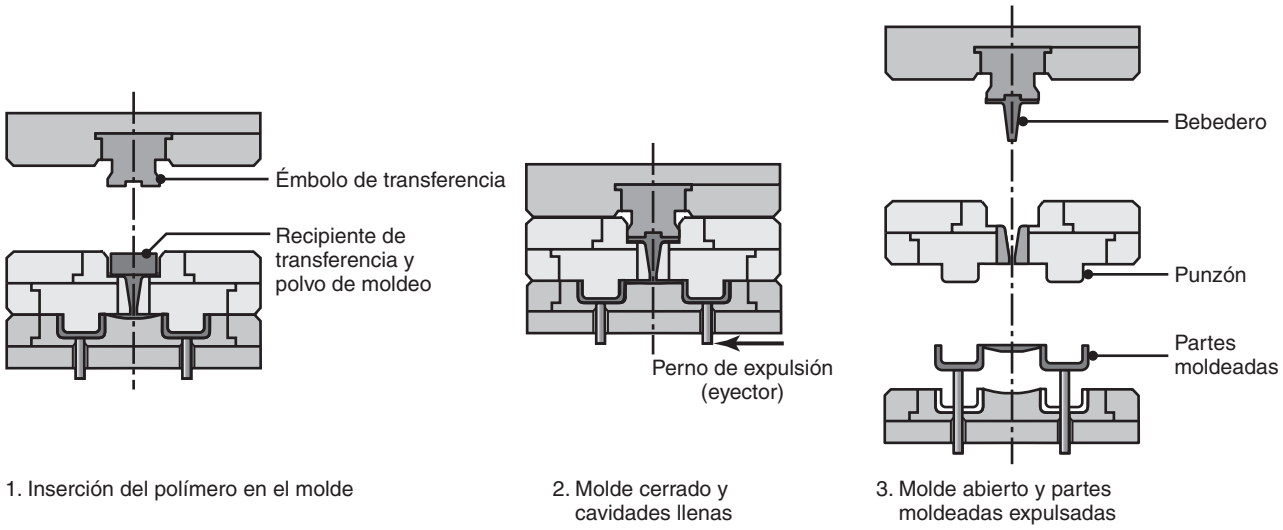


FIGURA 19.20 Secuencia de operaciones en el moldeo por transferencia para plásticos termofijos. Este proceso es adecuado, en particular para partes intrincadas con espesor variable de pared.

Capacidades del proceso. Las partes comunes que se fabrican mediante moldeo por transferencia son conectores eléctricos y componentes electrónicos, partes de hule y silicón y el encapsulado de dispositivos microelectrónicos. El proceso es adecuado sobre todo para formas intrincadas con espesores de pared variables. Los moldes tienden a ser más costosos que los del moldeo por compresión y parte del material sobrante se queda en los canales del molde durante el llenado, que luego se remueve.

19.9 Colado

Algunos termoplásticos (como el nailon y el acrílico) y los plásticos termofijos (epóxicas, fenólicos, poliuretanos y poliéster) se pueden *fundir* en una variedad de formas mediante moldes rígidos o flexibles (fig. 19.21). En comparación con otros métodos de procesamiento de plásticos, el colado es un proceso lento pero sencillo y poco costoso. Sin embargo, la viscosidad del polímero debe ser suficientemente baja para que fluya con facilidad en el molde. Entre las partes coladas comunes figuran los engranes (en particular de nailon), rodamientos, ruedas, hojas delgadas, lentes y componentes que requieren resistencia al desgaste abrasivo.

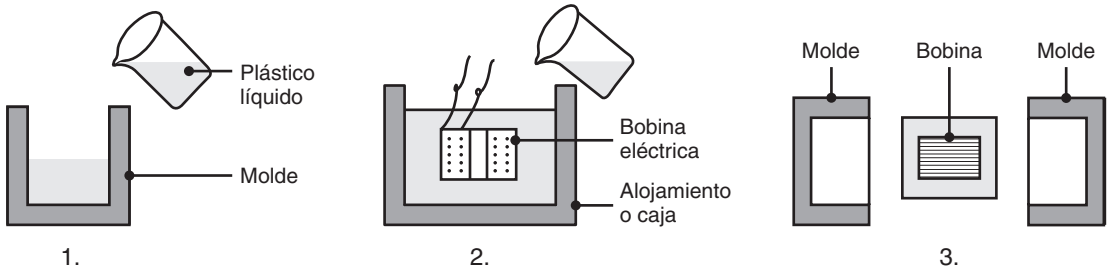


FIGURA 19.21 Esquema de los procesos de: (1) fundición, (2) impregnación y (3) encapsulado para ensambles de plásticos y eléctricos, donde el plástico circundante sirve como dieléctrico.

En el colado convencional básico de termoplásticos, una mezcla de monómero, catalizador y diversos aditivos (activadores) se calienta arriba de su punto de fusión (T_m) y se vacía en el molde. La parte se forma tras ocurrir la polimerización a presión ambiente. Puede ser necesario desgasificar para obtener una mejor integridad del producto. Es posible producir formas intrincadas utilizando *moldes flexibles,* que después se extraen (de manera similar al uso de guantes de hule) y se usan de nuevo. Como sucede con los metales, los termoplásticos también se pueden *colar continuamente*, transportando el polímero en bandas continuas de acero inoxidable y polimerizándolo mediante calor externo.

Colado centrífugo. Este es un proceso similar a la fundición centrífuga de los metales (sección 11.3.6) y se utiliza con termoplásticos, termofijos y plásticos reforzados con fibras cortas.

Impregnación y encapsulado. Como una variación importante del colado, sobre todo para la industria eléctrica y de la electrónica, la impregnación y el encapsulado comprenden el colado del material plástico (por lo general, una resina líquida, como epóxica) alrededor de un componente eléctrico (como un transformador) para embutirlo en el plástico. La *impregnación* (fig. 19.21b) se efectúa en un alojamiento o caja, que se vuelve parte integral del componente y lo fija en su posición. En el *encapsulado* (fig. 19.21c), el componente se recubre con una capa de plástico que lo rodea por completo, solidificándose después.

En ambos procesos, el material plástico puede servir como *dieléctrico* (no conductor); por consiguiente, no debe tener humedad ni porosidad, lo que podría requerir procesamiento al vacío. Los materiales de los moldes pueden ser metal, vidrio o varios polímeros. Se pueden encapsular parcialmente pequeños miembros estructurales (como ganchos, puntales y partes similares), sumergiéndolos en un termoplástico caliente y utilizando polímeros de diversos colores.

19.10 Moldeo de espuma

Los productos de poliestireno expandido, como vasos, contenedores de alimentos, bloques de aislamiento y materiales moldeados para empaque (para empacar aparatos eléctricos, electrónicos y computadoras), se fabrican mediante *moldeo de espuma*, utilizando **perlas de poliestireno** como materia prima. Como se puede observar fácilmente, estos productos poseen una **estructura celular**, la cual puede tener *porosidad abierta e interconectada* (para polímeros con baja viscosidad) o tener *celdas cerradas* (para polímeros con alta viscosidad).

Existen diversas técnicas que pueden utilizarse en el moldeo de espuma. En la operación básica, las perlas de poliestireno obtenidas por la polimerización del monómero de estireno se colocan en un molde con un agente insuflante, por lo común pentano (un hidrocarburo volátil) o gas inerte (nitrógeno), y se exponen al calor, generalmente con vapor. Como resultado, las perlas se expanden hasta 50 veces y toman la forma de la cavidad del molde. La cantidad de expansión se puede controlar variando la temperatura y el tiempo. También se pueden agregar muchas otras partículas, incluyendo perlas huecas de vidrio o esferas de plástico, para proporcionar características estructurales específicas a la espuma producida.

Existen tres tamaños de perlas de poliestireno: *(a)* pequeñas: para vasos, con una densidad en la pieza terminada de 50 kg/m^3 (3 libras/pie^3), *(b)* medianas: para formas moldeadas, y *(c)* grandes: para moldeo de bloques de aislamiento, con una densidad de la pieza terminada de 15 a 30 kg/m^3 (que después se pueden cortar al tamaño). El tamaño seleccionado de las perlas también depende del espesor mínimo de pared del producto: cuanto más pequeño sea, más delgada será la pieza. Las perlas se pueden colorear asimismo antes de la expansión, así la parte adquiere un color integral. Se pueden utilizar tanto termoplásticos como termofijos para el moldeo de espuma, pero los termofijos

tienen una forma de procesamiento líquido y, por lo tanto, tienen condiciones similares a las de los polímeros en el moldeo por reacción e inyección.

Un método común de moldeo de espuma consiste en utilizar *perlas de poliestireno previamente expandidas,* las cuales se expanden de modo parcial con vapor (aire o agua caliente, o también se puede emplear un horno) en una cámara abierta por la parte superior. Después, las perlas se colocan en un recipiente de almacenaje y se dejan estabilizar por un periodo de tres a 12 horas. Luego se pueden moldear para darles la forma deseada del modo descrito antes.

Moldeo estructural de espuma. Éste es un proceso de moldeo utilizado para fabricar productos de plástico con una *superficie exterior sólida* y una *estructura nuclear celular*. Entre los productos comunes elaborados por este método figuran los componentes de muebles, gabinetes para computadoras y máquinas de oficina, y molduras (que reemplazan a las molduras de madera más costosas). En este proceso, los termoplásticos se mezclan con un agente insuflante (por lo general un gas inerte, como el nitrógeno) y se moldean por inyección en moldes fríos a fin de darles las formas deseadas. El enfriamiento rápido contra las superficies de los moldes fríos produce una superficie rígida (que puede ser hasta de 2 mm [0.08 pulgada] de espesor) y un núcleo de la parte de estructura celular. La densidad de toda la parte puede ser tan baja como 40% de la densidad del plástico sólido. Por lo tanto, con una superficie rígida y una masa menos densa, las partes moldeadas tienen una alta relación de rigidez a peso (ver también fig. 3.1).

Procesamiento de espuma de poliuretano. Productos como los cojines y los bloques de aislamiento se fabrican por este proceso. Básicamente, la operación empieza al mezclar dos o más componentes; después de que la mezcla *(a)* se vierte en moldes de diversas formas, o *(b)* se rocía sobre superficies con una pistola de aspersión para proporcionar aislamiento sonoro y térmico, ocurren ciertas reacciones químicas. Existen diversas máquinas de baja y alta presión que tienen controles por computadora para lograr un mezclado apropiado. La mezcla se solidifica con una estructura celular, cuyas características dependen del tipo y la proporción de los componentes utilizados.

19.11 Formado en frío y formado de fase sólida

Los procesos utilizados en el trabajado en frío de los metales (como el laminado, forjado en matriz cerrada, acuñado, embutido profundo y formado con hule, como se describe en la parte III) también pueden usarse para formar termoplásticos a temperatura ambiente (*formado en frío*). Los materiales comunes formados así son polipropileno, policarbonato, ABS y PVC rígido. Es importante considerar los factores siguientes en cuanto a este proceso: *(a)* el polímero debe tener suficiente ductilidad a temperatura ambiente (por lo que los poliestirenos, acrílicos y termofijos no se pueden formar), y *(b)* su deformación no debe ser recuperable (para minimizar la recuperación elástica y termofluencia de la parte formada).

Las ventajas del formado en frío de los plásticos respecto de otros métodos de moldeo son:

- Aumenta la resistencia, tenacidad y elongación uniforme.
- Se pueden utilizar plásticos con pesos moleculares altos para hacer partes con mejores propiedades.
- Las velocidades de formado no se afectan con el espesor de la parte porque (a diferencia de otros métodos de procesamiento de plásticos) no existe calentamiento o enfriamiento implícito. Los tiempos de los ciclos son generalmente más cortos que en los procesos de moldeo.

Formado de fase sólida. También conocido como *formado de estado sólido*, este proceso se efectúa a una temperatura de 10 °C a 20 °C (20 °F a 40 °F) *por debajo* de la tempe-

ratura de fusión del plástico (para un polímero cristalino). Por lo tanto, la operación de formado ocurre mientras el polímero sigue en estado sólido. Las ventajas principales del formado de fase sólida sobre el formado en frío son que las fuerzas del formado y la recuperación elástica resultan inferiores. Estos procesos no se utilizan tanto como los métodos de procesamiento en caliente y, por lo general, se restringen a aplicaciones especiales.

19.12 Procesamiento de elastómeros

En la sección 7.9 se describieron las propiedades, características y aplicaciones de los elastómeros y hules. Recordemos que (en términos de sus características de procesamiento) un *elastómero* termoplástico es un polímero. Según su función y desempeño, es un *hule*. La materia prima a procesar para darle diversas formas es básicamente un compuesto de hule, diversos aditivos y rellenos. Los aditivos incluyen *negro de humo*, elemento que mejora propiedades como la resistencia a la tensión y a la fatiga, resistencia a la abrasión y al desgarre, protección ultravioleta y resistencia a productos químicos.

Estos materiales se mezclan (mezcladores Banbury) para desintegrarlos y reducir la viscosidad; después la mezcla se *vulcaniza* usando azufre como agente vulcanizador. Así queda listo este compuesto para su procesamiento posterior (como calandreado, extrusión y diversos procesos de moldeo), que también puede incluir refuerzos en forma de fibras y tejidos. Durante el procesamiento la parte forma enlaces cruzados, proporcionando las propiedades deseables que todos asociamos con los productos de hule, que van desde botas hasta neumáticos.

Los elastómeros se pueden formar mediante varios procesos que también se utilizan para moldear termoplásticos. Es común formar elastómeros termoplásticos mediante moldeo por extrusión o inyección, siendo la extrusión el proceso más económico y rápido. También pueden formarse mediante moldeo por soplado o termoformado. Por ejemplo, el poliuretano termoplástico se puede moldear mediante todos los métodos convencionales. También es posible mezclar con hules termoplásticos, compuestos de cloruro polivinílico, ABS y nailon para obtener propiedades específicas.

Por lo general, las temperaturas para la extrusión de los elastómeros se encuentran en el intervalo de 170 °C a 230 °C (340 °F a 440 °F) y para moldeo son hasta de 60 °C (140 °F). El secado de los materiales es importante para la integridad de los productos. También se usan refuerzos junto con la extrusión para proporcionar mayor resistencia a la falla de la parte. Ejemplos de productos de elastómeros extrudidos son la tubería, mangueras, molduras y tubos interiores. Los productos de elastómeros moldeados por inyección abarcan una amplia variedad de aplicaciones, como componentes para automóviles y aparatos eléctricos.

Las hojas de hule y de algunos termoplásticos se forman mediante el proceso de **calandreado** (fig. 19.22), en el que una masa tibia del compuesto se alimenta a una serie de rodillos y se **mastica**. Por lo general, el espesor producido es de 0.3 mm a 1 mm (0.01 a 0.40 pulgada), aunque puede ser menor si se ensancha el material. Después se desprende en forma de hoja, que puede ser tan ancha como 3 m (10 pies) y a velocidades de 2 m/s (6.5 pies/s). Luego, el hule calandreado se puede procesar como neumáticos y bandas pa-

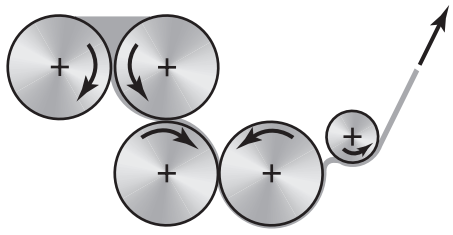


FIGURA 19.22 Esquema del calandreado. Las hojas producidas por este proceso se utilizan posteriormente en el termoformado. Este proceso también se emplea en la producción de diversos productos de elastómeros y hule.

ra maquinaria, entre otros productos. El hule o los termoplásticos pueden formarse sobre superficies de cinta, papel, tela o diversos plásticos blandos o rígidos, *laminándolos* permanentemente de esta manera. También se pueden texturizar las superficies de los rodillos para producir una hoja de hule con diversos patrones y diseños.

Los *productos discretos de hule*, como los guantes, se fabrican mediante *inmersión* repetida de una forma metálica (como la forma de la mano para hacer los guantes) en un compuesto líquido que se adhiere a ella. Un compuesto común es el *látex*, una savia lechosa obtenida de la corteza interna de un árbol tropical. Después el compuesto se vulcaniza (entrelaza), por lo general en vapor, se desprende de la forma y se convierte en un producto discreto.

19.13 Procesamiento de compósitos de matriz polimérica

Como se describió en el capítulo 9, los compósitos de matriz polimérica (PMC, por sus siglas en inglés; también se conocen como **plásticos reforzados**) son *materiales diseñados* con propiedades mecánicas únicas, en particular la alta relación de resistencia a peso, relación de rigidez a peso, resistencia al flujo plástico y las propiedades direccionales. Debido a su compleja estructura, los plásticos reforzados requieren métodos especiales para darles forma como productos de consumo e industriales (fig. 19.23).

Los compósitos de matriz polimérica se pueden fabricar mediante diversos métodos, que se describen en este capítulo. La fabricación para garantizar propiedades confiables en las partes y estructuras producidas con compósitos, en particular durante su prolongada vida útil, puede ser desafiante debido a la presencia de dos o más tipos de materiales. La matriz y las fibras de refuerzo en el compósito tienen, *por diseño*, propiedades y características muy diferentes, y por lo tanto, brindan diferentes respuestas ante los métodos de procesamiento (sección 9.2).

Los diversos pasos comprendidos en la manufactura de los plásticos reforzados y el tiempo y cuidado requeridos hacen que los costos de procesamiento sean muy significativos y, por lo general, no son competitivos con materiales y formas tradicionales. Esta situación ha requerido la evaluación e integración cuidadosa de los procesos de diseño y manufactura (ingeniería concurrente) para aprovechar las propiedades únicas de estos compósitos. Esto se realiza al tiempo que se minimizan los costos de manufactura y se mantienen la integridad, confiabilidad y capacidad de producción durante el largo periodo de vida de los productos. Además, un problema importante de seguridad y ambiental en los plásticos reforzados es el polvo generado durante el procesamiento. Por ejemplo, se sabe que las fibras de carbono suspendidas en el aire permanecen en el área de trabajo durante mucho tiempo después de haber concluido la fabricación de las partes.

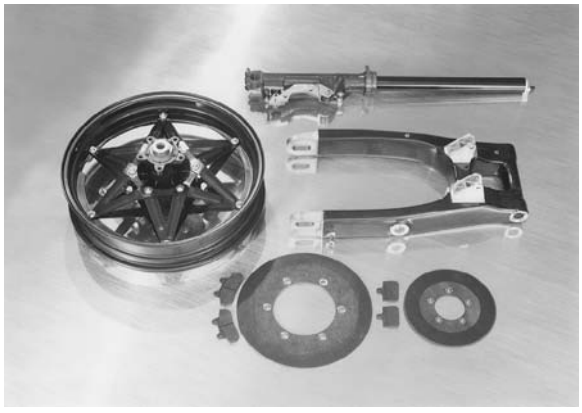


FIGURA 19.23 Componentes de plástico reforzado para una motocicleta Honda. Las partes mostradas son las horquillas delantera y trasera, brazo trasero oscilante, rueda y discos de frenos.

19.13.1 Impregnación de fibras

Para obtener una buena unión entre las fibras de refuerzo y la matriz de polímero, además de protegerlas durante el manejo, las superficies de las fibras se tratan mediante impregnación (*dimensionado*). Cuando se efectúa la impregnación como paso individual, las hojas producidas parcialmente curadas se conocen con diferentes términos, como se describe en esta sección.

Preimpregnados. En un procedimiento común para producir *preimpregnados* (preimpregnados con resina) de plástico con fibras reforzadas, primero se alinean las fibras continuas y se someten a un tratamiento superficial para mejorar la adhesión a la matriz de polímero (fig. 19.24a). Después se recubren por inmersión en un baño de resina y se transforman en *cinta* (fig. 19.24b), por lo general en anchuras de 75 mm a 150 mm (3 a 6 pulgadas). Luego se cortan segmentos individuales de cinta preimpregnada y se ensamblan como *estructuras laminadas* (fig. 19.25a), como el estabilizador horizontal para la aeronave de combate F-14.

Entre los productos comunes fabricados con preimpregnados figuran los tableros arquitectónicos planos o corrugados, los paneles para aislamiento en construcción y eléctricos, y los componentes estructurales de aeronaves, que requieren una buena retención de propiedades durante un largo periodo y en las condiciones adversas que las aeronaves militares suelen encontrar (incluyendo resistencia a la fatiga en condiciones de calor o humedad).

Debido a que el proceso de colocación de cintas preimpregnadas consume tiempo y requiere intensa mano de obra, se han construido *máquinas colocadoras de cintas controladas por computadora,* especiales y con una automatización elevada, para este propósito (fig. 19.25b). Las cintas preimpregnadas se cortan automáticamente de un carrete y se colocan en un molde con los patrones deseados, con mucho mejor control dimensional que el que se puede lograr en forma manual. Los patrones de arreglo pueden modificarse con facilidad y rapidez para una variedad de partes mediante el control por computadora y con una alta capacidad de repetición.

Compuesto de moldeo de lámina (SMC, por sus siglas en inglés). Para fabricar este compuesto, primero se cortan hilados continuos de fibra de refuerzo como fibras cor-

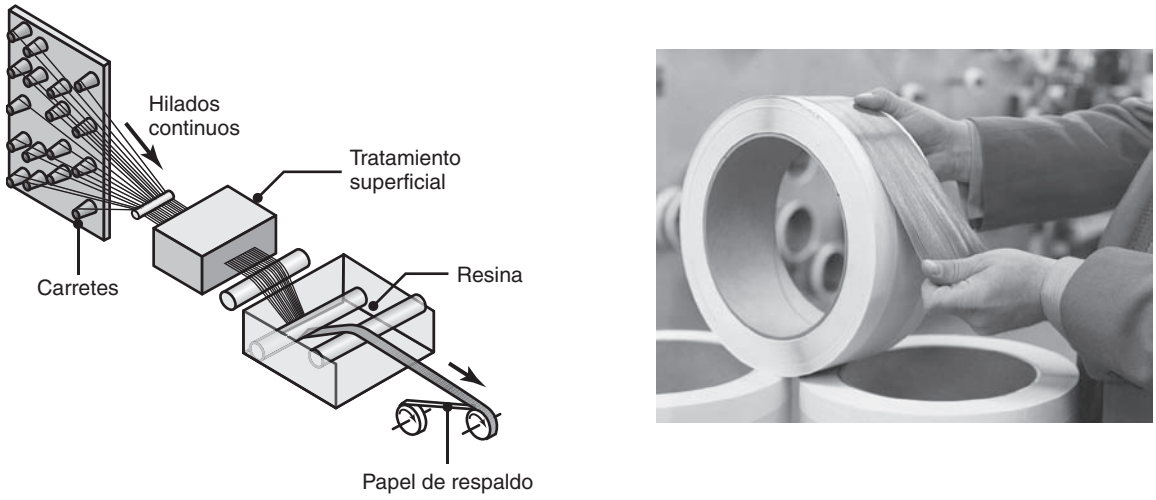
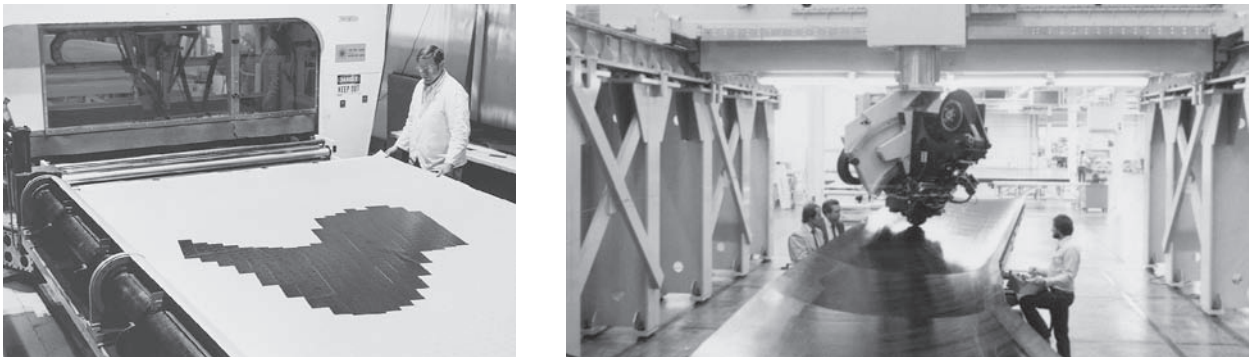


FIGURA 19.24 *(a)* Proceso de manufactura de cinta de compósito de matriz polimérica. *(b)* Cinta de preimpregnados de boro y epóxica. Estas cintas se utilizan en la fabricación de partes de plástico reforzado y componentes con altas relaciones de resistencia a peso y de rigidez a peso, particularmente importantes para aplicaciones en naves aéreas y espaciales y equipo deportivo. *Fuente*: *(a)* Cortesía de T.-W. Chou, R. L. McCullough y R. B. Pipes. *(b)* Cortesía de Avco Specialty Materials/Textron.



(a) (b)

FIGURA 19.25 *(a)* Arreglo de lámina simple de cinta de boro y epóxica para estabilizador horizontal de una aeronave de combate F-14. *(b)* Sistema de 10 ejes de colocación de cintas con control numérico por computadora. Esta máquina tiene la capacidad de colocar cintas de 75 mm y 150 mm (3 y 6 pulgadas) de anchura en contornos hasta de ±30° y a velocidades de hasta 0.5 m/s (1.7 pies/s). *Fuente*: *(a)* Cortesía de Grumman Aircraft Corporation. *(b)* Cortesía de The Ingersoll Milling Machine Company.

tas (fig. 19.26) y se depositan con una orientación aleatoria sobre una capa de pasta de resina. Por lo general, la pasta es una mezcla de poliéster (que puede contener rellenos, como diversos polvos minerales) y se aplica sobre una película de polímero (como el polietileno). Después se deposita una segunda capa de pasta de resina en la parte superior y la hoja se prensa entre rodillos.

Después el producto se une en rodillos (o se coloca en contenedores en varias capas) y se almacena hasta madurar y alcanzar la viscosidad deseada. El proceso de maduración se efectúa en condiciones controladas de temperatura y humedad y por lo general tarda un día.

Los compuestos de moldeo se deben almacenar a una temperatura suficientemente baja para retrasar el curado. Tienen una vida de almacenamiento limitada (por lo general, alrededor de 30 días) y se deben procesar dentro de este periodo. De manera alternativa, la resina y las fibras se pueden mezclar hasta el momento de colocarlas en el molde.

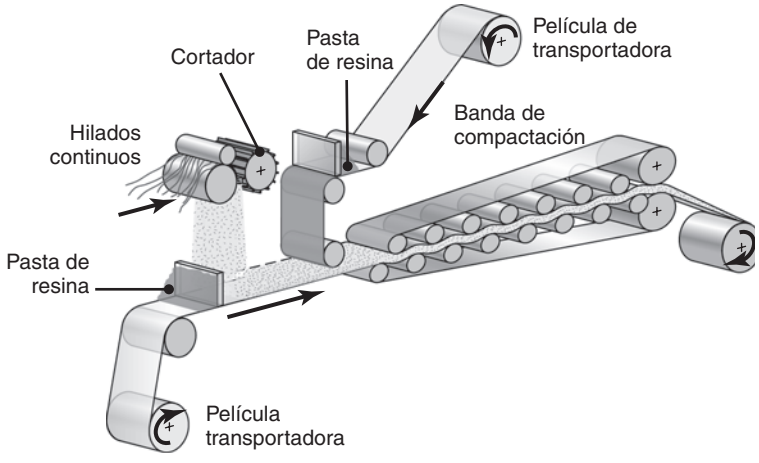


FIGURA 19.26 Esquema del proceso de manufactura para producir hojas de plástico con fibras de refuerzo. La hoja se mantiene viscosa en esta etapa y después se puede moldear como varios productos. *Fuente*: T. W. Chou, R. L. McCullough y R. B. Pipes.

Compuesto de moldeo volumétrico (BMC, por sus siglas en inglés). Estos compuestos tienen forma de palanquillas (de ahí el término volumétrico) y su diámetro es hasta de 50 mm (2 pulgadas). Se fabrican de la misma manera que los SMC y se extruyen para producir una forma volumétrica. Cuando se procesan como productos, los BMC tienen características de flujo similares a las de la pasta, por lo que también se conocen como *compuestos de moldeo de masa* (DMC, por sus siglas en inglés).

Compuesto de moldeo grueso (TMC, por sus siglas en inglés). Los compuestos de moldeo grueso combinan una característica del BMC (bajo costo) con una del SMC (mayor resistencia). Por lo general, se moldean por inyección mediante fibras cortadas en diversas longitudes. Se aplican en los componentes eléctricos debido a la alta resistencia dieléctrica del TMC.

19.13.2 Moldeo de plásticos reforzados

Existen diversos procesos de moldeo para plásticos reforzados, como se describe en esta sección.

Moldeo por compresión. El material se coloca entre dos moldes y se aplica presión. Los moldes pueden estar a temperatura ambiente o calentarse para acelerar el endurecimiento de la parte. El material puede ser un compuesto por moldeo volumétrico, que es una mezcla viscosa y pegajosa de polímeros, fibras y aditivos. Por lo general, se moldea en forma de tronco, que luego se corta o rebana en la forma deseada. Las longitudes de la fibra van de 3 mm a 50 mm (0.125 a 2 pulgadas), aunque también se pueden utilizar fibras de más de 75 mm (3 pulgadas) de largo.

Los compuestos de moldeo de hojas también se pueden procesar mediante moldeo por compresión. Estos compuestos son similares a los de moldeo volumétrico, excepto que la mezcla de fibras y resina se coloca entre hojas de plástico para hacer un emparedado que puede manejarse con facilidad. Las hojas se tienen que extraer antes de colocar el SMC en el molde.

Moldeo por bolsa de vacío. En este proceso (fig. 19.27a) se colocan preimpregnados en un molde para producir la forma deseada. La presión requerida para formar el producto y desarrollar buena unión se obtiene cubriendo el arreglo con una bolsa de plástico y creando un vacío. El curado ocurre a temperatura ambiente o en un horno.

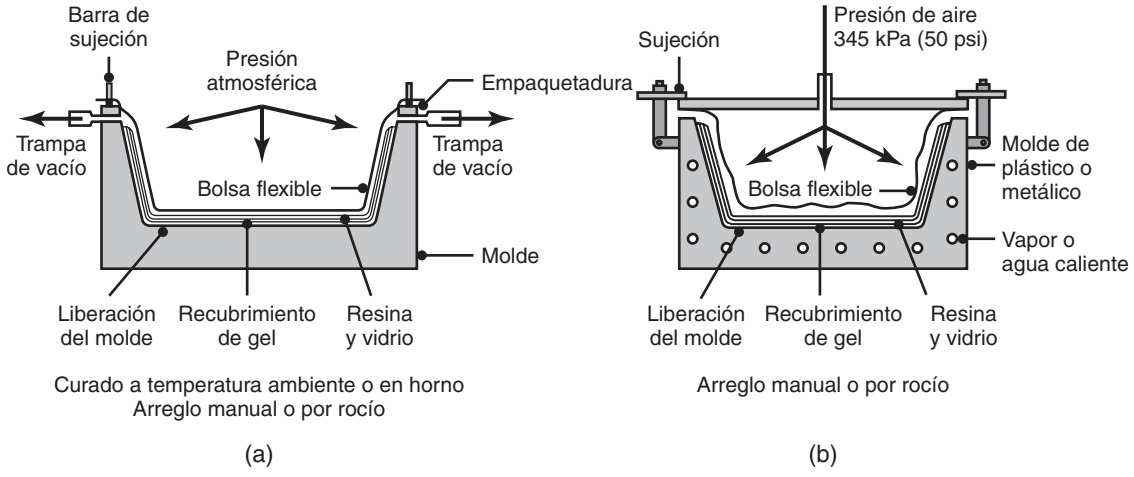


FIGURA 19.27 Esquema de *(a)* formado por bolsa de vacío y *(b)* formado por bolsa de presión. Estos procesos se utilizan en la fabricación de partes discretas de plásticos reforzados. *Fuente*: T. H. Meister.

Una variación de este proceso es el **moldeo por bolsa de presión** (fig. 19.27b). Se coloca una bolsa flexible sobre la mezcla de la resina y la fibra de refuerzo y se aplica presión sobre el molde en un intervalo que va de 200 a 400 kPa (30 a 50 psi). Si se requiere mayor calor y presión para producir partes con mayor densidad y menos huecos, todo el ensamble se coloca en una *autoclave* (cámara bajo calor y presión).

Si se desean propiedades direccionales específicas, es necesario mantener la orientación de las fibras. En los materiales de fibras cortas, no se busca una orientación específica. Para evitar que la resina se adhiera a la bolsa de vacío y facilitar la eliminación del exceso de resina, se colocan hojas de varios materiales (*tela de separación* o *tela de purgador*) en la parte superior de las hojas preimpregnadas.

Los moldes pueden fabricarse de metal (por lo general, aluminio), pero es más frecuente que se elaboren de la misma resina (con refuerzo) del material a curar. Esta práctica elimina cualquier dificultad provocada por la diferencia de dilatación térmica entre el molde y la parte.

Moldeo por contacto. Éste consiste en una serie de procesos que utiliza un molde macho o hembra (fig. 19.28), de ahí que también se le conozca como *procesamiento en molde abierto*, que se puede fabricar de materiales como plásticos reforzados, madera, metal o yeso. Se trata de un método *en húmedo* en el que los materiales se aplican en ca-

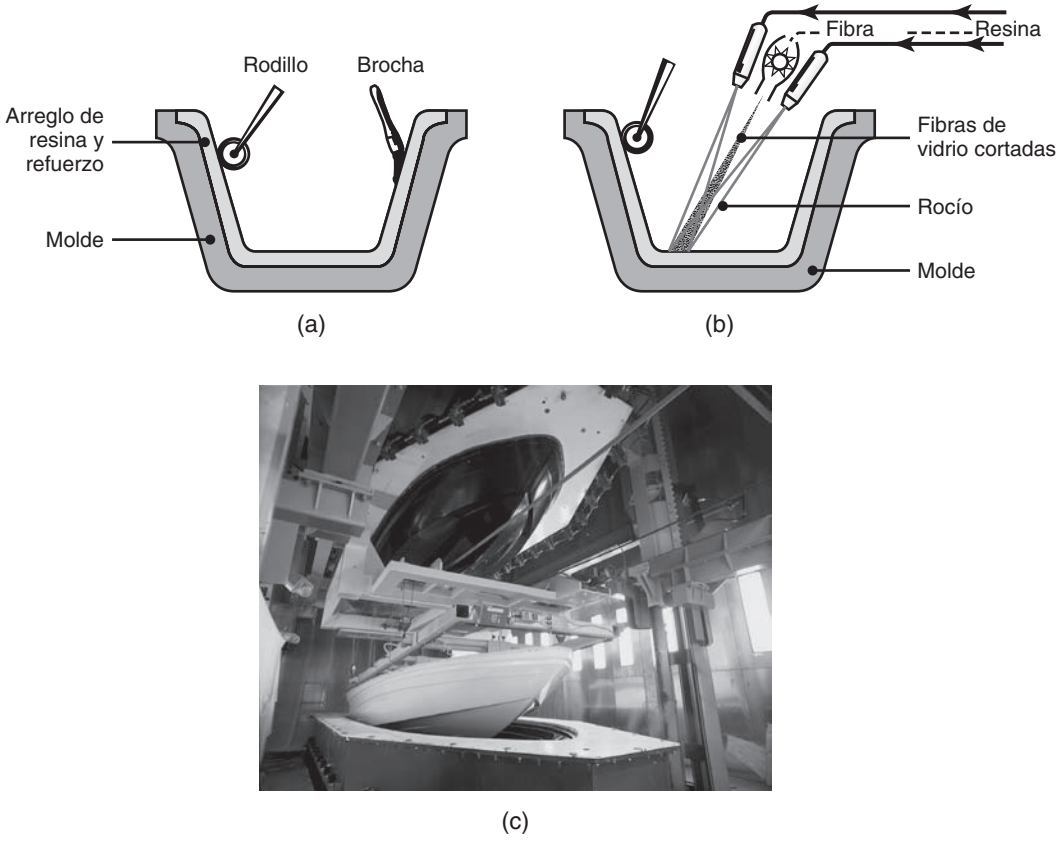


FIGURA 19.28 Métodos manuales de procesamiento de plásticos reforzados: *(a)* arreglo manual, y *(b)* arreglo por rocío. Obsérvese que, aunque el proceso es lento, sólo se requiere un molde. Las figuras muestran un molde hembra, pero también se utilizan moldes macho. Estos métodos también se conocen como *procesamiento en molde abierto*. *(c)* Casco de barco fabricado con estos procesos. *Fuente*: Cortesía de Genmar Holdings, Inc.

pas y el refuerzo se impregna con la resina al momento del moldeo. El moldeo por contacto se utiliza para fabricar *productos laminados* con altas proporciones de superficie a espesor, por lo que el proceso también se conoce como *laminación por contacto*. Ejemplos comunes de estos productos son las piscinas, los cascos para embarcaciones, las piezas de las carrocerías automotrices, tinas y regaderas para baños y cajas de alojamiento.

El método más simple de moldeo por contacto es el **arreglo manual**. Los materiales se colocan en el orden apropiado (resinas y refuerzos) con una brocha y se les da forma en el molde manualmente con un rodillo (fig. 19.28a). La acción de presión del rodillo expulsa cualquier burbuja de aire atrapada y compacta la parte. Los refuerzos colocados en el molde pueden tener diversas formas, incluyendo preimpregnados. En consecuencia, es posible controlar su orientación en el producto final.

En el **arreglo por rocío**, el moldeo se realiza mediante el rociado de los materiales en el molde. Como se muestra en la figura 19.28b, tanto la resina como las fibras cortadas se rocían sobre las superficies del molde. En este proceso tal vez se requiera oprimir con rodillos los materiales depositados (como en el arreglo manual) para eliminar toda la porosidad. Dado que las fibras cortadas tienen orientaciones aleatorias, no se pueden proporcionar propiedades direccionales a los productos fabricados mediante este proceso.

Estos dos procesos son relativamente lentos, tienen altos costos de mano de obra y requieren bastante tiempo y mano de obra en las operaciones de acabado. Además, la elección de los materiales que pueden utilizarse es limitada. Sin embargo, es fácil realizarlos y los herramentales no son costosos. Obsérvese también que sólo la superficie del lado del molde de la parte formada es lisa, por estar en contacto con las superficies del molde.

Moldeo de transferencia de resinas. Este proceso se basa en el moldeo por transferencia (sección 19.8). Una resina se mezcla con un catalizador y se fuerza, mediante una bomba de desplazamiento positivo tipo pistón, dentro de la cavidad del molde, que se llena con un refuerzo de fibras. Este proceso es una alternativa viable para el arreglo manual, el rociado y el moldeo por compresión para volúmenes bajos o medios de producción.

Moldeo por transferencia/inyección. Ésta es una operación automatizada que combina los procesos de moldeo por compresión, por inyección y por transferencia. Esta combinación tiene buen acabado superficial, estabilidad dimensional y propiedades mecánicas obtenidas en el moldeo por compresión, capacidad de alta automatización y el bajo costo del moldeo por inyección y por transferencia.

EJEMPLO 19.3 Raquetas de tenis fabricadas con materiales compósitos

Para proporcionar ciertas características deseables (como ligereza y rigidez), las raquetas de tenis de material compósito se fabrican con grafito, fibra de vidrio, boro, cerámica (carburo de silicio), y Kevlar como fibras de refuerzo. Estas raquetas tienen un núcleo de espuma y algunas poseen un refuerzo unidireccional (en tanto que otras tienen un trenzado).

Las raquetas con fibras de boro son las más rígidas, seguidas de las que tienen fibras de grafito (carbono), vidrio y Kevlar. La raqueta con la menor rigidez tiene 80% de fibra de vidrio, en tanto que la más rígida tiene 95% de grafito y 5% de boro. Por lo tanto, tiene el mayor porcentaje de la fibra de refuerzo económica y el menor porcentaje de la fibra más costosa.

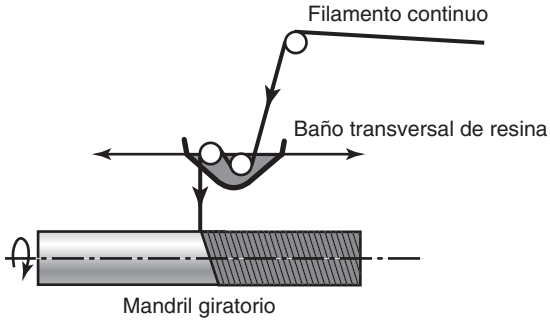
Un nuevo desarrollo es el uso de fibras piezoeléctricas en el material compósito del bastidor de la raqueta. El propósito del material piezoeléctrico es modificar la rigidez de la raqueta dependiendo de si se desea un tiro de potencia o de control. Además, dicho material se puede utilizar para amortiguar vibraciones con el fin de mejorar la sensación de la raqueta de tenis.

Se utilizan dos estrategias principales de manufactura para raquetas de tenis de materiales compósitos. Se pueden moldear por compresión (ver fig. 19.19), en la que las fibras o tejidos se impregnan con epóxica y se colocan en el molde. Un tubo interno se infla o inyecta con una espuma de expansión para producir una sección transversal hueca, cuya forma es definida por el molde. Algunas raquetas de tenis se fabrican mediante moldeo por inyección usando una matriz de nailon y fibras cortas de refuerzo (por lo general, grafito).

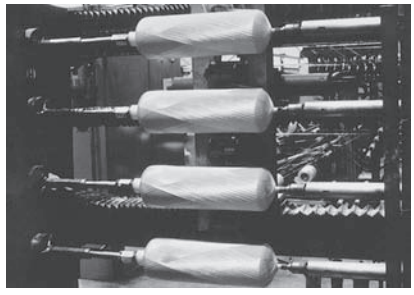
19.13.3 Devanado de filamentos, pultrusión y pulformado

Devanado de filamentos. En este proceso se combinan resina y fibras al momento del curado (fig. 19.29a) para desarrollar una estructura compósita. Partes simétricas con respecto a un eje (como tubos y tanques de almacenaje) e incluso partes no simétricas se producen en un mandril giratorio. El filamento, la cinta o la fibra continua de refuerzo se envuelven alrededor de la forma. Los refuerzos se impregnan pasándolos a través de un baño de polímeros. Este proceso puede modificarse envolviendo el mandril con un material preimpregnado.

Los productos fabricados por devanado de filamentos son muy resistentes debido a su estructura altamente reforzada. Por medio de este proceso se han fabricado partes grandes, hasta de 4.5 m (15 pies) de diámetro y 20 m (65 pies) de largo. También se ha utilizado el devanado de filamentos para reforzar recipientes a presión cilíndricos y esféricos (fig. 19.29b) fabricados con materiales como aluminio y titanio, donde la presencia de un revestimiento interior metálico hace que la parte sea impermeable. El devanado de filamentos también se puede emplear directamente sobre formas propulsoras de cohetes



(a)



(b)

FIGURA 19.29 *(a)* Esquema del proceso de devanado de filamentos; *(b)* fibra de vidrio que se devana sobre los revestimientos de aluminio para los recipientes a fin de inflar los toboganes para el avión Boeing 767. Los productos fabricados mediante este proceso tienen alta relación de resistencia a peso y también sirven como recipientes ligeros a presión. *Fuente*: Cortesía de Brunswick Corporation.

sólidos. Se han desarrollado máquinas de siete ejes controladas por computadora que dispensan en forma automática diversos preimpregnados unidireccionales para hacer también partes asimétricas, como los ductos de motores de aeronaves, fuselajes, propulsores, álabes y puntales.

Pultrusión. Mediante el proceso de *pultrusión* se fabrican de manera continua partes grandes con varias secciones transversales uniformes (como barras, perfiles, cintas planas y tubería). Esta secuencia de operaciones se muestra en la figura 19.30. Se alimenta refuerzo continuo, fibra de vidrio o tejido (por lo común fabricado de fibra de vidrio de aluminosilicato de calcio, tipo E; ver la sección 9.2.1) mediante varias bobinas. Primero se jala el haz o manojo a través de un baño de polímero termofijo (generalmente, poliéster), después a través de una matriz de preformado y a través de una matriz de acero caliente.

El producto se cura durante su recorrido a través de la matriz caliente, que tiene una longitud de hasta 1.5 m (5 pies) y una velocidad suficientemente lenta que proporcione el tiempo necesario para que el polímero se fije. (Obsérvese que ésta es una operación similar al horneado continuo de pan y galletas, o a la fabricación de ruedas de molino aglutinadas con resinas). Después se corta el material de salida a las longitudes deseadas. Entre los productos comunes fabricados por pultrusión (que pueden contener hasta 75% de fibra de refuerzo) figuran palos de golf, postes de esquís, cañas de pescar, flechas impulsoras y miembros estructurales, como escaleras, andenes y pasamanos. Mediante este proceso se han fabricado secciones transversales grandes, hasta de 1.5 m $\times$ 0.3 m (60 pulgadas $\times$ 12 pulgadas).

Pulformado. Los productos con refuerzo continuo, distintos de los perfiles de sección transversal constante, se fabrican por *pulformado*. Después de jalarlo a través del baño de polímeros, el compósito se sujeta entre las dos mitades de una matriz y se cura como producto terminado. Las matrices recirculan y moldean los objetos en forma sucesiva. Los productos más fabricados son mangos de martillos reforzados con fibras de vidrio y muelles curvos automovilísticos.

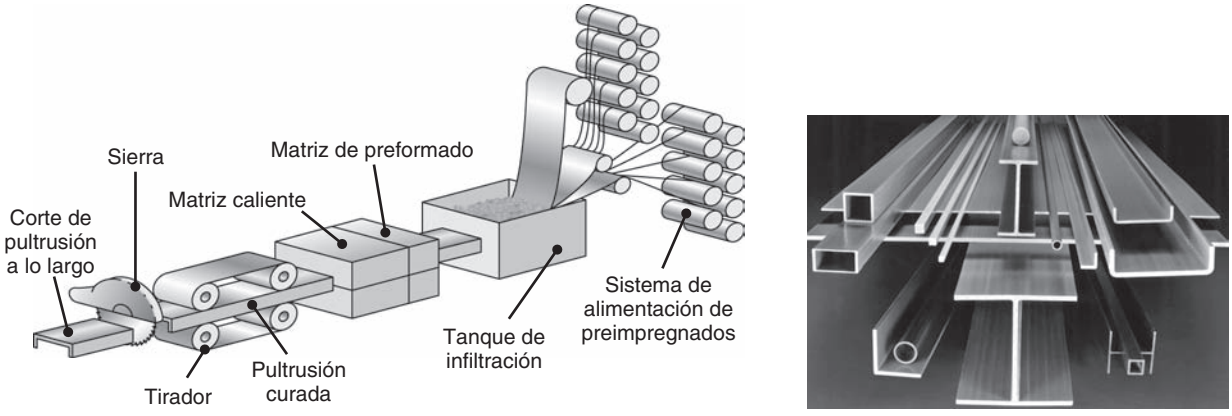


FIGURA 19.30 *a)* Esquema del proceso de pultrusión. *(b)* Ejemplos de partes fabricadas por pultrusión. Los componentes principales de las escaleras de fibra de vidrio (utilizadas particularmente por los electricistas) se fabrican mediante este proceso. Se producen en diferentes colores, pero son más pesadas debido a la presencia de fibras de vidrio. *Fuente*: Cortesía de Strongwell Corporation.

EJEMPLO 19.4 Partes de carrocerías automotrices de polímeros moldeadas mediante diversos procesos

La tendencia al uso de materiales poliméricos para carrocerías automotrices ha aumentado con gran velocidad; este ejemplo indica las aplicaciones comunes de los polímeros. Tres métodos de procesamiento utilizados comúnmente y que compiten unos con otros son: *(a)* termoplásticos y elastómeros moldeados por inyección; *(b)* poliurea/poliuretanos moldeados por reacción-inyección, y *(c)* compuesto de moldeo de láminas moldeadas por compresión (SMC) con poliéster y viniléster moldeados por transferencia de resinas.

Ejemplos característicos de las partes fabricadas para automóviles son: *(a)* las piezas de carrocerías y otros componentes exteriores grandes fabricados mediante moldeo por inyección; *(b)* las defensas delanteras y los tableros traseros fabricados con polifenileno-éter/nailon o poliéster termoplástico; *(c)* las piezas exteriores de puertas elaboradas con policarbonato/ABS, y *(d)* las facias fabricadas con poliolefina termoplástica. Estos materiales se seleccionan por la flexibilidad del diseño, resistencia al impacto y tenacidad, resistencia a la corrosión, alta durabilidad y masa reducida. Las piezas verticales y las facias verticales se fabrican en moldes de cavidades múltiples en máquinas grandes de moldeo por inyección; después se ensamblan mecánicamente en un bastidor de acero.

También se fabrican piezas grandes de carrocerías exteriores de poliuretano moldeado por reacción-inyección (RIM, por sus siglas en inglés), aunque las poliureas se han vuelto importantes para las piezas de carrocería y defensas. Las facias termofijas se fabrican con poliuretano de RIM reforzado y (más recientemente) con nuevas poliureas, debido a su mejor estabilidad térmica, tenacidad a baja temperatura y menos ciclos requeridos. Las piezas horizontales grandes y exteriores para carrocerías (como cofres, techos y cubiertas traseras) se fabrican con poliéster o vinilester reforzado en la forma de compuestos de moldeo de lámina moldeada por compresión. Las partes de menor volumen se fabrican por moldeo de transferencia (RTM, por sus siglas en inglés).

Las consideraciones ambientales y de reciclaje se han vuelto cada vez más importantes al seleccionar materiales y procesos para automóviles. Por ejemplo, el óxido de polifenileno está siendo reemplazado por policarbonato, que se fabrica con materiales 100% reciclados o recuperados.

19.13.4 Consideraciones de calidad en el procesamiento de plásticos reforzados

Las principales consideraciones de calidad en los procesos ya descritos se refieren a huecos y separaciones entre capas sucesivas de material. Es necesario dejar escapar los gases volátiles que se generan durante el procesamiento del arreglo a través de la bolsa de vacío, a fin de evitar la porosidad debida a los gases atrapados. Durante el curado inadecuado, o durante el transporte y manejo de las partes, se pueden desarrollar microgrietas. Es posible detectar estos defectos mediante inspección ultrasónica y otras técnicas descritas en la sección 36.10.

19.14 Procesamiento de compósitos de matriz metálica y de matriz cerámica

Los compósitos de matriz metálica (MMC, por sus siglas en inglés) se pueden fabricar como partes moldeadas casi netas mediante los siguientes procesos:

- El **procesamiento de fase líquida** consiste básicamente en colar el material de la matriz líquida (como aluminio o titanio) y el refuerzo sólido (como grafito, óxido de aluminio o carburo de silicio) con procesos de *fundición convencional* o me-

diante *fundición por infiltración de presión*. En este último proceso, se utiliza gas presurizado para forzar la matriz de metal líquido dentro de una preforma (por lo general, moldeada con alambre u hojas y fabricada con fibras de refuerzo).

- El **procesamiento de fase sólida** consta básicamente de técnicas de *metalurgia de polvos*, entre ellas prensado isostático en caliente o en frío. Es importante el mezclado adecuado para obtener una distribución homogénea de las fibras. Un ejemplo de esta técnica es la producción de herramentales y dados de carburo de tungsteno embebidos en una matriz de cobalto, como se describe en el ejemplo 17.4.
- El **procesamiento de dos fases (líquido-sólido)** comprende tecnologías que consisten en la *reofundición* (sección 11.3.7) y las técnicas de *atomización de rocío* y *deposición*. En estos dos últimos procesos, las fibras de refuerzo se mezclan con una matriz que contiene fases de metal líquido y sólido.

En la fabricación de partes de compósitos complejos de matriz metálica con refuerzo de triquitas o fibras, son muy importantes las variables de la geometría del dado y el control del proceso para garantizar la distribución y orientación apropiadas de las fibras dentro de la parte. Por lo general, las partes de MMC fabricadas mediante técnicas de metalurgia de polvos se tratan térmicamente para optimizar las propiedades.

EJEMPLO 19.5 Revestimientos para rotores y cilindros de frenos de compósitos de matriz metálica

En la actualidad se están fabricando rotores de freno con compósitos que constan de una matriz de base aluminio, reforzada con 20% de partículas de carburo de silicio. Éstas se revuelven en aleaciones de aluminio fundido y la mezcla se funde en lingotes, que después se vuelven a fundir y colar dándoles formas (como rotores y tambores de freno) mediante procesos de fundición (como fundición en arena verde, en arena aglutinada, por revestimiento, de molde permanente y por dado impresor). Estos rotores *(a)* tienen casi la mitad del peso de los fabricados con hierro fundido gris, *(b)* conducen calor tres veces más rápido, *(c)* agregan las características de rigidez y resistencia al desgaste de las cerámicas, y *(d)* reducen el ruido y la vibración debido al amortiguamiento interno.

Para mejorar la resistencia al desgaste y al calor del hierro fundido de los revestimientos de los cilindros en los monobloques de aluminio de los motores, se están desarrollando revestimientos de matriz de aluminio. La capa de la matriz metálica consta de 12% de fibra de óxido de aluminio y 9% de fibra de grafito y tiene un espesor que va de 1.5 mm a 2.5 mm (0.06 a 0.1 pulgada).

19.14.1 Procesamiento de compósitos de matriz cerámica

En la fabricación de compósitos de matriz cerámica (CMC) se utilizan diversos procesos, incluyendo técnicas más recientes como la infiltración de fundido, oxidación controlada y sinterización por prensado en caliente. Aunque estas últimas se encuentran más bien en la etapa experimental, se siguen desarrollando para mejorar las propiedades y el desempeño de estos compósitos.

- La **infiltración de lodo** es el proceso más común para producir compósitos de matriz cerámica. Comprende la preparación de una preforma con fibras, que primero se prensa en caliente y después se impregna con una combinación de lodo (que contiene el polvo de la matriz), un líquido portador y un aglutinante orgánico. Por medio de este proceso se obtiene alta resistencia, tenacidad y estructura uniforme, pero el producto tiene propiedades limitadas de alta temperatura. Una mejora de este proceso es el **enlace por reacción** o **sinterización por reacción** del lodo.
- Los procesos de **síntesis química** comprenden técnicas de sol-gel y de precursores de polímeros. En el **proceso de sol-gel**, un *sol* (fluido coloidal que tiene el líquido como su fase continua) que contiene fibras se convierte en un *gel*. Después el gel se some-

te a tratamiento térmico para producir un compósito de matriz cerámica. El **método precursor de polímeros** es similar al proceso utilizado en la fabricación de fibras de cerámica, usando óxido de aluminio, nitruro de silicio y carburo de silicio.

- En la **infiltración de vapor químico** se infiltra una preforma porosa de fibras con la fase de la matriz utilizando la técnica de deposición de vapor químico (sección 34.6). El producto tiene muy buenas propiedades de alta temperatura, pero el proceso consume mucho tiempo y es costoso.

19.15 Consideraciones de diseño

Las consideraciones de diseño en el formado y moldeo de plásticos son similares a las de los metales de fundición. La selección de materiales apropiados de una gran lista requiere tomar en cuenta *(a)* los requisitos de servicio, *(b)* posibles efectos de largo alcance sobre sus propiedades y comportamiento (como estabilidad dimensional y desgaste), y *(c)* disposición final del producto después de su ciclo de vida. Algunos de estos aspectos se describieron en la sección I.6 de la Introducción General y en la sección 7.8.

A continuación se indican los lineamientos generales de diseño para la producción de partes de plástico y materiales compósitos.

1. Como ya se ha visto, los procesos de los plásticos tienen flexibilidad inherente para producir una amplia variedad de formas y tamaños de partes. Se pueden fabricar partes complejas con características internas y externas fácilmente y a velocidades de producción altas. Por lo tanto, un proceso como el moldeo por inyección compite bien con el moldeo por inyección de polvos y la fundición de impresión, los cuales son capaces de producir formas complejas con paredes delgadas. Al considerar posibles sustituciones de procesos, es necesario tener en mente que los materiales comprendidos y sus características son muy diferentes, cada uno con sus propiedades específicas, que son importantes para una aplicación en particular.
2. En comparación con los metales, los plásticos tienen mucha menor rigidez y resistencia. Por lo tanto, los tamaños y las formas de las secciones se deben seleccionar de manera apropiada. Dependiendo de la aplicación, se puede obtener un alto módulo de sección con base en los principios comunes de diseño para vigas I y tubos. Las superficies grandes y planas se pueden volver rígidas por un medio tan simple como prescribir curvaturas para las partes. Por ejemplo, obsérvese la rigidez de las tablillas delgadas, aunque ligeramente curvas, de las persianas. Estos aspectos tan sencillos de diseño se pueden apreciar al inspeccionar las diferencias entre las cubiertas de los tractores para jardín (por ejemplo, uno hecho de lámina metálica y el otro de plástico). Los refuerzos con fibras o partículas también son efectivos para lograr este objetivo.
3. Con frecuencia, la forma general y el espesor de la parte determinan el proceso particular de formado o moldeo a seleccionar. Incluso después de elegir el proceso específico, los diseños de la parte y la matriz deben ser tales que no presenten dificultades en cuanto a la generación adecuada de la forma (fig. 19.31), control dimensional y acabado superficial. Debido a la baja rigidez y efectos térmicos, las tolerancias dimensionales (en particular para los termoplásticos) no son tan pequeñas como en los procesos de metalformado. Por ejemplo, las tolerancias dimensionales son mucho más pequeñas en el moldeo por inyección que en el termoformado. Como en la fundición de metales y aleaciones, es importante controlar el flujo de material dentro de las cavidades del molde. También deben considerarse los efectos de la orientación molecular durante el procesamiento del polímero, sobre todo en la extrusión, termoformado y moldeo por soplado.
4. Es necesario evitar grandes variaciones en las áreas transversales, los espesores de las secciones y los cambios abruptos en la geometría para lograr una generación adecuada de formas. Por ejemplo, obsérvese que las *marcas de hundimiento* (chupado) que aparecen en la pieza superior de la figura 19.31c se deben a que las sec-

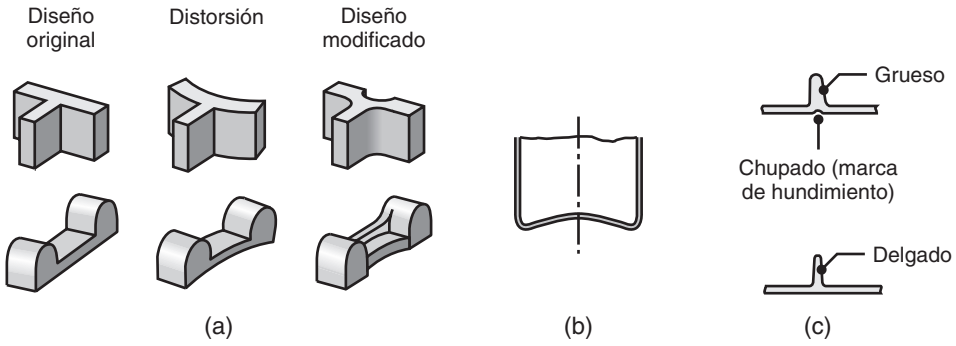


FIGURA 19.31 Ejemplos de modificaciones de diseño para eliminar o minimizar la distorsión en las partes de plástico: *(a)* cambios de diseño sugeridos a fin de minimizar la distorsión; *(b)* rigidización de los fondos de los contenedores delgados de plástico mediante domos, técnica similar al proceso utilizado para formar los fondos de las latas de aluminio para bebidas, y *(c)* cambio de diseño en una costilla a fin de minimizar el chupado (marca de hundimiento) provocado por la contracción durante el enfriamiento de las secciones delgadas en las partes moldeadas.

ciones gruesas se solidifican al final. Además, la contracción en secciones transversales más grandes tiende a causar *porosidad* en las partes de plástico, como sucede en la fundición de metales (ver fig. 12.2), afectando así la calidad del producto. Por otro lado, la falta de rigidez puede dificultar aún más la expulsión de las partes delgadas de los moldes después de moldearlas.

5. Además, el módulo elástico bajo los plásticos requiere que las formas se seleccionen adecuadamente para mejorar la rigidez del componente (fig. 19.31b), en particular cuando el ahorro de material es un factor importante. Nótese que estas consideraciones son similares a las del diseño para fundiciones metálicas, como lo es la necesidad de ángulos de salida (comúnmente menos de un grado para los polímeros) que permitan extraer la parte de los moldes y matrices. Por lo general, el espesor recomendado de la parte va de 1 mm (0.04 pulgada) para partes pequeñas a alrededor de 3 mm (0.12 pulgada) para partes grandes.
6. Es importante considerar las propiedades físicas (en particular un coeficiente alto de dilatación térmica). El diseño o ensamble inapropiado de la parte puede producir distorsión (alabeo) y contracción no uniforme (fig. 19.31a). Los plásticos se pueden moldear con facilidad alrededor de partes e insertos metálicos; sin embargo, su resistencia y compatibilidad en la interfaz con los metales durante el ensamble es un factor que debe considerarse.
7. Las propiedades del producto final dependen del material original y de su historia de procesamiento. Por ejemplo, el trabajado en frío de los polímeros mejora su resistencia y tenacidad. En cambio, debido a la falta de uniformidad en la deformación (incluso en el laminado simple), en los polímeros se desarrollan los mismos esfuerzos residuales que en los metales. Es posible que estos esfuerzos también obedezcan a los ciclos térmicos de la parte durante el procesamiento. La magnitud y dirección de los esfuerzos residuales (aunque sean producidos) son factores importantes, como en el agrietamiento por esfuerzo. Además, dichos esfuerzos se pueden relajar en cierto periodo y provocar distorsión de la parte durante su vida útil.
8. Una ventaja importante en el diseño de los plásticos reforzados es la naturaleza direccional de la resistencia del compósito (por ejemplo, ver fig. 9.7). La matriz de resina transfiere las fuerzas externas aplicadas al material a las fibras, que son mucho más resistentes y rígidas que la matriz. Cuando todas las fibras se orientan en una dirección, el material compósito producido es excepcionalmente resistente en la dirección de la fibra y débil en las otras.

   Para obtener resistencia en dos direcciones principales, se arreglan capas unidireccionales individuales en los ángulos correspondientes, una respecto de la otra,

como se hace en el devanado de filamentos. Si se requiere resistencia en una tercera dirección (espesor), se utiliza un tipo de refuerzo diferente (como fibra tejida) para formar una estructura de emparedado.

19.16 Economía del procesamiento de plásticos y materiales compósitos

Como en todos los demás procesos de manufactura, al final las decisiones de diseño y manufactura se basan en el desempeño y el costo, incluyendo los costos del equipo, herramentales, mano de obra y producción. La selección final de un proceso, o secuencia de procesos, también depende en gran medida del volumen de producción. En la tabla 19.2 se presentan las características generales del procesamiento de plásticos y materiales compósitos. Obsérvese la gran variedad de costos de equipos y herramentales y las cantidades económicas para producción.

En esta tabla también se puede ver que los costos del equipo y del herramental y las matrices se relacionan de alguna manera, y que para procesos como el termoformado, la fundición y el rotomoldeo, estos costos son relativamente bajos. Las más costosas son las máquinas de moldeo por inyección, seguidas de las de moldeo por compresión y de moldeo por transferencia. Los costos de los herramentales y matrices también son elevados, por lo que en una operación como el moldeo por inyección, el tamaño de la matriz y el número óptimo de cavidades de la misma para producir cada vez más partes en un ciclo son consideraciones importantes, como lo son en la fundición a presión en matriz.

Para permitir un mayor número de cavidades, se pueden considerar matrices más grandes (con canales de alimentación para cada cavidad) pero a expensas de aumentar aún más el costo de la matriz. Por otro lado, se producen más partes por ciclo de máquina, lo que aumenta la velocidad de producción. Por lo tanto, es necesario realizar un análisis detallado para determinar el tamaño general de la matriz, su número de cavidades y la capacidad requerida de la máquina, a fin de optimizar la operación total y producir partes a un costo mínimo. Consideraciones similares también se aplican a los demás métodos de procesamiento de plásticos descritos en este capítulo.

En la producción de materiales compósitos, los costos de equipos y herramentales para la mayoría de las operaciones de moldeo son generalmente altos, las capacidades de producción son bajas y las cantidades económicas de producción varían en gran medida. Los altos costos de equipos y herramentales pueden ser aceptables si la línea de producción es grande.

TABLA 19.2

Comparativo de características de producción de diversos métodos de moldeo

Método de moldeo	Costo de equipo y herramental	Capacidad de producción	Cantidad económica de producción
Extrusión	M-B	MA-A	MA
Moldeo por inyección	MA	MA	MA
Rotomoldeo	M	M-B	M
Moldeo por soplado	M	A-M	A
Moldeo por compresión	A-M	M	A-M
Moldeo por transferencia	A	M	MA
Termoformado	M-B	M-B	A-M
Fundición	M-B	M-B	B
Fundición centrífuga	A-M	M-B	M-B
Pultrusión	A-M	A	A
Devanado de filamentos	A-M	B	B
Arreglo por rocío y arreglo manual	B-MB	B-MB	B

MA = Muy alto; A = Alto; M = Medio; B = Bajo; MB = Muy bajo

RESUMEN

- Los termoplásticos se pueden moldear mediante varios procesos, entre ellos la extrusión, el moldeo, la fundición y el termoformado, así como por algunos procesos utilizados en el trabajo de los metales. Por lo general, la materia prima se presenta en forma de pellets, gránulos y polvos. La elevada sensibilidad a la velocidad de deformación de los termoplásticos permite un gran ensanchado en las operaciones de formado, por lo que pueden producirse formas complejas y profundas con facilidad. Generalmente, los plásticos termofijos se moldean o funden y tienen mejor precisión dimensional que en el formado de los termoplásticos.
- Los plásticos con fibras de refuerzo se procesan para producir componentes estructurales mediante plásticos líquidos, preimpregnados y compuestos para moldeo de hojas y volumétrico. Las técnicas de fabricación incluyen diversos métodos de moldeo, devanado de filamentos, pultrusión y pulformado. Es importante considerar el tipo y la orientación de las fibras, así como la resistencia de la unión entre las fibras y la matriz y entre las capas de materiales.
- El diseño de partes de plástico debe tomar en cuenta su baja resistencia y rigidez y sus propiedades físicas, como su alta dilatación térmica y su resistencia a la temperatura, por lo regular baja. Existen técnicas de inspección para determinar la integridad de estos productos.
- Debido a su creciente uso en aplicaciones críticas, el procesamiento de compósitos de matriz metálica y de matriz cerámica ha tenido importantes desarrollos para garantizar la integridad del producto y reducir los costos. Los compósitos de matriz metálica se procesan por medio de fase líquida, fase sólida y dos fases. Los compósitos de matriz cerámica se pueden procesar mediante infiltración de lodo, síntesis química o infiltración de vapor químico.
- Debido a la gran variedad de materiales de bajo costo y técnicas de manufactura disponibles, debe tomarse en consideración la economía del procesamiento de plásticos y materiales compósitos, en particular si se compara con las de los componentes metálicos. Estos factores incluyen costos de maquinaria y matrices, tiempos de los ciclos y velocidad, y volumen de producción.

TÉRMINOS CLAVE

Arreglo de rocío
Arreglo manual
Cabeza de hilar
Calandreado
Coextrusión
Colado
Compuesto de moldeo de lámina
Compuesto de moldeo grueso
Compuesto de moldeo volumétrico
Dado de gancho para ropa
Devanado de filamentos
Dimensionado
Encapsulado
Extrusión
Formado con punto frío
Formado de fase sólida
Formado en frío
Impregnación
Infiltración de lodo
Infiltración de vapor químico
Marcas de hundimiento
Masticado
Moldeo de espuma
Moldeo de fase sólida
Moldeo estructural de espuma
Moldeo por bolsa de vacío
Moldeo por compresión
Moldeo por contacto
Moldeo por extrusión y soplado
Moldeo por inyección
Moldeo por reacción-inyección
Moldeo por soplado
Moldeo por transferencia
Moldeo por transferencia de resinas
Parisón
Pellets (partículas)
Plastisoles
Preimpregnados
Procesamiento de dos fases
Procesamiento de fase líquida
Pulformado
Pultrusión

Relación de soplado
Rotomoldeo
Síntesis química
Sobremoldeo
Termoformado
Torcido
Torcido fundido

BIBLIOGRAFÍA

Baird, D. G. y Collias, D. I., *Polymer Processing: Principles and Design*, Wiley, 1998.

Berins, M. L. (ed.), *Plastics Engineering Handbook*, 5a. ed., Chapman & Hall, 1994.

Bhowmick, A. K., Hall, M. M. y Benarey, H. A., *Rubber Products Manufacturing Technology*, Marcel Dekker, 1994.

Bryce, D., *Plastic Injection Molding*, Vol. I, 1996; Vol. II, 1997; Vol. III, 1998; Vol. 1V, 1999, Society of Manufacturing Engineers.

Buckley, C. P., Bucknall, C. B. y McCrum, N. G., *Principles of Polymer Engineering*, 2a. ed., Oxford, 1997.

Campbell, P. D. O., *Plastic Component Design*, Industrial Press, 1996.

Chabot, J. F., Jr., *The Development of Plastics Processing Machinery and Methods*, Wiley, 1992.

Chanda, J. M. y Roy, S. K., *Plastics Technology Handbook*, 3a. ed., Marcel Dekker, 1998.

Cracknell, P. S. y Dyson, R. W., *Handbook of Thermoplastics Injection Mould Design*, Kluwer, 1993.

Engineering Materials Handbook, Vol. 1: *Composites*, ASM International, 1987.

Feldman, D. y Barbalata, A., *Synthetic Polymers: Technology, Properties, Applications*, Kluwer, 1996.

Gastrow, H., *Injection Molds: 130 Proven Designs*, Hanser Gardner, 2002.

Griskey, R. G., *Polymer Process Engineering*, Kluwer, 1995.

Gutowski, T. G., *Advanced Composites Manufacturing*, Wiley, 1997.

Harper, C., *Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites*, 3a. ed., McGraw-Hill, 1996.

Isayev, A. I., *Injection and Compression Molding Fundamentals*, Marcel Dekker, 1987.

Johnson, P. S., *Rubber Processing: An Introduction*, Hanser Gardner, 2001.

Karszes, W. M., *Extrusion Coating: Equipment and Materials*, Tappi Press, 1997.

Lee, N. C., *Blow Molding Design Guide*, Hanser Gardner, 1998.

Macosko, C. W., *Fundamentals of Reaction-Injection Molding*, Oxford University Press, 1989.

Mazumdar, S. K., *Composites Manufacturing: Materials, Products and Process Engineering*, CRC, 2001.

Mallick, P. K. (ed.), *Composites Engineering Handbook*, Marcel Dekker, 1997.

Malloy, R. A., *Plastic Part Design for Injection Molding—An Introduction*, Hanser Gardner, 1994.

Mills, N., *Mechanical Design of Polymer Foam Products*, Chapman & Hall, 1997.

Modern Plastics Encyclopedia, McGraw-Hill, anual.

Morton-Jones, D. H., *Polymer Processing*, Chapman & Hall, 1989.

Muccio, E. A., *Plastic Part Technology*, ASM International, 1991.

_____, *Plastics Processing Technology*, ASM International, 1994.

Potter, K., *Resin Transfer Moulding*, Chapman & Hall, 1997.

Pye, R. G. W., *Injection Mold Design*, 4a. ed., Wiley, 1989.

Quinn, J. A., *Composites Design Manual*, Technomic, 1999.

Rauwendaal, C., *Polymer Extrusion*, 4a. ed., Hanser Gardner, 2001.

Rosato, D. V., *Plastics Processing Data Handbook*, 2a. ed., Chapman & Hall, 1997.

Rosen, S. R., *Thermoforming: Improving Process Performance*, Society of Manufacturing Engineers, 2002.

Schwartz, M. M., *Composite Materials*, Vol. 2: *Processing, Fabrication, and Applications*, Prentice Hall, 1999.

Starr, T. F., *Pultrusion for Engineers*, CRC Press, 2000.

Stevens, M. J. y Covas J. A., *Extruder Principles and Operation*, 2a. ed., Kluwer, 1995.

Strong, A. B., *Plastics: Materials and Processing*, Prentice Hall, 1996.

_____, *Fundamentals of Composites Manufacturing*, Society of Manufacturing Engineers, 1989.

Sweeney, F. M., *Reaction Injection Molding Machinery and Processes*, Marcel Dekker, 1987.

Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4a. ed., Vol. 8: *Plastic Part Manufacturing*, Society of Manufacturing Engineers, 1996.

Wilkinson, A. N. y Ryan, A., *Polymer Processing and Structure Development*, Kluwer, 1999.

Winchaeli, W., *Extrusion Dies for Plastics and Rubber*, 2a. ed., Hanser Gardner, 1992.

PREGUNTAS DE REPASO

19.1 ¿Cuáles son las formas de las materias primas para procesar plásticos y convertirlos en productos?
19.2 ¿Cómo se dimensionan las máquinas de moldeo por inyección?
19.3 Describa el proceso de moldeo por soplado.
19.4 ¿Qué es *(a)* un parisón, *(b)* un plastisol y *(c)* un preimpregnado?
19.5 ¿Cómo se produce la película delgada de plástico?
19.6 Mencione diversos productos comunes que se pueden fabricar mediante termoformado.
19.7 ¿Qué similitudes y diferencias existen entre el moldeo por compresión y el forjado de matriz cerrada?
19.8 Explique la diferencia entre impregnación y encapsulado.
19.9 Describa las ventajas de los plásticos formados en frío sobre los demás métodos de procesamiento.
19.10 Mencione los principales métodos utilizados para procesar plásticos reforzados.
19.11 ¿Cuáles son las características de los productos devanados en filamentos? Explique por qué son deseables.
19.12 Describa los métodos que pueden utilizarse para fabricar productos tubulares de plástico.
19.13 Liste las principales consideraciones de diseño en el formado y moldeo de plásticos reforzados.
19.14 ¿Qué es la pultrusión? ¿Qué es el pulformado?
19.15 Describa los principales procesos de manufactura utilizados para fabricar compósitos *(a)* con matriz metálica y *(b)* con matriz cerámica.
19.16 ¿Cómo se producen la lámina y la película de plástico?
19.17 ¿Cuál es el proceso utilizado para fabricar vasos de espuma?
19.18 Si un polímero tiene forma de hoja delgada, ¿es un termoplástico o un termofijo? ¿Por qué?
19.19 ¿Cómo se fabrican las fibras de polímeros? ¿Por qué son más resistentes que las formas volumétricas del polímero?
19.20 ¿Qué es la cabeza de hilar?
19.21 ¿Cuáles son las ventajas de la coextrusión?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

19.22 Describa las características de un extrusor de tornillo y sus funciones.
19.23 Explique por qué el moldeo por inyección tiene la capacidad de producir partes con formas complejas y detalles finos.
19.24 Describa las ventajas de aplicar las técnicas tradicionales de formado de metales que se describen en los capítulos 13 a 16 para formar *(a)* termoplásticos y *(b)* termofijos.
19.25 Explique las razones por las que algunos procesos de formado de plásticos son más adecuados para algunos polímeros que para otros.
19.26 Describa los problemas comprendidos en el reciclaje de productos fabricados con plásticos reforzados.
19.27 ¿Se pueden utilizar plásticos termofijos en el moldeo por inyección? Explique su respuesta.
19.28 Si revisa algunos contenedores de plástico, como los de talco en polvo, puede ver que las letras integrales de los mismos se encuentran realzadas y no hundidas. ¿Puede explicar por qué se moldean de esa manera?
19.29 Indique las medidas de precaución que se deben tomar en el moldeo de *(a)* plásticos reforzados y *(b)* otros compósitos.
19.30 Describa los factores que contribuyen al costo de cada proceso de formado y moldeo descrito en este capítulo.
19.31 Un engrane de nailon moldeado por inyección contiene poros pequeños. Se recomienda secar el material antes de moldearlo. Explique por qué el secado resuelve este problema.
19.32 Explique por qué operaciones como moldeo por soplado y fabricación de bolsas de película se realizan verticalmente. ¿Por qué el movimiento del material es hacia arriba?
19.33 Comente el principio de operación de la máquina de arreglo de cinta que se muestra en la figura 19.25b. ¿Cómo se justifica el costo de dicha máquina?
19.34 En la tabla 19.2 se dan los volúmenes característicos de producción. Comente sus observaciones y explique por qué existe esta variedad tan amplia.

19.35 ¿Qué determina el tiempo del ciclo para *(a)* el moldeo por inyección, *(b)* el termoformado y *(c)* el moldeo por compresión?
19.36 ¿El defecto de chupado (marcas de hundimiento) que se muestra en la figura 19.31c también ocurre en los procesos de formado y fundición de metales? Explique su respuesta.
19.37 Comente las diferencias que hay entre la sección del barril de un extrusor y la de una máquina de moldeo por inyección.
19.38 ¿Qué determina los periodos a los que gira la cabeza de indización de la figura 19.16c de estación a estación?
19.39 Identifique los procesos que son apropiados para fabricar pequeñas cantidades de partes de plástico, digamos 100 piezas.
19.40 Identifique los procesos que tienen la capacidad de producir partes con las siguientes orientaciones de fibras en cada una de ellas: *(a)* uniaxial, *(b)* de lámina cruzada, *(c)* aleatoria en el plano, y *(d)* aleatoria tridimensional.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

19.41 Estime la fuerza de cierre de la matriz requerida para el moldeo por inyección de cinco discos idénticos de 6 pulgadas de diámetro en una sola matriz. Incluya los canales de longitud y diámetro apropiados.
19.42 Una botella de plástico de dos litros para bebidas se fabrica con un parisón de diámetro igual al del cuello roscado de la botella y tiene 5 pulgadas de longitud. Si la deformación es uniforme durante el moldeo por soplado, estime el espesor de pared de la parte tubular del parisón.
19.43 Investigue varios equipos de deportes e identifique los componentes fabricados con materiales compósitos. Explique las razones y ventajas de utilizar compósitos para estas aplicaciones específicas.
19.44 Considere un vaso de poliestireno expandido. Mida su volumen y su peso. A partir de esta información, estime el aumento porcentual del volumen que experimentaron las perlas de poliestireno.
19.45 Durante el proceso de esterilización mediante el cual se producen bolsas intravenosas (IV) para aplicaciones médicas, las bolsas de polímero se someten a una presión interna de 30 psi. Si el diámetro de la bolsa es de 4 pulgadas y su forma puede ser como la de un recipiente cilíndrico a presión de pared delgada y de extremos cerrados, ¿cuál es el espesor de pared que garantizaría que la bolsa no se quemara durante la esterilización? Suponga que el esfuerzo de tensión permisible del polímero es de 10 ksi.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

19.46 Proporcione ejemplos de diversas partes adecuadas para moldeo con insertos. ¿Cómo manufacturaría estas partes si no existiera dicho moldeo?
19.47 Proporcione otros ejemplos de modificaciones de diseño adicionales a los mostrados en la figura 19.31.

19.48 Con ejemplos específicos, trate los aspectos de diseño comprendidos en la fabricación de productos de plástico, en comparación con los plásticos reforzados.

19.49 Inspeccione varios componentes de plástico en su auto e identifique los procesos que podrían haberse utilizado en su fabricación.

19.50 Explique las consideraciones de diseño comprendidas en el reemplazo de una lata de refresco metálica por una producida totalmente con plástico.

19.51 Inspeccione diversos productos similares que se fabriquen con metales o con plásticos, como una cubeta metálica y una de plástico, de forma y tamaño similares. Comente sus formas y espesores respectivos y explique las razones de sus diferencias, si existe alguna.

19.52 Haga un pequeño resumen de cómo se aplican los recubrimientos de plástico a: *(a)* el cableado eléctrico, *(b)* piezas de hojas metálicas, *(c)* canastillas, rejillas y estructuras similares de alambre, y *(d)* mangos de herramientas para electricistas, como cortadores y pinzas para cable que requieren aislamiento eléctrico.

19.53 Inspeccione diversos componentes eléctricos (como interruptores de luz, tomas y cortacircuitos) y describa los procesos utilizados en su fabricación.

19.54 Con base en experimentos, se ha sugerido que los polímeros (simples o reforzados) pueden ser un material apropiado para matrices en las operaciones de formado de láminas metálicas que se describen en el capítulo 16. Comente sus ideas sobre esta sugerencia, considerando la geometría de la matriz y otros factores que puedan ser relevantes.

19.55 Piense en partes de plástico que se fabrican utilizando dos o más de los procesos descritos en este capítulo.

19.56 Como sabemos, los tenedores, cucharas y cuchillos de plástico no son particularmente resistentes o rígidos. ¿Qué sugerencias tiene para producirlos mejor? Describa los procesos que podrían utilizarse para producirlos y comente los costos implícitos de producción.

19.57 Con el fin de facilitar la clasificación para el reciclaje, en la actualidad se identifican cada vez más rápidamente diversos productos de plástico con un símbolo triangular que tiene un número de un solo dígito en el centro y dos o más letras debajo de éste. Explique qué indican estos números y por qué se utilizan.

19.58 Explique las similitudes y diferencias entre los principios de diseño de productos de los procesos descritos en este capítulo y los de los capítulos de la parte III. Describa sus observaciones.

19.59 Investigue en la bibliografía técnica y describa cuántos diferentes tipos de *(a)* neumáticos, *(b)* mangueras automotrices y *(c)* mangueras para jardín se fabrican.

19.60 Consiga un juego de piezas (kit) para ensamblar un modelo de automóvil o avión. Examine las partes moldeadas por inyección incorporadas en el juego y describa lo que piensa sobre el arreglo de los moldes para producir estas partes.

19.61 Consiga la siguiente información en Internet:

- **a.** Costo de las perlas de poliestireno y los pellets de polietileno.
- **b.** Propiedades de fusión (como temperaturas de transición de vidrio y de fusión) de los plásticos.
- **c.** Disponibilidad de aditivos para polímeros, como agentes colorantes y aditivos con propiedades de flujo.
- **d.** Tamaños, características y costos de las máquinas de moldeo por inyección.

19.62 En las operaciones de moldeo por inyección, es práctica común extraer la parte de su canal, colocar éste en una trituradora y reciclarlo produciendo pellets. Describa los problemas que podría tener al usar dichos pellets (partículas recicladas para productos) en comparación con pellets "vírgenes".

19.63 Un problema ambiental creciente es el largo periodo que se requiere para la degradación de los polímeros en los tiraderos de basura. Considerando la información proporcionada en la sección 7.8 sobre los plásticos biodegradables, investigue en la bibliografía sobre las tendencias y desarrollos en la producción de estos plásticos.

19.64 Inspeccione algunas laminillas de persianas de plástico y describa sus ideas sobre cómo producirlas. Compárelas con las laminillas metálicas y comente sus secciones transversales, curvatura y características de comportamiento.

19.65 La dilatación de la matriz en la extrusión es radialmente uniforme para secciones transversales circulares, pero no para otras secciones transversales, como se muestra en la figura 19.3b a la d. Reconociendo esto, haga un esquema cualitativo del perfil de una matriz que produzca secciones transversales con forma *(a)* triangular y *(b)* de engrane de plásticos extruidos.

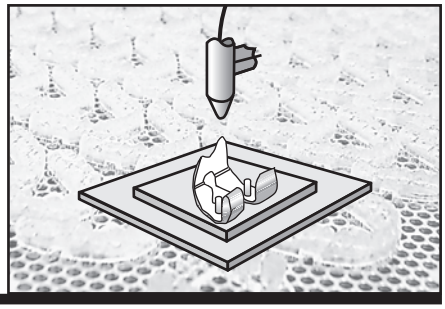
19.66 Examine algunas fichas comunes para póquer de plástico y opine sobre cómo se fabricaron.

19.67 Inspeccione diversos productos de plástico en su casa y observe las marcas de hundimiento (ver fig. 19.31c) que generalmente se presentan en la superficie contraria a las secciones gruesas. Dé sugerencias de cómo se pueden evitar durante *(a)* el diseño del producto y *(b)* la fabricación.

19.68 Consiga diferentes tipos de tubos de pasta de dientes, córtelos cuidadosamente y comente sus observaciones en relación con el tipo de materiales utilizados y cómo se puede producir el tubo.

CAPÍTULO

20 Operaciones de producción de prototipos rápidos



20.1 Introducción 580
20.2 Procesos sustractivos 582
20.3 Procesos aditivos 583
20.4 Producción de prototipos virtuales 594
20.5 Manufactura directa y fabricación rápida de herramentales 594

EJEMPLOS:

20.1 Diseño de ratón (*mouse*) para computadoras 587
20.2 Accesorios de fuselaje para helicópteros 590
20.3 Cubierta de motor para limpiaparabrisas trasero automotriz 598

ESTUDIO DE CASO:

20.1 Alineadores ortodóncicos Invisalign 595

En este capítulo se describen las tecnologías asociadas con la producción de prototipos rápidos, los cuales comparten características como la integración por computadora, la producción sin herramentales ni matrices o dados tradicionales y la capacidad de producir rápidamente una parte simple por pedido. Los temas incluidos son:

- Principios de los procesos que utilizan polímeros, cerámicos y metales como materias primas.
- Aplicaciones únicas de estas operaciones.
- Producción rápida de herramentales para la fabricación de moldes y diversas herramientas.
- Producción de partes de ingeniería mediante manufactura rápida.

Partes típicamente producidas: una amplia variedad de componentes para diseño y evaluación de productos, herramentales y productos terminados en cantidades limitadas para aplicaciones industriales y médicas.

Procesos alternativos: maquinado y fabricación.

20.1 Introducción

En el desarrollo de un nuevo producto existe la necesidad invariable de producir un ejemplo único, o **prototipo,** de la parte (o sistema) diseñada, antes de asignar grandes cantidades de capital para nuevas instalaciones de producción o líneas de ensamble. Las razones principales de esta necesidad son el costo del capital, que es muy alto, y el tiempo que tarda el preparar los herramentales de producción. Por lo tanto, se requiere un prototipo de trabajo para evaluar el diseño y resolver problemas antes de que un producto o sistema complejo quede listo para su producción y comercialización.

En la figura I.4 de la Introducción General se esquematizó un proceso común de desarrollo de productos. Un proceso iterativo ocurre de manera natural cuando *(a)* se descubren errores, o *(b)* se obtienen soluciones de diseño mejores o más eficientes a partir del estudio de un prototipo. Sin embargo, el problema principal de este enfoque es que la producción de un prototipo puede consumir demasiado tiempo; la preparación de los herramentales puede llevar muchos meses y la fabricación de una sola parte complicada mediante operaciones de manufactura convencionales puede ser muy difícil. Además, mientras se prepara el prototipo, las instalaciones y el personal siguen generando costos.

Un problema aún más importante es la velocidad a la que un producto pasa de ser un concepto a convertirse en un artículo listo para su comercialización. En un mercado competitivo, es bien sabido que por lo general los productos que se introducen antes que

los de los competidores son más redituables y gozan de una mayor participación en el mercado. Al mismo tiempo, existen inquietudes respecto de la fabricación de productos de alta calidad. Por estas razones, existe una fuerte preocupación por situar dichos productos en el mercado lo más rápidamente posible.

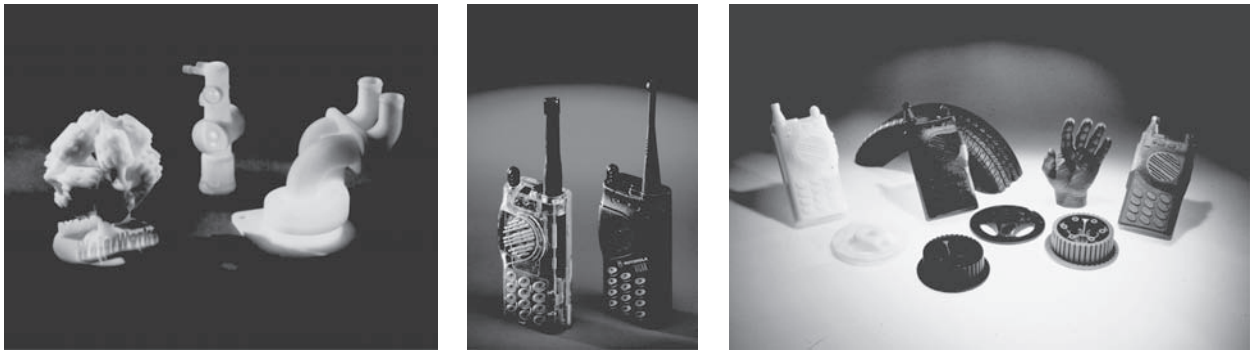
Una tecnología que acelera en gran medida el proceso iterativo de desarrollo de productos es la **producción rápida de prototipos** (RP, por sus siglas en inglés), también conocida como **producción de prototipos rápidos** o **fabricación de sólidos de forma libre**. En la figura 20.1 se muestran ejemplos de partes manufacturadas mediante este proceso.

A mediados de la década de 1980 empezó el desarrollo de la producción de prototipos rápidos. Las ventajas de esta tecnología son las siguientes:

- Se pueden manufacturar modelos físicos de partes a partir de archivos de datos CAD en cuestión de horas, lo que permite evaluar con rapidez la capacidad de manufactura y la eficacia del diseño. De esta manera, la producción de prototipos rápidos sirve como una herramienta importante para visualizar y verificar conceptos.
- Con los materiales adecuados, el prototipo se puede utilizar en operaciones de manufactura posteriores para producir las partes finales. De esta manera, la producción de prototipos rápidos también sirve como una importante tecnología de manufactura.
- Las operaciones de producción de prototipos rápidos pueden utilizarse con el propósito de fabricar herramentales reales para operaciones de manufactura (**fabricación rápida de herramentales**). De esta manera es posible obtener herramentales en cuestión de días.

Los procesos de producción de prototipos rápidos se pueden clasificar en tres grupos principales: **sustractivo**, **aditivo** y **virtual**. Como sus nombres lo indican, los procesos sustractivos comprenden la eliminación paulatina de material de una pieza de trabajo hasta alcanzar el resultado final. Por el contrario, en los procesos aditivos se agrega material en forma progresiva hasta producir la parte. Los procesos virtuales utilizan tecnologías de visualización por computadora.

Casi todos los materiales se pueden utilizar en una o más operaciones de producción de prototipos rápidos, como se resume en la tabla 20.1; sin embargo, debido a que sus propiedades son las más adecuadas para este tipo de operaciones, los polímeros son el material más usado hoy en día, seguidos de los cerámicos y los metales. A pesar de ello, constantemente se introducen nuevos procesos, con lo que se mejoran los procesos y materiales existentes. En la tabla 20.2 se resumen los materiales que más se utilizan en las operaciones de producción de prototipos rápidos. En este capítulo se pretende dar una introducción general sobre dichas operaciones, describir sus ventajas y limitaciones y explorar las aplicaciones actuales y futuras de estos procesos.



(a) (b) (c)

FIGURA 20.1 Ejemplos de piezas fabricadas mediante procesos de producción de prototipos rápidos: *(a)* selección de piezas de modelado por deposición de material fundido; *(b)* modelo de estereolitografía de teléfono celular, y *(c)* selección de piezas de impresión tridimensional. *Fuente*: *(a)* Cortesía de Stratasys, Inc. *(b)* y *(c)* Cortesía de 3D Systems, Inc.

TABLA 20.1

Características de las tecnologías de producción aditiva de prototipos rápidos

Fase del suministro	Proceso	Técnica de creación de capas	Tipo de cambio de fase	Materiales
Líquida	Estereolitografía	Curado líquido de capas	Fotopolimerización	Fotopolímeros (como a crílicos, epóxicas, resinas de color y resinas rellenas)
	Moldeo por deposición fundida	Extrusión de polímero fundido	Solidificación por enfriamiento	Polímeros (como ABS y poliacrilato), cera, polvos metálicos y cerámicos con aglutinante
	Manufactura mediante partículas balísticas	Deposición de gotas	Solidificación por enfriamiento	Polímeros y cera
Polvo	Impresión tridimensional	Capa de polvo y deposición de gotas de aglutinante	Sin cambio de fase	Cerámicos, polímeros, polvos metálicos y arena
	Sinterización láser selectiva[a]	Capa de polvo	Sinterización activada por láser y solidificación	Polímeros, metales con aglutinante, metales, cerámicos y arena con aglutinante
Sólida	Manufactura de objetos laminados	Deposición de material laminado	Sin cambio de fase	Papel y polímeros

[a] Algunos sistemas selectivos de sinterizado con láser se venden bajo la marca comercial Three-Dimensional Printers.

TABLA 20.2

Propiedades mecánicas de materiales seleccionados para producción de prototipos rápidos

Proceso	Material	Resistencia a la tensión (MPa)	Módulo elástico (GPa)	Elongación 50 mm (%)
Estereolitografía	SL 5180[a]	55–65	2.4–2.6	6–11
	SL 5195[a]	46.5	2.1	11
	SL 5510[b]	73	2.8	7.9
	SL 7940[b]	37–39	1.3	18–21
Modelado por deposición de material fundido	Policarbonato	62	—	100
	ABS	35	2.5	50
Sinterización láser selectiva	Nailon	36	1.4	32
	Policarbonato	23.4	1.2	5
	poliamida	44	1.6	9
	SOMOS 201	17.3	14	130
	ST-100[c]	305	137	10
Impresión tridimensional	Acero inoxidable S3	406	148	8.00
	Acero inoxidable S4	682	147	8.00

[a] Después de un curado con UV de 90 minutos; [b] después de un curado con UV de 90 minutos a 80 °C; [c] polvo de acero sinterizado con infiltración de bronce.

20.2 Procesos sustractivos

Tradicionalmente, fabricar un prototipo ha comprendido una serie de procesos mediante una variedad de herramentales y máquinas que, por lo general, requieren desde semanas hasta meses, lo que depende de la complejidad y el tamaño de la parte. Este método exige operadores capacitados que *remuevan material por medio de las operaciones de*

maquinado y acabado (como se describe al detalle en la parte IV), una por una, hasta concluir el prototipo. Para acelerar esta labor, los procesos sustractivos emplean cada vez más tecnologías asistidas por computadora, como las siguientes:

- **Paquetes de dibujo asistidos por computadora,** que pueden producir representaciones tridimensionales de las partes.
- **Programas (*software*) de interpretación,** que pueden traducir el archivo CAD a un formato utilizable por programas de manufactura.
- **Programas (*software*) de manufactura,** que tienen la capacidad de planear las operaciones requeridas para producir la forma deseada.
- **Maquinaria de control numérico por computadora,** con las capacidades necesarias para producir las partes.

Cuando se requiere un prototipo sólo para examinar formas, se utiliza un material blando (por lo regular un polímero o cera) como pieza de trabajo para reducir o evitar cualquier dificultad de maquinado. El material que se pretenda usar en la aplicación real también puede maquinarse, pero esta operación consumiría más tiempo, dependiendo de la maquinabilidad del mismo. Según la complejidad de la parte y las capacidades de maquinado, es posible producir prototipos en cuestión de días o de algunas semanas. Los sistemas sustractivos pueden adquirir muchas formas; son similares en cuanto a las celdas de manufactura descritas en la sección 39.2. Pueden participar operadores o no, aunque el manejo de las partes por lo general es una tarea humana.

20.3 Procesos aditivos

Todas las operaciones de producción de prototipos rápidos aditivos forman las piezas en *capas*; como se resume en la tabla 20.1, consisten en *estereolitografía, modelado por deposición de material fundido, manufactura de partículas balísticas, impresión tridimensional, sinterización láser selectiva* y *manufactura de objetos laminados*. Para visualizar la metodología utilizada piénsese en el pan de caja, con las rebanadas individuales colocadas una encima de la otra. Todos los procesos descritos en esta sección *construyen partes, rebanada por rebanada.* La diferencia principal entre ellos estriba en el método de producción de las rebanadas individuales, que por lo general son de 0.1 mm a 0.5 mm (0.004 a 0.020 pulgada) de espesor y pueden ser más gruesas en algunos sistemas.

Todas las operaciones aditivas requieren software sofisticado. Como ejemplo, obsérvese la parte sólida mostrada en la figura 20.2a. El primer paso es obtener una descripción del archivo CAD de la pieza. Luego la computadora construye rebanadas de la parte tridimensional (fig. 20.2b). Cada rebanada se analiza por separado y se compila una serie de instrucciones, a fin de proporcionar a la máquina de producción de prototipos rápidos información detallada sobre la manufactura de la parte. La figura 20.2d muestra las trayectorias del extrusor en una rebanada, utilizando la operación de modelado por deposición de material fundido que se describe en la sección 20.3.1.

Este método requiere la participación del operador en la instalación de los archivos adecuados en la computadora y en el inicio del proceso de producción. Luego de esta etapa, por lo general, las máquinas operan sin necesidad de supervisión y después de unas cuantas horas proveen una parte aproximada. Ésta se somete entonces a una serie de operaciones manuales de acabado (como lijado y pintado) para completar el proceso de producción de prototipos rápidos.

Debe reconocerse que las operaciones de configuración y acabado son muy intensas en cuestión de mano de obra y que el tiempo de producción sólo es una fracción del tiempo requerido para obtener un prototipo. Sin embargo, en general, los procesos aditivos son mucho más rápidos que los procesos sustractivos, ya que sólo requieren desde unos pocos minutos hasta unas cuantas horas para producir una parte.

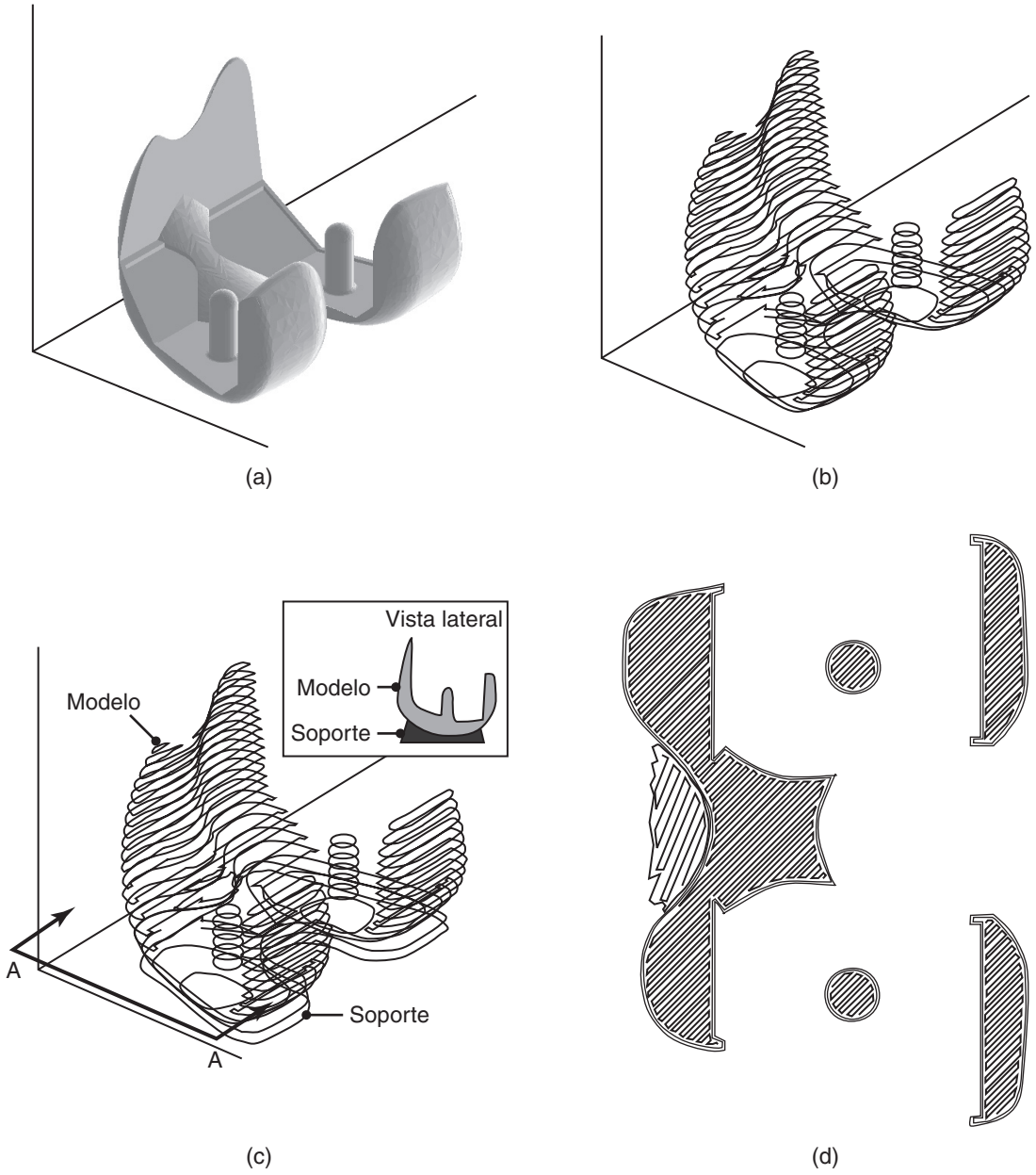


FIGURA 20.2 Pasos computacionales en la producción de un archivo de estereolitografía. *(a)* Descripción tridimensional de la pieza. *(b)* La pieza se divide en rebanadas (sólo se muestra una de 10). *(c)* Se planea el material de soporte. *(d)* Se determina un conjunto de direcciones de herramientas para manufacturar cada rebanada. También se muestra la trayectoria del extrusor en la sección A-A a partir de *(c)* para una operación de modelado por deposición de material fundido.

20.3.1 Modelado por deposición de material fundido

En el proceso de *modelado por deposición de material fundido* (FDM, por sus siglas en inglés), (fig. 20.3), una cabeza extrusora controlada por un robot tipo *gantry* (colgado en un puente o sobre rieles) se mueve en dos direcciones principales sobre una mesa; ésta se puede subir o bajar, según se requiera. Se extruye un filamento termoplástico o de cera a través del pequeño orificio de la matriz caliente. La capa inicial se coloca sobre una base

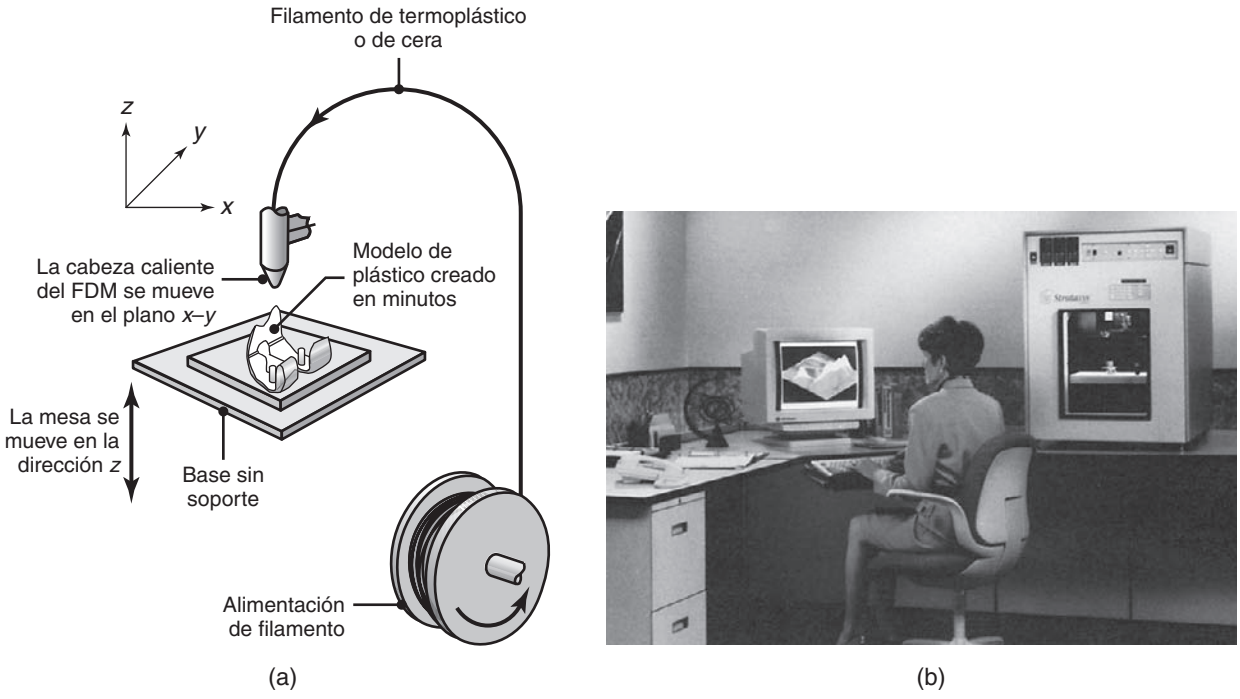


FIGURA 20.3 *(a)* Esquema del proceso de modelado por deposición de material fundido. *(b)* FDM 5000, máquina de modelado por deposición de material fundido. *Fuente*: Cortesía de Stratysis, Inc.

de espuma, extruyendo el filamento a una velocidad constante, mientras que la cabeza del extrusor sigue una trayectoria predeterminada (ver fig. 20.2d). Al concluir la primera capa, la tabla se baja, de manera que se puedan sobreponer capas adicionales.

En ocasiones se requieren partes complicadas, como la que se muestra en la figura 20.4a. Esta pieza es difícil de manufacturar directamente porque, una vez construida hasta una altura *a*, la siguiente rebanada requeriría colocar el filamento en un lugar que no tiene material debajo de él para sostenerlo. La solución es extruir un material de soporte aparte del material de modelado, como se muestra en la figura 20.4b. Obsérvese que el uso de dichas estructuras de soporte permite apoyar todas las capas que se van a extruir directamente sobre el material que se encuentra debajo de ellas. El material de soporte se produce con capas cuyo espaciado resulta menos denso que el filamento, de manera que es más débil que el material del modelo y se puede romper con facilidad después de terminar la parte.

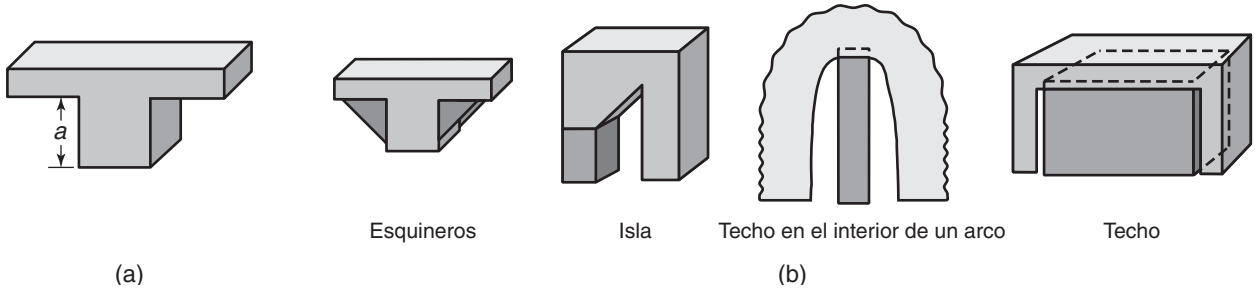


FIGURA 20.4 *(a)* Pieza con una sección protuberante que requiere material de soporte. *(b)* Estructuras comunes de soporte utilizadas en máquinas de producción de prototipos rápidos. *Fuente*: P. F. Jacobs, *Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolitography.* Society of Manufacturing Engineers, 1992.

Las capas en una máquina de FDM están determinadas por el diámetro de la matriz o dado del extrusor, que por lo general va de 0.50 mm a 0.25 mm (0.02 a 0.01 pulgada). Este espesor representa la mejor tolerancia obtenible en la dirección vertical. En el plano *x-y*, la precisión dimensional puede ser tan fina como 0.025 mm (0.001 pulgada), siempre que el filamento se pueda extruir conforme a las características. Existe una gran variedad de polímeros y ceras para diferentes aplicaciones.

La inspección minuciosa de una parte producida mediante FDM indica que existe una superficie escalonada en los planos exteriores oblicuos. Si esta rugosidad o acabado superficial es objetable, se puede utilizar una herramienta caliente para suavizar la superficie o aplicar un recubrimiento (con frecuencia en forma de cera pulidora). Sin embargo, así se comprometen las tolerancias generales, a menos que se tenga cuidado en estas operaciones de acabado.

Aunque algunas máquinas de FDM se pueden conseguir desde $30,000 dólares, otras llegan a costar hasta 150,000 dólares. La principal diferencia entre ellas es el tamaño máximo de las partes que pueden producir.

20.3.2 Estereolitografía

Un proceso muy común de producción de prototipos rápidos, que en realidad se desarrolló antes del modelado por deposición de material fundido, es la *estereolitografía* (SLA, por sus siglas en inglés). Este proceso (fig. 20.5) se basa en el principio de *curado* (endurecimiento) de un polímero líquido que, al hacerlo, adquiere una forma específica. Un depósito que contiene un mecanismo por el cual se puede subir o bajar una plataforma se llena con un polímero fotocurable de acrilato líquido. El líquido es una mezcla de monómeros de acrílico, oligómeros (polímeros intermedios) y un fotoiniciador (compuesto que experimenta una reacción al absorber luz).

En su posición más alta (profundidad *a* en la fig. 20.5), existe una capa poco profunda de líquido arriba de la plataforma. Un *láser* que genera un rayo ultravioleta se concentra en un área superficial seleccionada del fotopolímero y luego se mueve alrededor en el plano *x-y*. El rayo cura dicha parte del fotopolímero (digamos, una pieza en forma de anillo) y produce así un cuerpo sólido. Después la plataforma se baja lo suficiente para cubrir el polímero curado con otra capa de polímero líquido y la secuencia se produce de nuevo. El proceso se repite hasta llegar al nivel *b* en la figura 20.5. Hasta ahora lo que se ha generado es una parte cilíndrica con un espesor constante de pared. Obsérvese que en este momento la plataforma baja una distancia vertical *ab*.

En el nivel *b*, los movimientos del rayo sobre *x-y* definen una geometría más amplia, de manera que ahora se tiene una parte en forma de reborde que se está produciendo

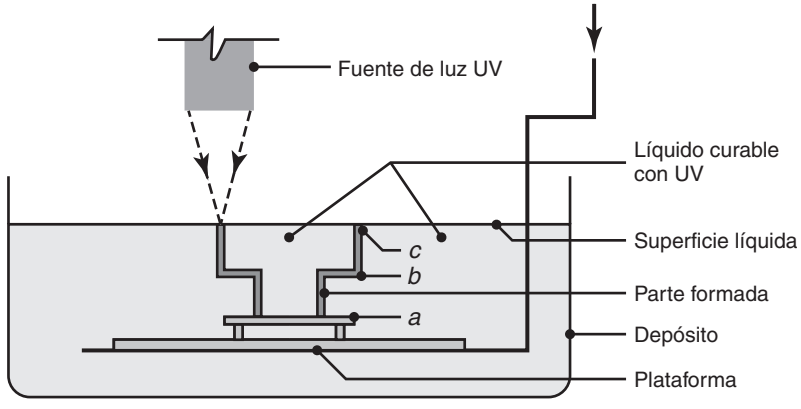


FIGURA 20.5 Esquema del proceso de estereolitografía.

sobre la parte previamente formada. Después de curar el espesor adecuado del líquido, el proceso se repite, produciendo otra sección cilíndrica entre los niveles *b* y *c*. Obsérvese que el polímero líquido circundante sigue siendo fluido (porque no se ha expuesto al rayo ultravioleta) y que la parte se ha producido desde el fondo hacia arriba en rebanadas individuales. La porción no utilizada del polímero líquido se puede usar de nuevo para fabricar otra parte u otro prototipo.

Nótese que el término estereolitografía, utilizado para describir este proceso, proviene del hecho de que los movimientos son tridimensionales y el proceso es similar al de la litografía (ver la sección 28.7), en la que la imagen a imprimir en una superficie plana es receptora de tinta y las áreas en blanco son repelentes de tinta. Obsérvese también que, como el FDM, la estereolitografía puede usar un material de soporte más débil, aunque aquí este soporte tiene forma de estructuras perforadas. Después de concluir la parte, se extrae de la plataforma, se bloquea con tinta y se limpia de manera ultrasónica y con un baño de alcohol. Luego se retira la estructura de soporte y la parte se somete a un ciclo final de curado en un horno. La tolerancia más pequeña que se puede obtener con la estereolitografía depende de la agudeza del foco del láser; por lo general, es de 0.0125 mm (0.0005 pulgada). Las superficies oblicuas también pueden ser de muy alta calidad.

Para acelerar la producción, se pueden fabricar partes sólidas aplicando patrones especiales de barrido láser. Por ejemplo, al espaciar líneas de barrido en la estereolitografía, es posible formar volúmenes o cavidades de polímero sin curar en el interior de cubiertas ya curadas. Después, cuando la parte se coloca en un horno de procesamiento posterior, las cavidades se curan y se forma la parte sólida. De manera similar, las partes a fundir por revestimiento tienen una estructura de panal que puede drenarse, lo que permite que una fracción significativa de la pieza permanezca sin curar.

Los tiempos totales del ciclo en la estereolitografía van desde unas cuantas horas hasta un día, sin procesamiento posterior, como lijado y pintado. Dependiendo de su capacidad, el costo de las máquinas va de $100,000 a $400,000 dólares. El polímero líquido cuesta alrededor de $300 dólares por galón. El tamaño máximo de la parte que se puede producir es de 0.5 m × 0.5 m × 0.6 m (19 pulgadas × 19 pulgadas × 24 pulgadas).

La estereolitografía se ha utilizado con rayos láser altamente concentrados para producir partes con características de tamaños micrométricos. El uso de la óptica requerida para obtener dichas características necesita capas más delgadas y una rapidez más baja de curado volumétrico. Sin embargo, este proceso se ha empleado para fabricar sistemas micromecánicos (ver el capítulo 29) y en esos casos se conoce como **microestereolitografía.**

EJEMPLO 20.1 Diseño de ratón (*mouse*) para computadora

Cuando un importante fabricante de computadoras (y cliente potencial) se puso en contacto con Logitech Company, ésta preparó una cotización para construir en dos semanas un ratón (*mouse*) con dos botones para computadora de diseño único (fig. 20.6). La estereolitografía se empleó de manera eficaz en el marco de la ingeniería concurrente (ver la sección I.3 de la Introducción General). El cliente proporcionó a Logitech los planos de control del nuevo *mouse* y el desarrollo mediante ingeniería concurrente se efectuó con dos equipos de diseño: uno de ingeniería eléctrica, que hacía énfasis en los circuitos de control, y otro de ingeniería mecánica, que destacaba el diseño de la cubierta y la geometría de los botones.

El primer día, ambos equipos de ingeniería empezaron su trabajo de diseño. Durante la noche, la máquina de estereolitografía produjo el primer prototipo de botón del *mouse*. El trabajo de diseño de la parte superior del *mouse* y del complicado mecanismo del botón se concluyó durante el segundo día; las partes se enviaron a la má-



FIGURA 20.6 Ratón (*mouse*) de dos botones para computadora. *Fuente*: Cortesía de 3D Systems, Inc.

quina de estereolitografía y se terminó antes de que acabara el tercer día. Para entonces ya se habían construido tarjetas de circuitos prototipo completas y estaban listas para ensamblarse en el prototipo. El tiempo total transcurrido entre el lanzamiento y la conclusión del prototipo funcional fue de siete días. La compañía pudo mostrar el diseño con prototipos de trabajo dentro del plazo de vencimiento de las dos semanas; actualmente embarca alrededor de un millón de unidades cada año al fabricante de computadoras.

Fuente: Cortesía de Logitech y 3D Systems, Inc.

20.3.3 Sinterización láser selectiva

La *sinterización láser selectiva* (SLS, por sus siglas en inglés) es un proceso que se basa en la sinterización de polvos no metálicos o (menos común) metálicos, como un objeto individual. Las máquinas de sinterización láser selectiva que 3D Systems comercializa se conocen como **impresoras tridimensionales**, aunque este término se ha asociado históricamente con la manufactura de partículas balísticas (sección 20.3.4). En la figura 20.7 se muestran los elementos básicos de este proceso. El fondo de la cámara de procesamiento está equipado con dos cilindros:

1. Un cilindro de alimentación de polvo, que se eleva progresivamente para suministrar polvo al cilindro de la parte construida mediante un mecanismo de rodillo.
2. Un cilindro de la parte construida, que baja progresivamente conforme se forma la parte.

Primero se deposita una capa delgada de polvo en el cilindro de la parte construida. Después se enfoca sobre dicha capa un rayo láser guiado por una computadora de control de proceso según las instrucciones que genera el programa tridimensional de CAD de la parte deseada, trazando y sinterizando una sección transversal en particular como masa sólida. El polvo en las otras áreas permanece suelto, aunque soporte la parte sinterizada. Después se deposita otra capa de polvo; este ciclo se repite una y otra vez hasta que se produce toda la parte tridimensional. Las partículas sueltas se sacuden y se recu-

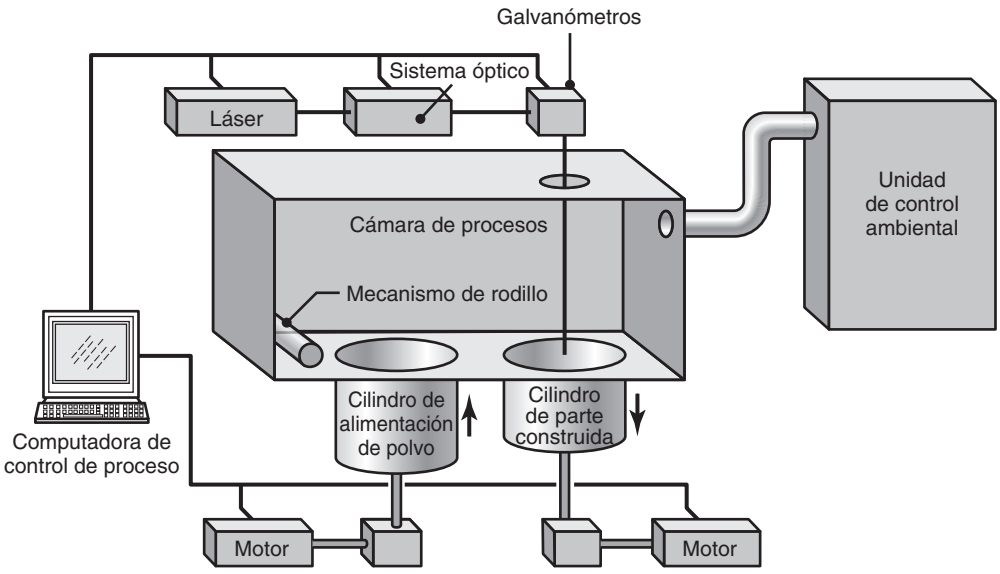


FIGURA 20.7 Esquema del proceso de sinterizado láser selectivo. *Fuente*: C. Deckard y P. F. McClure.

pera la parte. Ésta ya no requiere curado adicional, a menos que sea un cerámico que deba someterse a cocción para desarrollar resistencia.

En este proceso se pueden utilizar varios materiales, incluyendo polímeros (como ABS, PVC, nailon, poliéster, poliestireno y epóxica), cera, metales y cerámicos con los aglutinantes apropiados. Lo más común es usar polímeros, debido a que el láser que se requiere para la sinterización es más pequeño, menos costoso y menos complicado. Con los cerámicos y los metales suele sinterizarse sólo un aglutinante de polímero, mezclado con los polvos de esos elementos.

20.3.4 Manufactura de partículas balísticas

En el proceso de *manufactura de partículas balísticas*, se expulsa un chorro de material (plástico, cerámico, metal o cera) a través de un pequeño orificio en una superficie (el blanco) mediante un mecanismo tipo chorro de tinta. Este mecanismo utiliza una bomba piezoeléctrica que opera cuando se aplica una carga eléctrica, generando una onda de choque que expulsa gotas de 50 μm a razón de 10,000 por segundo. La operación se repite de manera similar en otros procesos para formar la parte mediante capas depositadas una sobre otra. Un robot de tres ejes guía la cabeza del chorro de tinta.

La **impresión tridimensional** (3DP, por sus siglas en inglés) se relaciona con la manufactura de partículas balísticas, excepto porque en vez de depositar el material del prototipo, la cabeza de impresión deposita un material aglutinante inorgánico. Éste (pegamento o adhesivo) representa las partículas balísticas y es dirigido sobre una capa de polvos cerámicos o metálicos, como se muestra en la figura 20.8. Un pistón (que soporta la cama de polvo) se baja de manera progresiva. Con cada paso se deposita una capa, que se une por medio del aglutinante. Los materiales en polvo comúnmente utilizados son óxido de aluminio, carburo de silicio y zirconia.

Una pieza que se produce con frecuencia por 3DP es un cascarón cerámico vaciado (ver la sección 11.2), en el que se funde polvo de óxido de aluminio o aluminio-sílice con un aglutinante de sílice. Los moldes se tienen que procesar después en dos pasos: (1) curado a unos 150 °C (300 °F), y (2) cocción de 1000 °C a 1500 °C (1840 °F a 2740 °F).

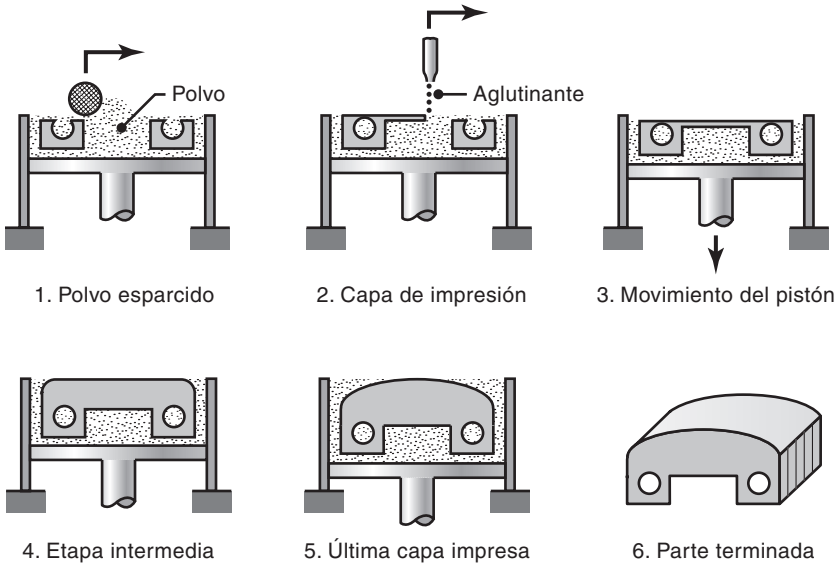


FIGURA 20.8 Esquema del proceso de impresión tridimensional. *Fuente*: E. Sachs y M. Cima.

Las partes producidas mediante 3DP son un tanto porosas y, por lo tanto, pueden carecer de resistencia. Es posible combinar la impresión tridimensional con sinterización e infiltración metálica para fabricar partes totalmente densas que utilicen la secuencia mostrada en la figura 20.9. Aquí se produce la parte (como antes) dirigiendo un aglutinante sobre los polvos, pero después se sigue la secuencia de construcción mediante sinterización, quemando el aglutinante y fundiendo de modo parcial los polvos metálicos, justo como sucede en el moldeo por inyección de metales que se describe en la sección 17.3. Los materiales comunes usados en 3DP son aceros inoxidables, aluminio, titanio y dióxido de silicio.

Para partes metálicas, se puede seguir la sinterización por infiltración de un metal con punto de fusión bajo a fin de producir partes totalmente densas; este método representa una estrategia eficaz para la *fabricación rápida de herramentales* (ver la sección 20.5). Los materiales comunes de infiltración son cobre y bronce, que proporcionan buenas capacidades de transferencia de calor y resistencia al desgaste.

EJEMPLO 20.2 Accesorios de fuselaje para helicópteros

Sikorsky Aircraft Company necesitaba producir una cantidad limitada de accesorios para fuselaje, los cuales se muestran en la figura 20.10a. Sikorsky quería producir las matrices o dados para el forjado por medio de tecnologías de impresión tridimensional. Se diseñó una matriz utilizando la descripción en CAD de la pieza. Se incorporaron las tolerancias de forja y se acomodaron las rebabas mediante el diseño del dado.

Los dados se imprimieron mediante una impresora tridimensional producida por ProMetal; se muestran en la figura 20.10b. Se fabricaron produciendo capas de 0.178 mm (0.007 pulgada) con polvo de acero inoxidable como medio de la pieza de trabajo. El tiempo total invertido en la máquina de 3DP fue menor a 45 horas. Después se

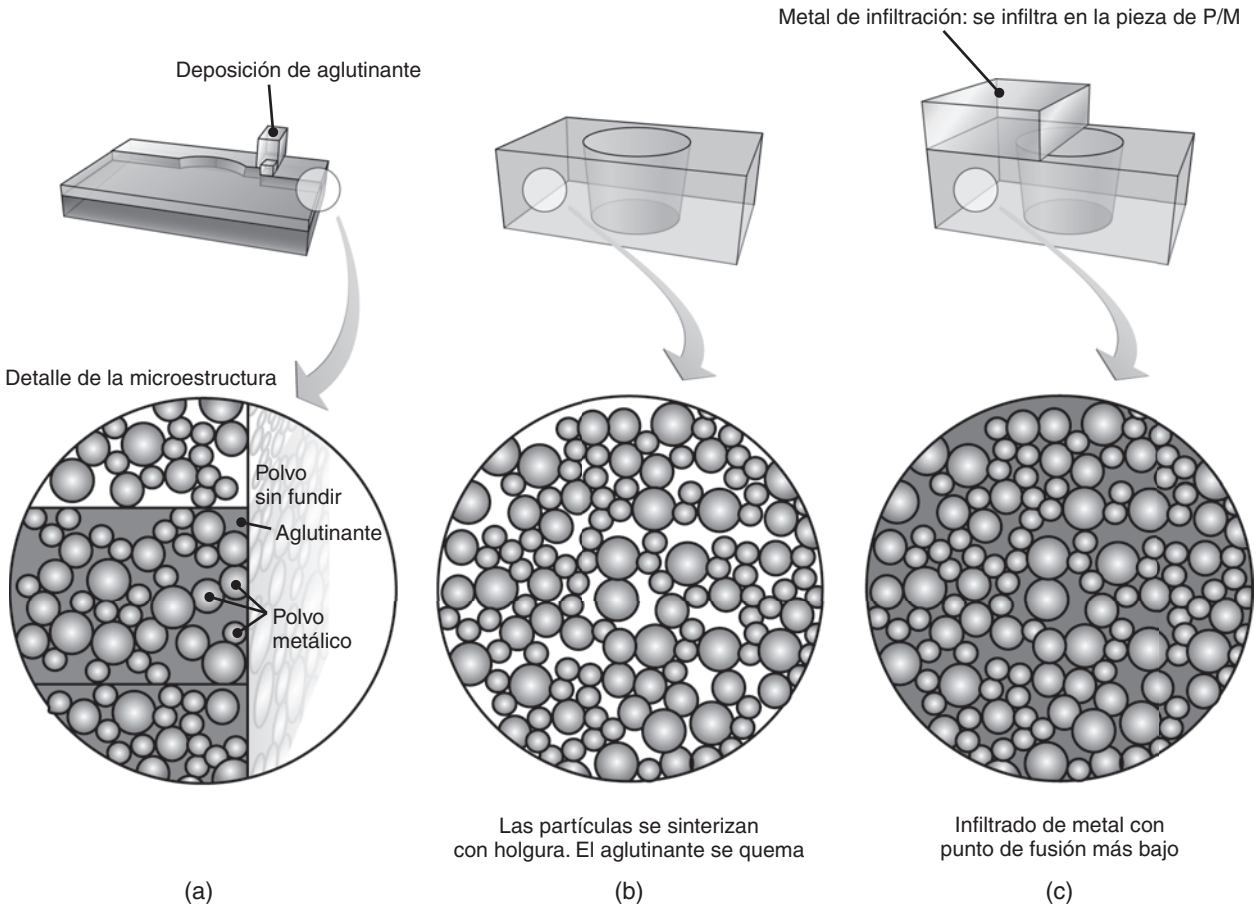


FIGURA 20.9 Impresión tridimensional que utiliza los pasos de: *(a)* construcción de la pieza, *(b)* sinterizado, y *(c)* infiltración, para producir piezas metálicas. *(d)* Ejemplo de parte de acero inoxidable con infiltrado de bronce producida por medio de impresión tridimensional. *Fuente*: Cortesía de ProMetal Division de Ex One Corporation.

realizaron el curado del aglutinante (10 horas, más cinco horas de enfriamiento), la sinterización (40 horas, más 17 horas de enfriamiento) y la infiltración (27 horas, más 15 horas de enfriamiento). Los dados fueron entonces terminados y posicionados en un portadados o sujetador de dados y la pieza se forjó en una prensa hidráulica de 800 toneladas con una temperatura en el dado de casi 300 °C. En la figura 20.10c se muestra una pieza tal como sale del forjado; requiere recorte de las rebabas antes de que se pueda utilizar. Los dados fueron producidos en unos seis días, en comparación con los muchos meses que se necesitan para la producción convencional de una matriz.

Fuente: Cortesía de ProMetal Division de Ex One Corporation.

20.3.5 Manufactura de objetos laminados y curado de base sólida

En la industria existen tecnologías adicionales para producir partes por medio de operaciones aditivas de producción de prototipos rápidos, pero son menos comunes que los procesos descritos hasta ahora. A continuación se presentan tres de las más importantes.

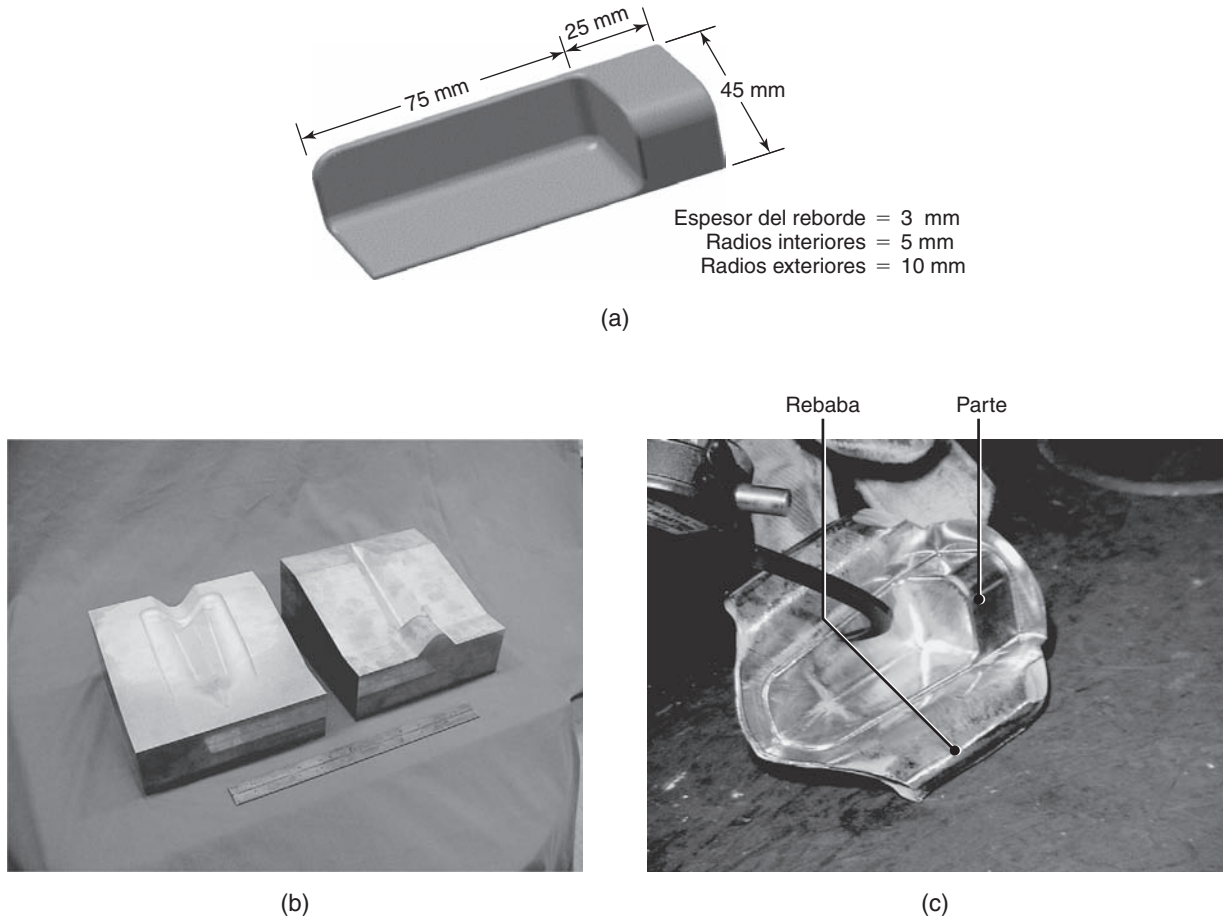


FIGURA 20.10 Accesorio requerido para un fuselaje de helicóptero. *(a)* Representación en CAD con dimensiones adicionadas. *(b)* Dados o matrices producidos por impresión tridimensional. *(c)* Pieza final forjada. *Fuente*: Cortesía de ProMetal Division de Ex One Corporation.

Manufactura de objetos laminados. La laminación implica un asentamiento de las capas que se unen con adhesivo. La *manufactura de objetos laminados* (LOM, por sus siglas en inglés) utiliza capas de papel o láminas de plástico con un pegamento que se activa térmicamente de un lado para producir partes. Las formas deseadas se queman dentro de la lámina con un láser y las partes se construyen capa por capa (fig. 20.11). Una vez que se concluye la parte, debe retirarse manualmente el exceso de material. Este proceso se simplifica programando el láser para quemar perforaciones en patrones cruzados. Las líneas de las rejillas resultantes hacen que la parte parezca haberse construido con papel cuadriculado (con cuadros impresos en ellas, similares al papel milimétrico).

Curado de base sólida. Este proceso es único, porque todas las *rebanadas* de una parte se fabrican a la vez. El resultado es que se obtiene una gran producción, en comparación con la de los demás procesos de producción de prototipos rápidos. Sin embargo, el *curado de base sólida* (SGC, por sus siglas en inglés) se encuentra entre los procesos más costosos, por lo que su adopción ha sido menos común y no existen máquinas nuevas.

El método básico consta de los siguientes pasos:

1. Una vez que se crea una rebanada con el programa de la computadora, se imprime una máscara de ella sobre una lámina de vidrio, utilizando un proceso de impresión electrostática similar al empleado en las impresoras láser. Se requiere una

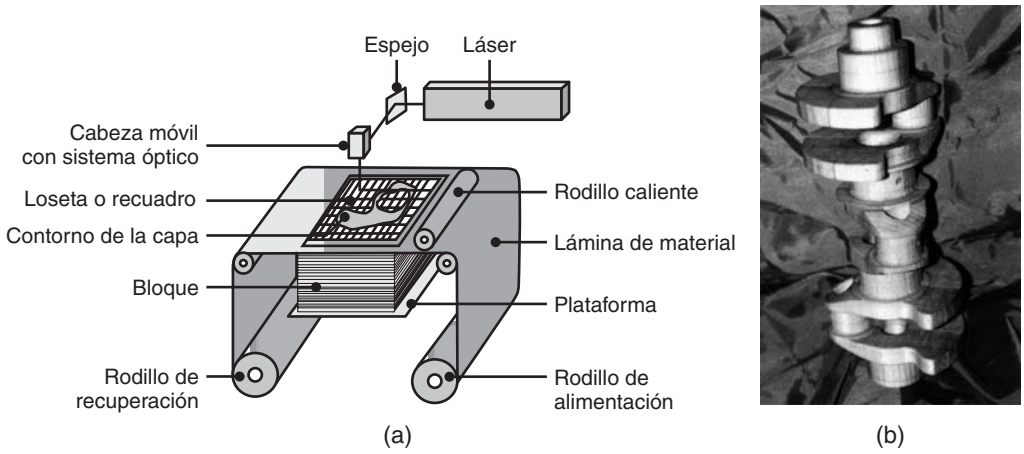


FIGURA 20.11 *(a)* Esquema del proceso de manufactura de objetos laminados. *(b)* Ejemplo de parte: cigüeñal fabricado mediante LOM. *Fuente*: *(a)* Cortesía de Helysis, Inc. *(b)* L. Wood.

máscara porque el área de la rebanada en la que se desea material sólido permanece transparente.

2. Mientras se prepara la máscara, se deposita una delgada capa de polímero fotorreactivo sobre la superficie de trabajo y se distribuye de manera uniforme.
3. La fotomáscara se coloca sobre la superficie de trabajo y se proyecta luz ultravioleta a través de la máscara. En las partes donde ésta es clara, la luz pasa a través de ella para curar el polímero y hace que se endurezca la rebanada deseada.
4. La resina que no es afectada (todavía líquida) se retira de la superficie mediante vacío.
5. Se esparce cera líquida soluble en agua sobre el área de trabajo, llenando las cavidades previamente ocupadas por el polímero líquido no expuesto. Como la pieza de trabajo se encuentra sobre una placa de enfriamiento y el espacio de trabajo permanece frío, la cera se endurece con rapidez.
6. Después la capa se fresa para obtener el espesor y la uniformidad correctos.
7. Este proceso se repite, capa por capa, hasta que se concluye la parte.

El curado de base sólida tiene la ventaja de su alta velocidad de producción, porque todas las rebanadas se elaboran de inmediato y se utilizan dos pantallas de cristal de manera concurrente. Es decir, en tanto que una máscara se usa para exponer el polímero, la siguiente ya se está preparando y queda lista en cuanto se concluye la operación de fresado.

Modelado de redes mediante ingeniería láser. Los desarrollos más recientes en los procesos de manufactura aditiva comprenden el principio de utilización de un rayo láser para fundir y depositar polvo metálico o alambre, capa por capa, sobre una capa fundida previamente. Los patrones de las capas depositadas se controlan mediante un archivo CAD. Este proceso de modelado de forma casi neta se conoce como *modelado de redes mediante ingeniería láser* (LENS, marca comercial) y se basa en las tecnologías de soldadura y revestimiento con láser. La entrada de calor y enfriamiento se controla con precisión para obtener una microestructura favorable.

El proceso de deposición se efectúa dentro de un área cerrada, en un ambiente de argón, para evitar los efectos adversos de la oxidación (en especial para el aluminio). Es apropiado para una amplia variedad de metales y aleaciones especiales para la manufactura directa de partes, incluyendo herramentales y moldes totalmente densos. También puede utilizarse en la reparación de componentes delgados y delicados. Existen otros métodos similares de procesamiento que emplean láser, entre ellos la *acumulación controlada de metal* (CMB, por sus siglas en inglés) y la *deposición de metal de precisión* (PMD, marca comercial).

20.4 Producción de prototipos virtuales

La *producción de prototipos virtuales* es una forma de fabricar prototipos sólo mediante programas de cómputo (*software*); utiliza gráficas avanzadas y ambientes de realidad virtual que permiten a los diseñadores examinar una parte. Esta tecnología se usa en los paquetes comunes y convencionales de CAD para reproducir una parte, de manera que el diseñador pueda observarla y evaluarla conforme se dibuja. Sin embargo, debe reconocerse que los sistemas de producción de prototipos virtuales son casos extremos de reproducción de detalles.

Las formas más simples de dichos sistemas utilizan programas complejos y rutinas de gráficos tridimensionales que permiten a los visualizadores cambiar la vista de las partes en una pantalla de computadora. Las versiones más complicadas emplean cascos y guantes de realidad virtual con detectores apropiados que permiten al usuario observar un prototipo de la parte deseada generado por computadora, en un ambiente totalmente virtual.

La producción virtual tiene la ventaja de reproducir partes para evaluación de manera instantánea; sin embargo, los sistemas más avanzados son costosos. Dado que la familiaridad con las interfaces del programa es un prerrequisito necesario para su aplicación, estos sistemas tienen curvas de aprendizaje muy pronunciadas. Además, muchos especialistas de manufactura y diseño prefieren evaluar un prototipo físico en vez de una reproducción en una pantalla de video. Con frecuencia perciben que los prototipos de realidad virtual son inferiores a los prototipos mecánicos, aunque los diseñadores depuran los mismos o más errores en el ambiente virtual.

Hay ejemplos importantes de productos complicados que se han fabricado sin ningún prototipo físico (**diseño sin papel**). Quizá el mejor conocido sea el del avión Boeing 777, cuyos ajustes mecánicos e interferencias se evaluaron en un sistema CAD y las dificultades se corrigieron antes de la manufactura del primer modelo de producción (ver la sección 38.5).

20.5 Manufactura directa y fabricación rápida de herramentales

Además de ser extremadamente adecuados como herramienta de demostración y visualización, los procesos de producción de prototipos rápidos también se han utilizado como un paso de manufactura en la producción. Existen dos metodologías básicas utilizadas:

1. Producción directa de componentes o partes de ingeniería de metales, cerámicos y polímeros mediante producción de prototipos rápidos.
2. Fabricación de herramentales mediante la producción de prototipos rápidos para su uso en operaciones posteriores de manufactura.

Las partes de polímeros que se pueden obtener de diversas operaciones de producción de prototipos rápidos son útiles no sólo para evaluar y resolver problemas de diseño, sino que en algunas ocasiones estos procesos pueden utilizarse para manufacturar partes directamente (lo que se conoce como *manufactura directa)*. Esto es, el componente es generado directamente a una forma casi neta de un archivo de computadora que almacena la geometría de la parte. Las principales limitaciones para difundir el uso de la producción de prototipos rápidos para manufactura directa o *manufactura rápida* (RM, por sus siglas en inglés) son:

- Económicas, ya que los costos de la materia prima son altos y el tiempo de fabricación de cada parte es demasiado largo para que sea viable en grandes líneas de producción. Sin embargo, existen muchas aplicaciones en las que las líneas de producción son suficientemente pequeñas para justificar la manufactura directa mediante tecnologías de producción de prototipos rápidos.
- El rendimiento a largo plazo y consistente de las partes de RM (en comparación con los métodos más tradicionales de manufactura) y sus características bien establecidas de desempeño, como el desgaste y el ciclo de vida.

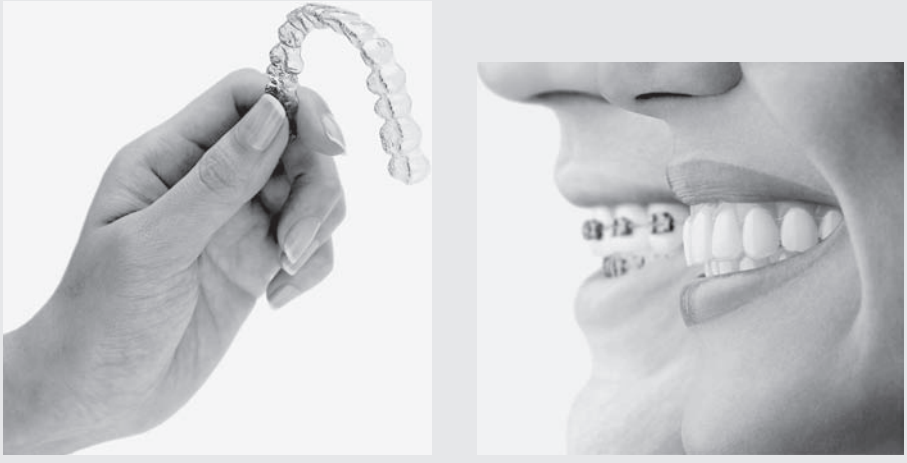
Se está avanzando mucho en el tratamiento de estos problemas, con el fin de que la manufactura rápida sea una opción viable y más competitiva de manufactura. El futuro de estos procesos sigue siendo desafiante y prometedor, sobre todo porque en la actualidad se considera la RM como un método para producir bajo pedido. Así los clientes podrán ordenar una parte específica, que se producirá dentro de un tiempo de espera relativamente corto.

ESTUDIO DE CASO 20.1 Alineadores ortodóncicos Invisalign

Durante más de 50 años, los tensores ortodóncicos han sido útiles para enderezar dientes. Éstos comprenden frenos de metal, cerámicos o plástico que se unen mediante adhesivo a los dientes con aditamentos para sujetarlos a un alambre, el cual hace que los dientes se sometan y se enderecen en la forma deseada en unos cuantos años. Los tensores ortodóncicos convencionales son una técnica bien conocida y exitosa para la salud dental a largo plazo; sin embargo, tienen diversas desventajas: *(a)* son estéticamente poco atractivos, *(b)* los alambres punzantes y los frenos pueden ser dolorosos, *(c)* retienen alimentos que causan el deterioro prematuro de los dientes, *(d)* el cepillado y el uso de hilo dental son más difíciles y poco efectivos con los tensores colocados, y *(e)* es necesario evitar ciertos alimentos porque dañan los tensores.

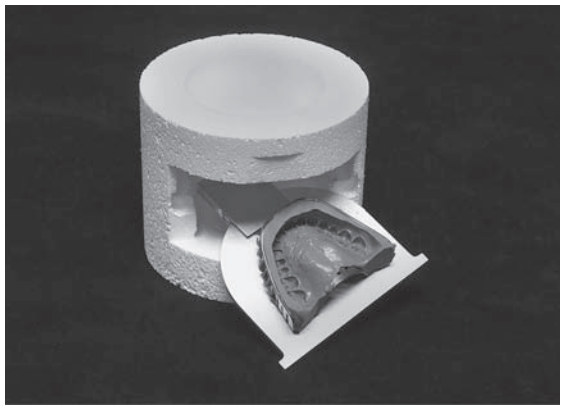
Una solución es el sistema Invisalign, creado por Align Technology, Inc. Consta de una serie de alineadores que la persona usa por alrededor de dos semanas. Cada alineador (ver fig. 20.12) consta de una geometría precisa que mueve los dientes a las posiciones deseadas de manera progresiva. Dado que los alineadores pueden extraerse para comer y limpiar los dientes con cepillo e hilo dental, se elimina la mayoría de las desventajas de los tensores comerciales. Además, puesto que se producen con un plástico transparente, no afectan seriamente la apariencia de la persona.

El producto Invisalign utiliza una combinación de tecnologías avanzadas en el proceso de producción, que se muestra en la figura 20.13. El tratamiento se inicia con un ortodoncista o dentista general que crea una impresión de los dientes del paciente en un polímero (fig. 20.13a). Dicha impresión se utiliza después para crear una representación tridimensional en CAD de los dientes del paciente, como se muestra en la figura 20.13b. Así, el programa (*software*) patentado de diseño asistido por computadora ayuda en el desarrollo de una estrategia de tratamiento para mover los dientes de manera óptima.

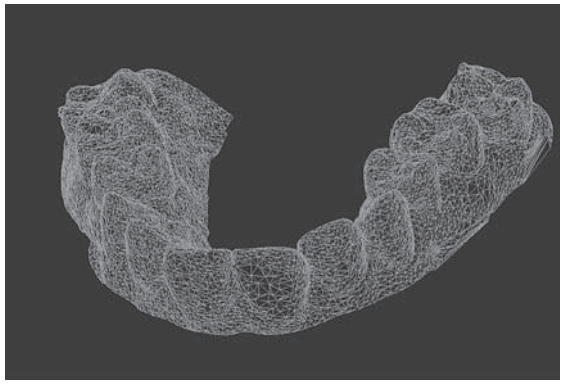


(a) (b)

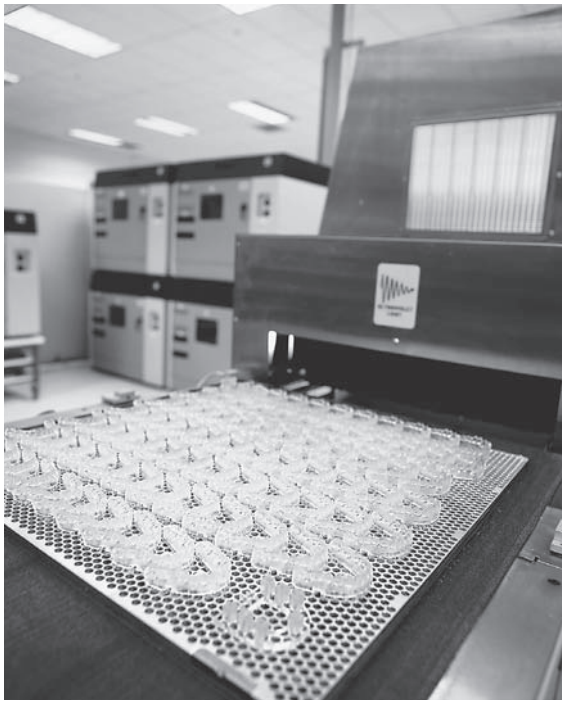
FIGURA 20.12 *(a)* Alineador para uso ortodóncico fabricado mediante una combinación de fabricación rápida de herramental y termoformado. *(b)* Comparación de tensores ortodóncicos convencionales con el uso de alineadores transparentes. *Fuente*: Cortesía de Align Technology, Inc.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 20.13 Secuencia de manufactura de los alineadores ortodóncicos Invisalign. *(a)* Creación de una impresión de polímero de los dientes de un paciente. *(b)* Modelado por computadora para producir representaciones en CAD de los perfiles deseados de los dientes. *(c)* Producción de modelos graduales del movimiento deseado de los dientes. Un alineador se produce por termoformado de una lámina plástica transparente contra este modelo. *Fuente*: Cortesía de Align Technology, Inc.

Una vez que el médico aprueba el tratamiento y se desarrolla el plan correspondiente, se utiliza la información por computadora para producir los alineadores mediante una novedosa aplicación de estereolitografía. Aunque existen muchos materiales para estereolitografía, tienen una sombra parda característica y, por lo tanto, no son apropiados para aplicarlos directamente como productos ortodóncicos. En vez de eso, el proceso de Align utiliza una máquina de estereolitografía que produce modelos de las posiciones progresivas deseadas de los dientes (fig. 20.13c). Una lámina de polímero virgen se somete entonces a un proceso de termoformado (ver la sección 19.6) a partir de dichos modelos para producir los alineadores. Éstos se envían al ortodoncista tratante y, bajo la supervisión del médico, se instruye a los pacientes para que cambien al siguiente juego de alineadores cada dos semanas.

El producto de Invisaling ha demostrado ser muy popular entre los pacientes que desean mejorar su salud dental y preservar su dentadura por mucho tiempo. El uso de estereolitografía para producir herramientas precisas de manera rápida y poco costosa permite que este tratamiento ortodóncico sea viable en términos económicos.

Fuente: Cortesía de Align Technology, Inc.

20.5.1 Fabricación rápida de herramentales

Aunque la cantidad de materiales disponibles en las operaciones de producción de prototipos rápidos sigue aumentando, existe un límite inherente a la selección de los mismos cuando se consideran estos procesos. Por ejemplo, con frecuencia es deseable utilizar partes metálicas, mientras que algunas operaciones de producción de prototipos rápidos muy desarrolladas y ampliamente disponibles comprenden el uso de materiales poliméricos. La solución es emplear componentes manufacturados mediante la producción de prototipos rápidos como auxiliares en el procesamiento adicional.

Conocido como *fabricación rápida de herramentales* (RT), el ejemplo más simple de este método es la manufactura directa de moldes de arena por medio de la impresión tridimensional, utilizando arena de fundición como material de la pieza de trabajo. Otro ejemplo es el de la operación de fundición por revestimiento que se muestra en la figura 20.14. Aquí los modelos individuales se fabrican mediante una operación de producción de prototipos rápidos (en este caso, la estereolitografía) y después se usan como piezas en bruto en el ensamble de un *árbol* para fundición por revestimiento. Cabe hacer notar que este método requiere un polímero que se funde y se queme por completo en el molde hecho de cerámico; existen polímeros para todas las formas de operaciones de producción de proto-

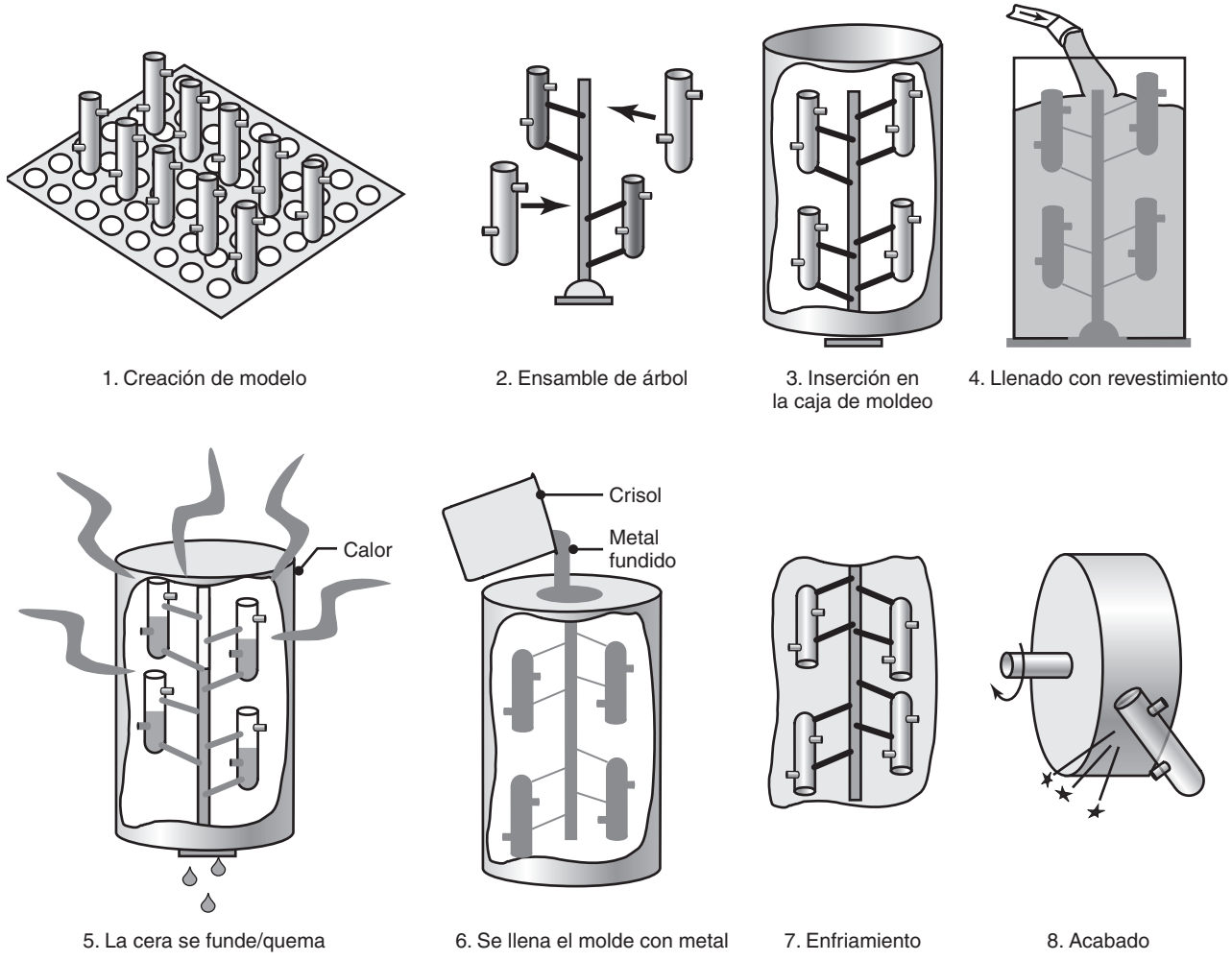


FIGURA 20.14 Pasos de manufactura para la fundición por revestimiento que utiliza piezas en bruto de cera fabricadas mediante la producción de prototipos rápidos. Este método emplea una caja de moldeo para el revestimiento, pero también se puede usar un método de cáscara. *Fuente*: Cortesía de 3D Systems, Inc.

tipos rápidos con polímeros. Además, por lo general, las partes dibujadas en los programas de CAD se modifican mediante el programa (*software*) para considerar la contracción; ésta es la parte modificada que se produce en la maquinaria de prototipos rápidos. Obsérvese también que el molde se puede producir directamente por medio de impresión tridimensional cuando se utiliza arena de fundición como material de la pieza de trabajo.

Se han diseñado diversos métodos para la fabricación rápida de herramentales por medio de procesos de producción de prototipos rápidos. Las ventajas de la RT incluyen las siguientes:

1. Se puede superar el alto costo de la mano de obra y la escasez de operarios calificados para la fabricación de modelos.
2. Existe una reducción importante del tiempo de entrega.
3. Se pueden adoptar diseños huecos con facilidad, de manera que es posible producir fundiciones ligeras sin mayor problema.
4. El uso integral de las tecnologías de CAD permite utilizar matrices o dados modulares con herramentales de molde base (placas bipartidas) e insertos fabricados en forma especial. Además, esta técnica modular puede reducir los costos de los herramentales.
5. Los canales de enfriamiento en los moldes pueden ser optimizados con mayor facilidad, lo que reduce los tiempos de los ciclos.
6. Se puede compensar en forma automática la contracción debida a la solidificación mediante el programa para fabricar herramentales del tamaño adecuado, para que a su vez produzca las partes deseadas.

La principal deficiencia de la fabricación rápida de herramentales es la vida potencialmente reducida del modelo (a diferencia de los obtenidos por maquinado de materiales para herramentales y matrices, como los aceros para herramientas o carburos de tungsteno).

Un ejemplo de fabricación rápida de herramentales es una operación de fundición en arena, donde las placas del modelo pueden manufacturarse mediante tecnologías de producción de prototipos rápidos y después utilizarse en fundiciones convencionales en arena. Otra aplicación común es el moldeo por inyección, en el que el molde (o, más comúnmente, un *inserto de molde*) se manufactura mediante la producción de prototipos rápidos y se utiliza en máquinas de moldeo por inyección. Hay dos métodos para producir herramentales: *(a)* se emplea un termoplástico con punto de fusión alto, o un termofijo estable para moldeo por inyección de baja temperatura, o *(b)* se produce un inserto de metal por fundición de revestimiento.

Los moldes para la fundición en barbotina de materiales cerámicos también se pueden producir de esta manera. Para fabricar moldes individuales con la permeabilidad deseada, se usan directamente procesos de producción de prototipos rápidos. Por ejemplo, en el modelado por deposición de material fundido, este requisito dicta que los filamentos plásticos deben colocarse en las rebanadas individuales con un pequeño espacio entre los filamentos adyacentes. Estos filamentos se colocan posteriormente en ángulos rectos en capas adyacentes.

Se ha utilizado la manufactura de partículas balísticas, en combinación con la sinterización e infiltración de metales, en una amplia variedad de aplicaciones de herramentales y moldes. El proceso puede usar polvos de acero inoxidable infiltrados con bronce, por lo que pueden producirse herramentales para procesos como la forja y el formado de láminas metálicas, así como las aplicaciones de fundición y procesamiento de polímeros ya descritas.

EJEMPLO 20.3 Cubierta de motor para limpiaparabrisas trasero automotriz

Los ingenieros de manufactura en Ford Motor Company se encontraron en un dilema al advertir que, para cumplir las metas de producción, se requería una cubierta prototipo de motor para el limpiaparabrisas trasero de la Explorer 1994 en un plazo de seis semanas (fig. 20.15). El proveedor de herramientas de Ford no pudo cumplir con es-

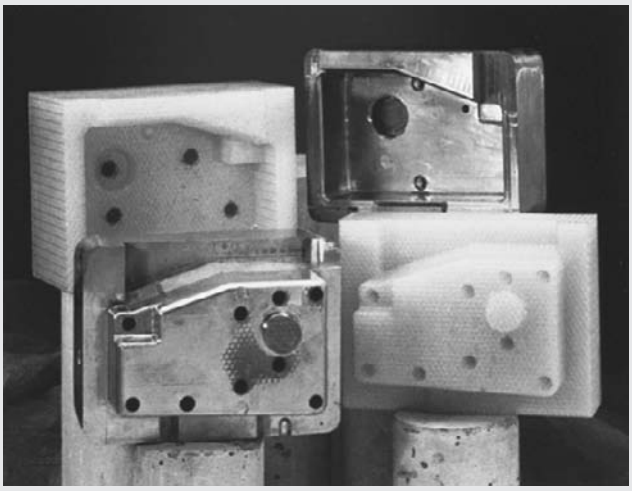


FIGURA 20.15 Fabricación rápida de herramental para una cubierta de motor de limpiaparabrisas trasero. *Fuente*: Cortesía de 3D Systems, Inc.

ta fecha de vencimiento porque maquinar la parte, después rectificarla y por último verificar sus dimensiones, solía tardar mucho tiempo.

A partir de un archivo de CAD se creó un prototipo, después se produjo (como ejemplo de la utilidad clásica de los producción de prototipos rápidos) mediante estereolitografía y se adaptó sobre el motor del limpiador. Como sucede a menudo con nuevos diseños y ensambles, se descubrió un problema de interferencia que requería un rediseño. El prototipo de cera se maquinó manualmente, se verificó la nueva adaptación y la parte modificada sirvió como plantilla para ajustar el dibujo en CAD. Con base en esta imagen se produjo un prototipo nuevo y se aseguró la adaptación.

Mediante programas de computación para el diseño de moldes, se produjeron modelos "negativos" de las partes que incorporaban factores de contracción para compensar la resina prototipo, acero A2 para matrices o dados (sección 5.7) que se utilizaría como herramental, y el material final: polipropileno. Estos modelos de moldes se produjeron por medio de una cera compatible para fundición por revestimiento en un sistema de estereolitografía y después se fundió usando acero A2. Se evaluaron los primeros modelos y se hicieron mejoras tanto en los canales de enfriamiento como en los componentes de los pernos eyectores del herramental. Se fundió un segundo juego de herramentales por revestimiento para producir 30,000 piezas al mes. El tiempo total de producción fue de cuatro semanas.

Fuente: Cortesía de Ford Motor Company y 3D Systems.

RESUMEN

- La producción de prototipos rápidos se ha convertido en una disciplina única de manufactura en las últimas dos décadas. Como tecnología de producción de modelos físicos, es una técnica útil para identificar y corregir errores de diseño. Se han desarrollado diversas técnicas para fabricar partes por medio de dicho proceso.
- El modelado por deposición de material fundido consta de un extrusor controlado por computadora, mediante el cual se deposita un filamento de polímero para producir una parte, rebanada por rebanada.
- La estereolitografía implica un sistema basado en el láser y controlado por computadora que cura un polímero líquido de ambiente térmico conteniendo un agente curado fotosensitivo.

- Un curado en base sólida involucra el curar toda una capa a la vez con una lámpara ultravioleta y después se limpia con cera soluble en agua para llenar las partes sin curar. Esto produce un rendimiento mayor que en otros procesos de producción de prototipos rápidos.
- La manufactura de objetos laminados utiliza un rayo láser para cortar primero las rebanadas en hojas de papel o de plástico (laminaciones), después aplica una capa adhesiva y por último apila las láminas para producir la parte.
- La manufactura de partículas balísticas, y el proceso de impresión tridimensional relacionado con ésta, utiliza un mecanismo de chorro de tinta para depositar gotas del material de los prototipos o un aglutinante líquido sobre polvos, respectivamente.
- La sinterización láser selectiva utiliza un rayo láser de alta potencia para sinterizar polvos y darles la forma deseada.
- Las técnicas de producción de prototipos rápidos han hecho posible que los tiempos de desarrollo de los productos sean más cortos y están teniendo un efecto importante en otros procesos de manufactura. Cuando se utilizan los materiales apropiados, la maquinaria de producción de prototipos rápidos puede fabricar piezas en bruto para fundición por revestimiento o procesos similares, de modo que ahora las partes metálicas se pueden obtener de manera rápida y poco costosa, incluso para tamaños tan pequeños como el de una sola pieza. Dichas tecnologías también pueden aplicarse con el fin de producir moldes para operación (como moldeo por inyección), reduciendo así de manera significativa el tiempo de entrega entre el diseño y la manufactura.

TÉRMINOS CLAVE

Curado de base sólida
Estereolitografía
Fabricación de sólidos de forma libre
Fabricación rápida de herramentales
Fotopolímero
Impresión tridimensional
Manufactura de objetos laminados
Manufactura de partículas balísticas
Manufactura directa
Modelado por deposición de material fundido
Procesos aditivos
Procesos sustractivos
Prototipo
Prototipos virtuales
Sinterización selectiva láser

BIBLIOGRAFÍA

Beaman, J. J., Barlow, J. W., Bourell, D. L. y Crawford, R., *Solid Freeform Fabrication*, Kluwer, 1997.

Bennett, G. (ed.), *Developments in Rapid Prototyping and Tooling*, Institution of Mechanical Engineers, 1997.

Burns, M., *Automated Fabrication*, Prentice Hall, 1993.

Chua, C. K. y Fua, L. K., *Rapid Prototyping: Principles and Applications in Manufacturing*, Wiley, 1997.

Hilton, P. D. y Jacobs, P. F., *Rapid Tooling: Technologies and Industrial Applications*, Marcel Dekker, 2000.

Jacobs, P. F., *Rapid Prototyping and Manufacturing: Fundamentals of Stereo Lithography*, McGraw-Hill, 1993.

_____, *Stereo Lithography and Other RP&M Technologies: From Rapid Prototyping to Rapid Tooling*, Society of Manufacturing Engineers, 1995.

Kocran, D., *Solid Preform Manufacturing*, Elsevier, 1993.

Pham, D. T. y Dimov, S. S., *Rapid Tooling: The Technologies and Applications of Rapid Prototyping and Rapid Tooling*, Springer-Verlag, 2001.

Wood, L., *Rapid Automated Prototyping: An Introduction*, Industrial Press, 1993.

PREGUNTAS DE REPASO

20.1 ¿Qué es la estereolitografía?

20.2 ¿Se pueden hacer partes mediante producción de prototipos rápidos con papel? Explique su respuesta.

20.3 ¿Qué es el prototipo virtual y en qué se diferencia de los métodos aditivos?

20.4 ¿Qué es el modelado por deposición de material fundido?

20.5 ¿A qué nos referimos con fabricación rápida de herramentales? ¿Cuál es su significado en manufactura?
20.6 ¿Por qué son fundamentales los fotopolímeros para la estereolitografía?
20.7 ¿Qué significan *(a)* 3DP, *(b)* LOM, *(c)* SLS, *(d)* SLA, *(e)* FDM, y *(f)* LENS?
20.8 ¿Qué materiales iniciales se pueden utilizar en el modelado por deposición de material fundido? ¿Y en impresión tridimensional?
20.9 ¿Por qué en impresión tridimensional es frecuente infiltrar partes metálicas con otro metal?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

20.10 Examine una taza de café y determine en qué orientación decidiría producir la parte si utilizara los procesos de: *(a)* manufactura por deposición de material fundido, o *(b)* manufactura de objetos laminados.
20.11 ¿Cómo fabricaría rápidamente herramentales para moldeo por inyección? Explique cualquier dificultad que pudiera encontrar.
20.12 Resuma los procesos de producción de prototipos rápidos y los materiales que se pueden utilizar con ellos.
20.13 ¿Qué procesos descritos en este capítulo se adaptan mejor para la producción de piezas de materiales cerámicos? ¿Por qué?
20.14 ¿Por qué son tan pocas las partes en productos comerciales directamente fabricados por medio de operaciones de producción de prototipos rápidos?
20.15 Resuma los métodos de producción de partes metálicas que utilizan los procesos descritos en este capítulo.
20.16 ¿Cuáles son las operaciones de limpieza y acabado en los procesos de producción rápida de prototipos? ¿Por qué son necesarias?
20.17 El análisis cuidadoso de una parte fabricada mediante producción de prototipos rápidos indica que está constituida por capas, que muestran una clara disposición de filamentos visibles en cada capa. ¿El material es un termofijo o un termoplástico? Explique su respuesta.
20.18 ¿Cuál es la principal diferencia entre manufactura aditiva y producción de prototipos rápidos?
20.19 Liste las ventajas y limitaciones de cada una de las operaciones descritas en este capítulo.
20.20 Si está fabricando el prototipo de un automóvil de juguete, liste las operaciones de acabado posteriores a la producción de prototipos rápidos que realizaría y explique por qué.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

20.21 A un costo aproximado de $500 dólares por galón para el polímero líquido, estime el costo del material de una reproducción obtenida mediante producción de prototipos rápidos de un ratón (*mouse*) típico de computadora.
20.22 La cabeza del extrusor en una instalación de modelado por deposición de material fundido tiene un diámetro de 1.25 mm (0.05 pulgada) y produce capas de 0.25 mm (0.05 pulgada). Si las velocidades de la cabeza del extrusor y del extrudido de polímero son de 50 mm/s, estime el tiempo de producción para generar un cubo sólido de 50 mm (2 pulgadas). Suponga que existe un retraso de 15 segundos entre capas mientras la cabeza del extrusor pasa por un cepillo de alambre para limpieza.
20.23 Utilizando los datos del problema 20.22 y suponiendo que la porosidad del material de soporte es de 50%, calcule la velocidad de producción de una taza alta de 100 mm (4 pulgadas) con un diámetro exterior de 88 mm (3.5 pulgadas) y un espesor de pared de 6 mm (0.25 pulgada). Considere el caso con el extremo cerrado *(a)* hacia arriba, y *(b)* hacia abajo.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

20.24 Un tema actual de investigación consiste en la creación de partes mediante operaciones de producción de prototipos rápidos y su uso posterior en el análisis experimental de esfuerzos para inferir la resistencia de las partes finales producidas por medio de las operaciones convencionales de manufactura. Liste sus inquietudes respecto de este método y describa medios para manejarlas.

20.25 Debido al relevo de esfuerzos residuales durante el curado, las proyecciones largas sin soporte de las partes producidas mediante estereolitografía tienden a curvarse. Sugiera métodos de control o eliminación de este problema.

20.26 Las máquinas de producción de prototipos rápidos representan una gran inversión de capital y pocas empresas pueden justificar la compra de su propio sistema, por lo que se han vuelto comunes las compañías de servicios que producen partes con base en los dibujos de sus clientes. Realice un estudio informal de esas compañías, determine la clase de máquinas de producción de prototipos rápidos que se utilizan y determine sus porcentajes.

20.27 Una de las ventajas principales de la estereolitografía es que puede utilizar polímeros semitransparentes, por lo que de inmediato se pueden percibir los detalles de las partes. Liste y describa algunas partes en las que esta característica sea valiosa.

20.28 Se está proponiendo una técnica de manufactura que utiliza una variación del modelado por deposición de material fundido, en la que existen dos filamentos de polímero que se funden y mezclan antes de extruirlos para producir la pieza de trabajo. ¿Qué ventajas tiene este método?

20.29 Identifique los procesos de RP descritos en este capítulo que puede efectuar (a una escala modesta) con materiales disponibles en su casa o que pueda comprar fácilmente a bajo costo. Explique cómo lo haría. Considere materiales como madera delgada, papel grueso, pegamento y mantequilla, y el uso de diversos herramentales y fuentes de energía.

20.30 Diseñe una máquina que utilice tecnologías de producción de prototipos rápidos para elaborar esculturas de hielo. Describa sus características básicas, comentando el efecto del tamaño y la complejidad de la forma en su diseño.

Procesos de maquinado y máquinas herramienta

PARTE IV

Las partes manufacturadas mediante los procesos de fundición, formado y moldeado descritos en las partes II y III requieren con frecuencia operaciones adicionales antes de que el producto pueda utilizarse, incluyendo muchas piezas fabricadas con métodos de forma neta, o cercana a la neta. Por ejemplo, considérese las siguientes características de las partes y si pueden producirse por medio de los procesos analizados hasta este momento:

- Superficies lisas y brillantes, como las de apoyo del cigüeñal mostrado en la figura IV.1.
- Orificios de diámetro pequeño en una parte, como la boquilla de inyección mostrada en la figura IV.2.



FIGURA IV.1 Un cigüeñal forjado antes y después de maquinar las superficies de apoyo. Las superficies de apoyo brillantes de la parte a la derecha no se pueden producir con esas dimensiones y acabado superficial final por ningún otro de los procesos descritos en los capítulos anteriores de este libro. *Fuente*: Cortesía de Wyman-Gordon Company.

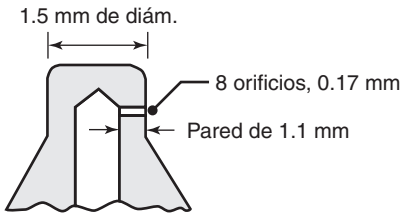


FIGURA IV.2 Sección transversal de una boquilla de inyección de combustible que muestra un pequeño orificio producido mediante el proceso de maquinado por descarga eléctrica, descrito en la sección 27.5. El material es acero con tratamiento térmico.

- Partes con detalles agudos, secciones roscadas y tolerancias dimensionales cerradas específicas, como se muestra en la figura IV.3.
- Un orificio u orificios roscados en diferentes superficies de una parte, para el ensamble mecánico con otros componentes.
- Acabado superficial y texturas especiales para propósitos funcionales o de apariencia.

Una breve revisión indicará que ninguno de los procesos de formado y moldeado ya descritos es capaz de producir partes con dichas características específicas, además de que las partes requerirían operaciones posteriores de manufactura. El **maquinado** es un término general que describe un grupo de procesos cuyo propósito es la *remoción* de material y la *modificación* de las superficies de una pieza de trabajo, después de haber sido producida por diversos métodos. Por ende, el maquinado comprende operaciones *secundarias* y de *acabado*.

La amplísima variedad de formas producidas por medio del maquinado se puede ver claramente en un automóvil, como se muestra en la figura IV.4. También debe reconocerse que algunas partes pueden fabricarse hasta darles su forma final (forma neta) y en grandes cantidades mediante los procesos de formado y moldeado, como la fundición a presión en matriz y la metalurgia de polvos. Sin embargo, el maquinado puede ser más

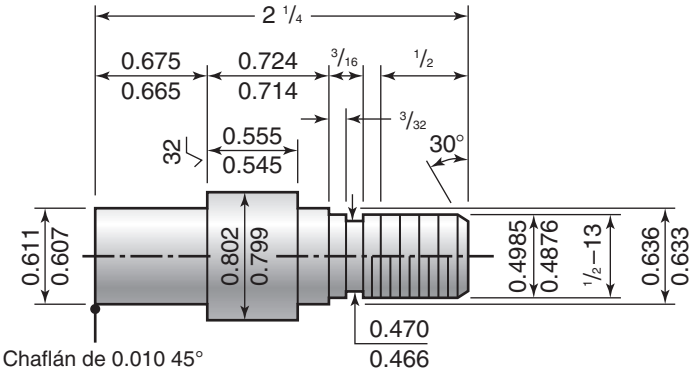


FIGURA IV.3 Parte maquinada y roscada que muestra diversas dimensiones y tolerancias; todas las dimensiones se miden en pulgadas. Obsérvese que algunas tolerancias sólo son de algunas milésimas de pulgada.

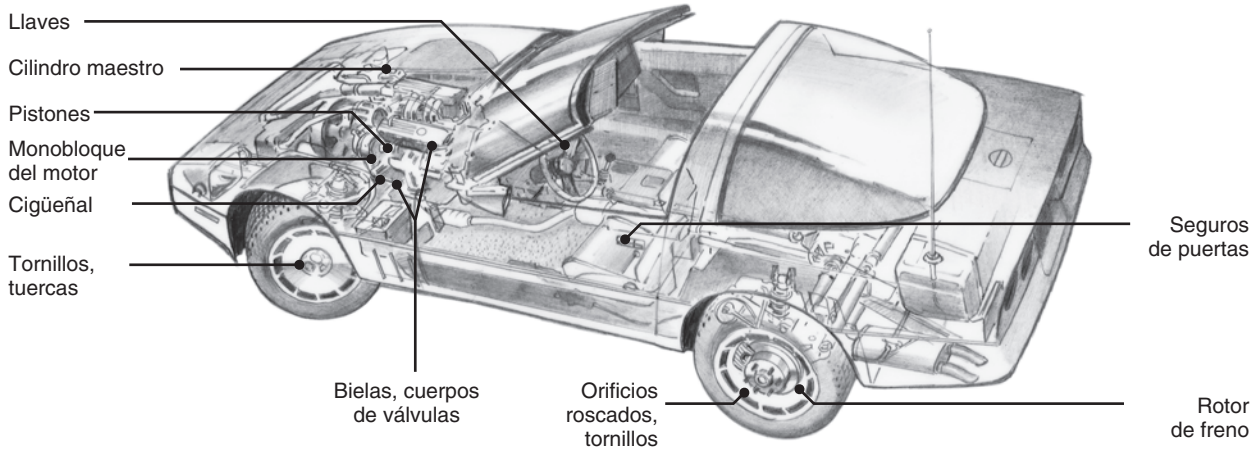


FIGURA IV.4 Partes comunes de un automóvil que requieren operaciones de maquinado para adquirir las características superficiales, dimensiones y tolerancias deseadas.

económico, dado que el número de partes requeridas es relativamente pequeño, o el material y la forma de la parte permiten maquinarla a altas velocidades y cantidades, con una alta precisión dimensional. Un buen ejemplo es la producción de partes roscadas de bronce, mecanizadas en máquinas roscadoras automáticas de husillos múltiples.

Sin embargo, en general, acudir al maquinado sugiere que una parte podría no haberse producido hasta las especificaciones finales deseadas mediante los procesos fundamentales que se utilizaron para fabricarla. Nuevamente destacamos la importancia de la *manufactura de forma neta*, descrita en la sección I.5, para evitar estos pasos adicionales y reducir los costos de producción.

A pesar de sus ventajas, los procesos de remoción de material tienen las siguientes desventajas:

- *Desperdician material* (aunque la cantidad puede ser relativamente pequeña).
- Generalmente, los procesos requieren *más tiempo* que el necesario para dar forma mediante otros procesos.
- Por lo común requieren *más energía* para realizar las operaciones de formado y moldeado.
- Pueden tener *efectos adversos* en la calidad de la superficie y en las propiedades del producto.

Como se indicó en la figura I.7e de la Introducción General, el maquinado consiste en varios tipos importantes de procesos de remoción de material:

- **Corte,** que por lo común comprende herramientas de corte de un solo filo o de filos múltiples, cada una con una forma claramente definida (capítulos 23 a 25).
- **Procesos abrasivos,** como el rectificado y los procesos relacionados con éste (capítulo 26).
- **Procesos avanzados de maquinado,** que utilizan métodos eléctricos, químicos, térmicos, hidrodinámicos y láser para cumplir su tarea (capítulo 27).

Las máquinas en las que se realizan estas operaciones se llaman **máquinas herramienta**. Como se describe a lo largo de la parte IV, su construcción y características influyen en gran medida en dichas operaciones, así como en la calidad del producto, en el acabado superficial y en la precisión dimensional.

Como puede verse en la tabla I.2 de la Introducción General, las primeras herramientas primitivas (que se remontan a varios milenios atrás) se fabricaron con el objeti-

vo principal de retirar astillas y cortar todo tipo de material natural (como madera, piedra, vegetación y ganado) con propósitos de alimentación y abrigo. Obsérvese también que no fue sino hasta el siglo XVI cuando se inició el avance en la manufactura de productos mediante operaciones de maquinado, en particular con la introducción de los tornos. Ahora contamos con una amplia variedad de máquinas herramienta controladas por computadora y técnicas modernas (utilizando diversos materiales y fuentes de energía), que son capaces de producir partes funcionales del tamaño de diminutos insectos y con secciones transversales más pequeñas que el cabello humano.

Como en otras operaciones de manufactura, es importante ver las operaciones de maquinado como un *sistema*, que consta de:

- *Pieza de trabajo.*
- *Herramienta de corte.*
- *Máquina herramienta*, y
- *Personal de producción.*

El maquinado no se puede realizar eficiente o económicamente ni satisfacer especificaciones estrictas de la parte sin un conocimiento profundo de las interacciones entre estos cuatro elementos.

En los siguientes siete capítulos describimos primero la mecánica fundamental de la formación de viruta en el maquinado: las fuerzas de la herramienta, la potencia, la temperatura, el desgaste de las herramientas, el acabado y la integridad superficiales, las herramientas de corte y los fluidos de corte. Después analizamos los procesos específicos de maquinado, sus capacidades, limitaciones y aplicaciones comunes, e identificamos características importantes de las máquinas herramienta para operaciones como el torneado, fresado, mandrinado, taladrado y machueleado. También se describen las características de los *centros de maquinado*, máquinas herramienta versátiles controladas por computadora y capaces de realizar con eficiencia numerosas operaciones.

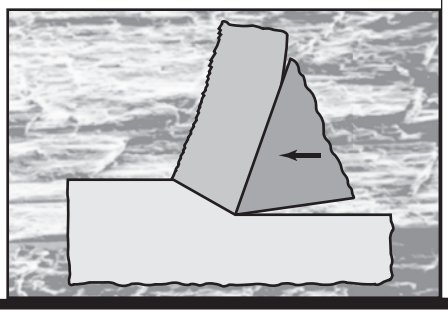
También describimos procesos en los que la remoción de material (hasta una precisión dimensional y un acabado superficial muy elevados) se efectúa mediante **procesos abrasivos** y operaciones relacionadas con ellos. Ejemplos comunes son los discos para rectificado, abrasivos recubiertos, honeado o asentado, lapeado, abrillantado, pulido, granallado y maquinado ultrasónico.

Por razones técnicas y económicas, algunas partes no se pueden maquinar de manera satisfactoria mediante procesos de corte o abrasivos. Desde la década de 1940 han ocurrido importantes desarrollos en los **procesos avanzados de maquinado**, como el maquinado químico, electroquímico, por descarga eléctrica, por rayo láser, por haz de electrones, por chorro abrasivo e hidrodinámico.

El conocimiento adquirido en la parte IV nos permitirá evaluar las capacidades y limitaciones de los procesos de remoción de material; las máquinas herramienta y el equipo relacionado con ellas; su selección apropiada para obtener la mayor eficiencia y productividad al menor costo, y cómo se encuadran estos procesos en el esquema más amplio de las operaciones de manufactura.

Fundamentos del maquinado

CAPÍTULO 21



Como introducción a los procesos de maquinado que se cubrirán en los siguientes capítulos, en éste describimos el mecanismo por el cual se cortan los materiales. Específicamente:

- Cómo se producen las virutas durante el maquinado.
- Requerimientos de fuerza y potencia en el maquinado.
- Factores comprendidos en la elevación de la temperatura y sus efectos.
- Cómo se desgastan y fallan las herramientas de corte.
- Acabado superficial e integridad de las partes producidas mediante maquinado.
- Maquinabilidad de los materiales.

21.1 Introducción 607
21.2 Mecánica del corte 609
21.3 Fuerzas y potencia de corte 620
21.4 Temperaturas en el corte 623
21.5 Vida útil de la herramienta: desgaste y falla 626
21.6 Acabado superficial e integridad 635
21.7 Maquinabilidad 638

EJEMPLOS:

21.1 Energías relativas en el corte 623
21.2 Determinación de los coeficientes *C* y *n* en la ecuación de Taylor 630
21.3 Incremento de la vida de la herramienta mediante la reducción de la velocidad de corte 630
21.4 Efecto de la velocidad de corte en la remoción de material 631

21.1 Introducción

Los procesos de corte retiran material de la superficie de una pieza de trabajo mediante la producción de **virutas**. En la figura 21.1 se ilustran algunos de estos procesos (ver también fig. I.7e).

- **Cilindrado**, en el que se gira la pieza de trabajo y una herramienta de corte retira una capa de material al moverse hacia la izquierda, como en la figura 21.1a.
- **Tronzado**, donde una herramienta de corte se desplaza radialmente hacia dentro y separa la pieza de la derecha de la masa de la pieza en bruto.
- La operación de **fresado de careado**, en la que una herramienta de corte retira una capa de material de la superficie de la pieza de trabajo.
- La operación de **fresado frontal**, en la que un cortador giratorio se desplaza con cierta profundidad a lo largo de la pieza de trabajo y produce una cavidad.

En el proceso de cilindrado, que se ilustra con mayor detalle en la figura 21.2, la herramienta de corte se ajusta a cierta *profundidad de corte* (en mm o en pulgadas) y se desplaza hacia la izquierda con determinada velocidad mientras la pieza de trabajo gira. El *avance*, o *velocidad de avance*, es la distancia que la herramienta se desplaza horizontalmente por cada revolución de la pieza (mm/rev o pulgadas/rev). Este movimiento de la herramienta produce una viruta, que se mueve hacia arriba de la cara de la herramienta.

Para analizar este proceso con detalle, en la figura 21.3a se presenta un modelo bidimensional. En este modelo idealizado, una herramienta de corte se mueve hacia la iz-

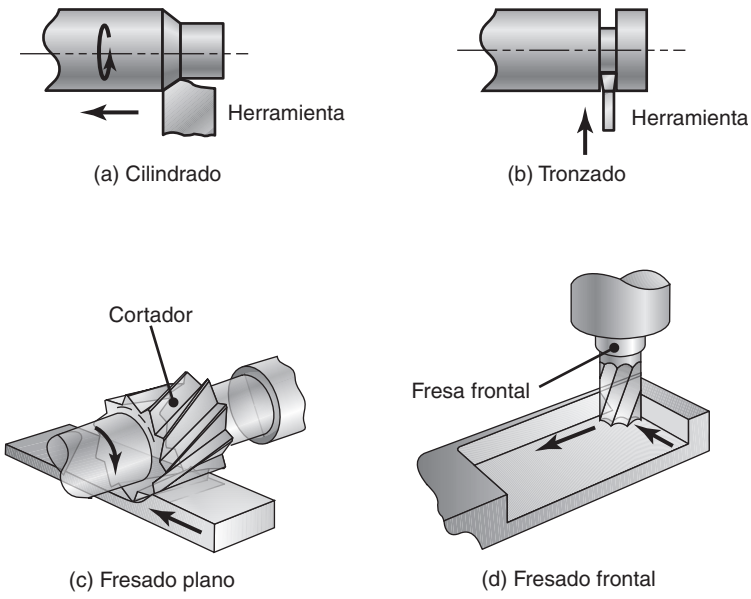


FIGURA 21.1 Algunos ejemplos de operaciones comunes de maquinado.

quierda a lo largo de la pieza de trabajo a una velocidad constante (V) y a una profundidad de corte (t_o). Se produce una viruta delante de la herramienta por medio de la deformación plástica y el cizallamiento continuo del material a lo largo del plano de corte. Este fenómeno se puede demostrar raspando lentamente la superficie de una barra de mantequilla a lo largo con un cuchillo afilado y observando la formación de una viruta. El rasurado de chocolate para decorar pasteles y galletas se produce de manera similar.

Si se comparan las figuras 21.2 y 21.3 se observará que el avance en el torneado es equivalente a t_o, y que la profundidad del corte equivale a su anchura (dimensión perpendicular a la página) en el modelo idealizado. Estas relaciones se pueden visualizar girando 90° la figura 21.3 en el sentido de las manecillas del reloj. Con esta breve introducción como antecedente, ahora describiremos el proceso de corte con mayor detalle.

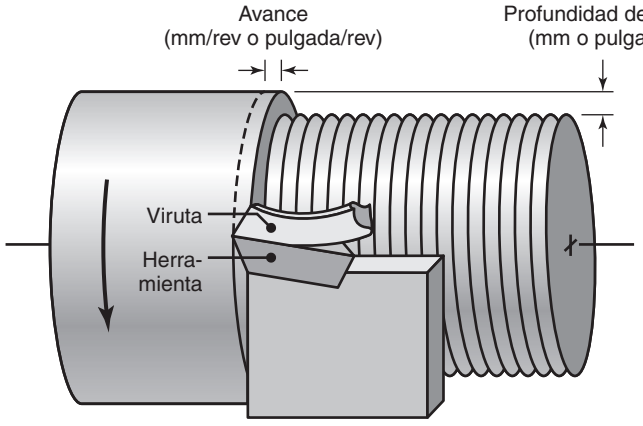


FIGURA 21.2 Esquema de la operación de cilindrado que muestra diversas características.

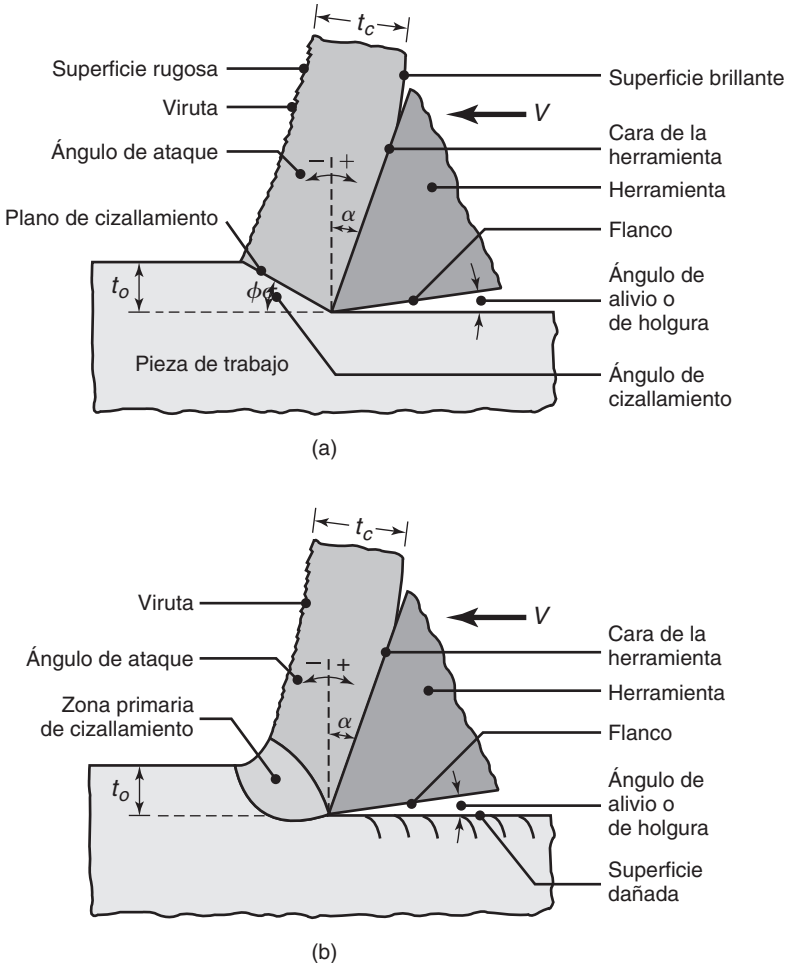


FIGURA 21.3 Esquema de un proceso de corte bidimensional, también llamado corte ortogonal: *(a)* corte ortogonal con un plano bien definido de cizallamiento, también conocido como modelo Merchant. Obsérvese que la forma de la herramienta, la profundidad de corte (t_o) y la velocidad de corte (V) son todas variables independientes: *(b)* corte ortogonal sin un plano bien definido de corte.

21.2 Mecánica del corte

En la tabla 21.1 se indican los factores que influyen en el proceso de corte. Para apreciar el contenido de esta tabla, identifiquemos ahora las *variables independientes* esenciales en el proceso de corte: *(a)* material y recubrimientos de la herramienta; *(b)* forma, acabado superficial y filo de la herramienta; *(c)* material y condiciones de la pieza de trabajo; *(d)* avance, velocidad y profundidad de corte; *(e)* fluidos de corte; *(f)* características de la máquina herramienta, y *(g)* sujeciones y soportes de la pieza de trabajo.

Las *variables dependientes* en el corte son aquellas a las que afectan los cambios en las variables independientes indicadas en el párrafo anterior, e incluyen: *(a)* tipo de viruta producida, *(b)* fuerza y energía disipada durante el corte, *(c)* elevación de la temperatura en la pieza de trabajo, la herramienta y la viruta, *(d)* desgaste y falla de la herramienta, y *(e)* acabado superficial e integridad de la superficie de la pieza de trabajo.

TABLA 21.1

Factores que influyen en las operaciones de maquinado

Parámetro	Influencia y relación
Velocidad de corte, profundidad de corte, avance, fluidos de corte	Fuerzas, potencia, elevación de temperatura, vida útil de la herramienta, tipo de viruta, acabado e integridad superficial.
Ángulos de la herramienta	Igual que en el párrafo anterior; influencia en la dirección de flujo de la viruta; resistencia al desgaste y astillado de la herramienta.
Viruta continua	Buen acabado superficial; fuerzas estables de corte; indeseable, en particular en la maquinaria automatizada.
Viruta de borde acumulado o recrecido	Acabado e integridad superficial deficientes; si es delgada y estable, el borde acumulado puede proteger las superficies de la herramienta.
Viruta discontinua	Deseable para facilitar la disposición de la viruta; fuerzas fluctuantes de corte; puede afectar el acabado superficial y provocar vibración y traqueteo.
Elevación de la temperatura	Influye en la vida útil de la herramienta, en particular en la craterización y en la precisión dimensional de la pieza de trabajo; puede provocar daño térmico a la superficie de la pieza de trabajo.
Desgaste de la herramienta	Influye en el acabado e integridad superficial, la precisión dimensional, la elevación de la temperatura, las fuerzas y la potencia.
Maquinabilidad	Relacionada con la vida útil de la herramienta, el acabado superficial, las fuerzas y la potencia y el tipo de viruta.

Cuando los resultados de las operaciones de maquinado son inaceptables, la resolución normal de los problemas requiere una investigación sistemática. Una cuestión común es cuál de las variables independientes debe cambiarse primero, y en qué medida, si: *(a)* el acabado superficial de la pieza de trabajo que se está cortando es deficiente e inaceptable; *(b)* la herramienta de corte se desgasta con rapidez y se desafila; *(c)* la pieza de trabajo se calienta mucho, y *(d)* la herramienta comienza a vibrar y traquetear.

Para entender estos fenómenos y responder a estas preguntas, primero analicemos la mecánica de la formación de viruta, un tema que se ha estudiado ampliamente desde la década de 1940. Se han propuesto varios modelos (con grados variables de complejidad). Como sucede en otros procesos de manufactura (como fundición, moldeo, moldeado y formado), los modelos avanzados de maquinado también están en continuo desarrollo. Estos métodos incluyen la *simulación en computadora* de los procesos de maquinado a fin de estudiar las complejas interacciones de las muchas variables comprendidas en el proceso, al tiempo que se desarrollan habilidades para *optimizar* las operaciones de maquinado.

El modelo simple presentado en la figura 21.3a (al que se conoce como modelo M. E. Merchant, desarrollado en la década de 1940) es suficiente para nuestros propósitos; se le llama de **corte ortogonal** porque es bidimensional y las fuerzas involucradas (como se muestra en la figura 21.11) son perpendiculares una a la otra. La herramienta de corte tiene un **ángulo de ataque** α (positivo, como se ve en la figura) y un **ángulo de alivio** o **de holgura**.

El examen microscópico de las virutas obtenidas en las operaciones reales de maquinado ha demostrado que se producen por *cizallamiento* (como se modela en la fig. 21.4a), de modo similar al movimiento de un paquete de naipes deslizándose uno sobre otro. El cizallamiento ocurre a lo largo de la **zona de cizallamiento** (por lo general, un plano bien definido al que se conoce como **plano de cizallamiento o cortante**) en un ángulo ϕ (llamado **ángulo de cizallamiento o del plano cortante**). Debajo de este plano, la pieza de trabajo permanece sin deformaciones; encima de él, la viruta recién formada se mueve hacia arriba sobre la cara de ataque de la herramienta. Se ha exagerado la dimensión d de la figura para mostrar el mecanismo correspondiente. En realidad, esta dimensión es sólo del orden de 10^{-2} a 10^{-3} mm (10^{-3} a 10^{-4} pulgadas).

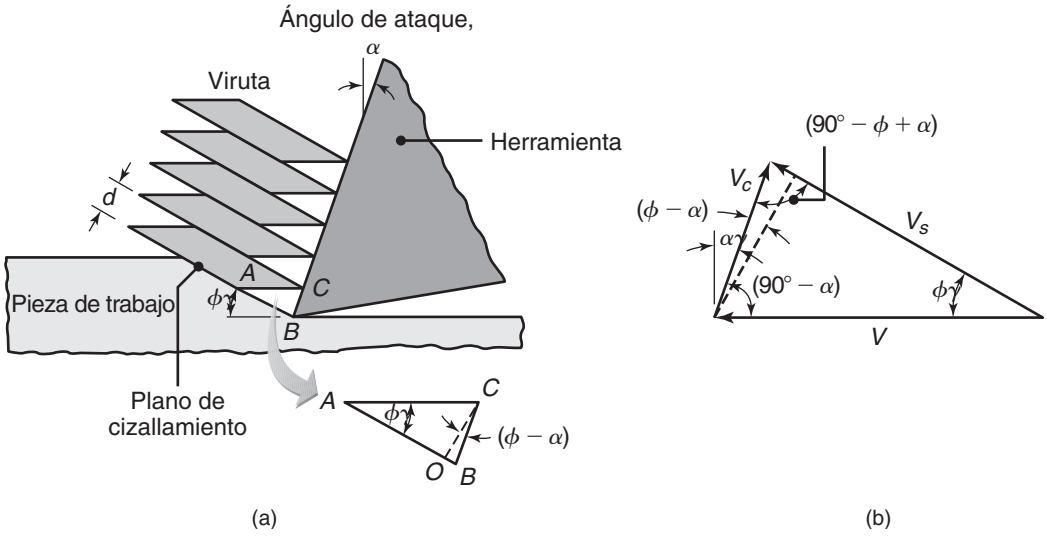


FIGURA 21.4 *(a)* Esquema del mecanismo básico de formación de viruta por cizallamiento. *(b)* Diagrama de velocidades que muestra las relaciones angulares entre las tres velocidades en la zona de corte.

Algunos materiales (de manera notable los hierros fundidos a bajas velocidades) no se cizallan a lo largo de un plano bien definido, sino en una zona, como se muestra en la figura 21.3b. El cizallamiento en tales volúmenes no es cuestionable, pero puede provocar defectos superficiales en la pieza de trabajo (como se discutirá más adelante).

Relación de corte. El espesor de la viruta (t_c) se puede determinar conociendo la profundidad de corte (t_o) y α y ϕ. A la relación de t_o/t_c se le llama **relación de corte** (o relación de espesor de viruta), r, y se relaciona con los dos ángulos mediante las siguientes relaciones:

$$\tan \phi = \frac{r \cos \alpha}{1 - r \operatorname{sen} \alpha} \tag{21.1a}$$

y

$$r = \frac{t_o}{t_c} = \frac{\operatorname{sen} \phi}{\cos(\phi - \alpha)} \tag{21.1b}$$

Debido a que el espesor de la viruta siempre es mayor que la profundidad de corte, el valor de r siempre es menor a la unidad. Al recíproco de r se le conoce como *relación* o *factor de compresión de la viruta* y es, por lo tanto, una medida de cuán gruesa se ha vuelto la viruta respecto de la profundidad de corte; de ahí que la relación de compresión de la viruta siempre sea mayor que la unidad. A la profundidad de corte también se le llama *espesor sin deformación de la viruta*, lo que puede visualizarse al revisar la figura 21.3.

La relación de corte es un parámetro importante y útil para evaluar las condiciones de corte. Debido a que el espesor sin deformación de la viruta (t_o) es un parámetro de la máquina, y por lo tanto ya es conocido, la relación de corte se puede calcular con facilidad midiendo el espesor de la viruta con un micrómetro. Si se conoce también el ángulo de ataque para una operación específica de corte (es una función de la geometría de la herramienta y de la pieza de trabajo en uso), la ecuación 21.1 permite calcular el ángulo de cizallamiento.

Aunque nos hemos referido a t_o como la *profundidad de corte*, nótese que en un proceso de maquinado (como el cilindrado que se muestra en la fig. 21.2) esta cantidad es el *avance*. Para visualizar esta situación, supóngase que la pieza de trabajo de la figura 21.2 es un tubo de pared delgada y que la anchura del corte es igual al espesor del tubo. Entonces, si la figura 21.3 se gira 90º en el sentido de las manecillas del reloj, observaremos que ahora es similar a la vista en la figura 21.2.

Deformación cortante o cizallamiento. Si nos referimos ahora a la figura 21.4a, podemos ver que la **deformación cortante** o cizallamiento (γ) que sufre el material se puede expresar como:

$$\gamma = \frac{AB}{OC} = \frac{AO}{OC} + \frac{OB}{OC}$$

o

$$\gamma = \cot \phi + \tan(\phi - \alpha) \tag{21.2}$$

Nótese que las deformaciones cortantes grandes se asocian con ángulos bajos de cizallamiento o con ángulos de ataque bajos o negativos. En las operaciones reales de corte se han observado deformaciones cortantes de 5 o mayores. Si se compara con los procesos de formado y moldeado, el material de la pieza de trabajo sufre una mayor deformación durante el corte, como se ve también en la tabla 2.4. Además, por lo general, la deformación en el corte ocurre dentro de una zona de deformación muy estrecha. En otras palabras, la dimensión $d = OC$ en la figura 21.4a es muy pequeña. Por lo tanto, la velocidad a la que ocurre el cizallamiento es alta. En la sección 21.3 analizamos la naturaleza y el tamaño de la zona de deformación.

El ángulo de cizallamiento tiene gran importancia en la mecánica de las operaciones de corte, pues afecta los requisitos de fuerza y potencia, el espesor de la viruta y la temperatura. Por lo tanto, se ha puesto mucha atención en determinar las relaciones entre dicho ángulo, las variables del proceso de corte y las propiedades del material de la pieza de trabajo. Uno de los primeros análisis se basó en el supuesto de que el ángulo de cizallamiento se ajusta por sí mismo para minimizar la fuerza de corte, o que el plano de cizallamiento es un plano de máximo esfuerzo cortante o de cizallamiento. Este análisis produjo la expresión:

$$\phi = 45° + \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2} \tag{21.3}$$

donde β es el **ángulo de fricción** y está relacionado con el *coeficiente de fricción* (μ) en la interfaz herramienta-viruta mediante la expresión $\mu = \tan \beta$. Entre las muchas relaciones cizallamiento-ángulo desarrolladas, otra fórmula útil que suele aplicarse es:

$$\phi = 45° + \alpha - \beta \tag{21.4}$$

En general, el coeficiente de fricción en el corte de metales va de aproximadamente 0.5 a 2, lo que indica que la viruta encuentra gran resistencia de fricción al moverse hacia arriba de la cara de ataque de la herramienta. Los experimentos han mostrado que μ varía de manera considerable a lo largo de la interfaz herramienta-viruta debido a las abruptas variaciones en la presión de contacto y en la temperatura. En consecuencia, a m también se le conoce como *coeficiente medio aparente de fricción*.

La ecuación 21.3 indica que: *(a)* al disminuir el ángulo de ataque y/o al aumentar la fricción en la interfaz herramienta-viruta (cara de ataque), el ángulo de cizallamiento se reduce y la viruta se vuelve más gruesa; *(b)* una viruta más gruesa significa mayor disipación de energía, ya que la deformación cortante es mayor (ver ecuación 21.2), y *(c)* debido a que el trabajo realizado durante el corte se convierte en calor, la elevación de la temperatura también es mayor. Los efectos de estos fenómenos se describen en el resto de este capítulo.

Velocidades en la zona de corte. En la figura 21.3 se observa que el espesor de la viruta es mayor que la profundidad de corte, por lo que la velocidad de la viruta (V_c) tiene que ser menor que la velocidad de corte (V).

Debido a que debe mantenerse la continuidad de la masa,

$$Vt_o = V_c t_c \quad \text{o} \quad V_c = Vr$$

De ahí que,

$$V_c = \frac{V \operatorname{sen} \phi}{\cos(\phi - \alpha)} \tag{21.5}$$

También se puede construir un *diagrama de velocidades*, como se muestra en la figura 21.4b, donde a partir de las relaciones trigonométricas obtenemos la ecuación:

$$\frac{V}{\cos(\phi - \alpha)} = \frac{V_s}{\cos \alpha} = \frac{V_c}{\text{sen } \phi} \tag{21.6a}$$

donde V_s es la velocidad a la que ocurre el cizallamiento en el plano de cizallamiento. Obsérvese también que:

$$r = \frac{t_o}{t_c} = \frac{V_c}{V} \tag{21.6b}$$

Utilizaremos estas relaciones de velocidad en la sección 21.3, cuando se describan los requerimientos de potencia en las operaciones de corte.

21.2.1 Tipos de virutas producidos en el corte de metales

En la figura 21.5 se muestran los tipos de virutas metálicas que suelen observarse en la práctica y fotomicrografías de los mismos. Los cuatro tipos principales son:

- **Continua**
- **De borde acumulado (o recrecido)**
- **Aserrada o segmentada**
- **Discontinua**

Observemos primero que la viruta tiene dos superficies: una ha estado en contacto con la cara de ataque de la herramienta y posee una apariencia brillante y pulida, provocada por el rozamiento conforme la viruta se desplaza hacia arriba de la cara de la herramienta. La otra superficie es la original de la pieza de trabajo; su apariencia es rugosa y mellada (como se puede ver en las figs. 21.3 y 21.5), debido al mecanismo de cizallamiento mostrado en la figura 21.4a. Esta superficie está expuesta al ambiente y no ha entrado en contacto con algún cuerpo sólido.

Virutas continuas. Por lo general, las *virutas continuas* se forman con materiales dúctiles, maquinados a altas velocidades de corte o a ángulos elevados de ataque (fig. 21.5a). La deformación del material ocurre a lo largo de una estrecha zona de cizallamiento llamada *zona primaria de cizallamiento*. Las virutas continuas pueden desarrollar una *zona secundaria de cizallamiento* (fig. 21.5b) debido a la elevada fricción en la interfaz herramienta-viruta; esta zona se vuelve más gruesa al aumentar la fricción.

La deformación como viruta continua también puede ocurrir a lo largo de una zona primaria de cizallamiento con *fronteras curvas* (ver fig. 21.3b), a diferencia de la mostrada en la figura 21.5a. Obsérvese que la frontera inferior de la zona de deformación se encuentra *debajo* de la superficie maquinada, sometiéndola a distorsión, como indican las líneas verticales distorsionadas en la parte inferior de la superficie maquinada. Por lo general, esta situación se presenta en el maquinado de metales blandos a bajas velocidades y con bajos ángulos de ataque; comúnmente produce un pobre acabado superficial e induce esfuerzos residuales superficiales, lo que puede dañar las propiedades de la parte maquinada en la vida de su superficie.

Aunque por lo general producen un buen acabado superficial, las virutas continuas no son necesariamente deseables, en particular con las máquinas herramienta controladas por computadora que se utilizan con amplitud, pues tienden a atorarse alrededor del portaherramientas, los soportes, la pieza de trabajo y en los sistemas de disposición de las virutas. Es posible que la operación tenga que detenerse para limpiar las virutas. Este problema se puede aligerar con **rompevirutas** (para continuar) o cambiando los parámetros, como el avance, la velocidad y la profundidad de corte y mediante el uso de fluidos de corte.

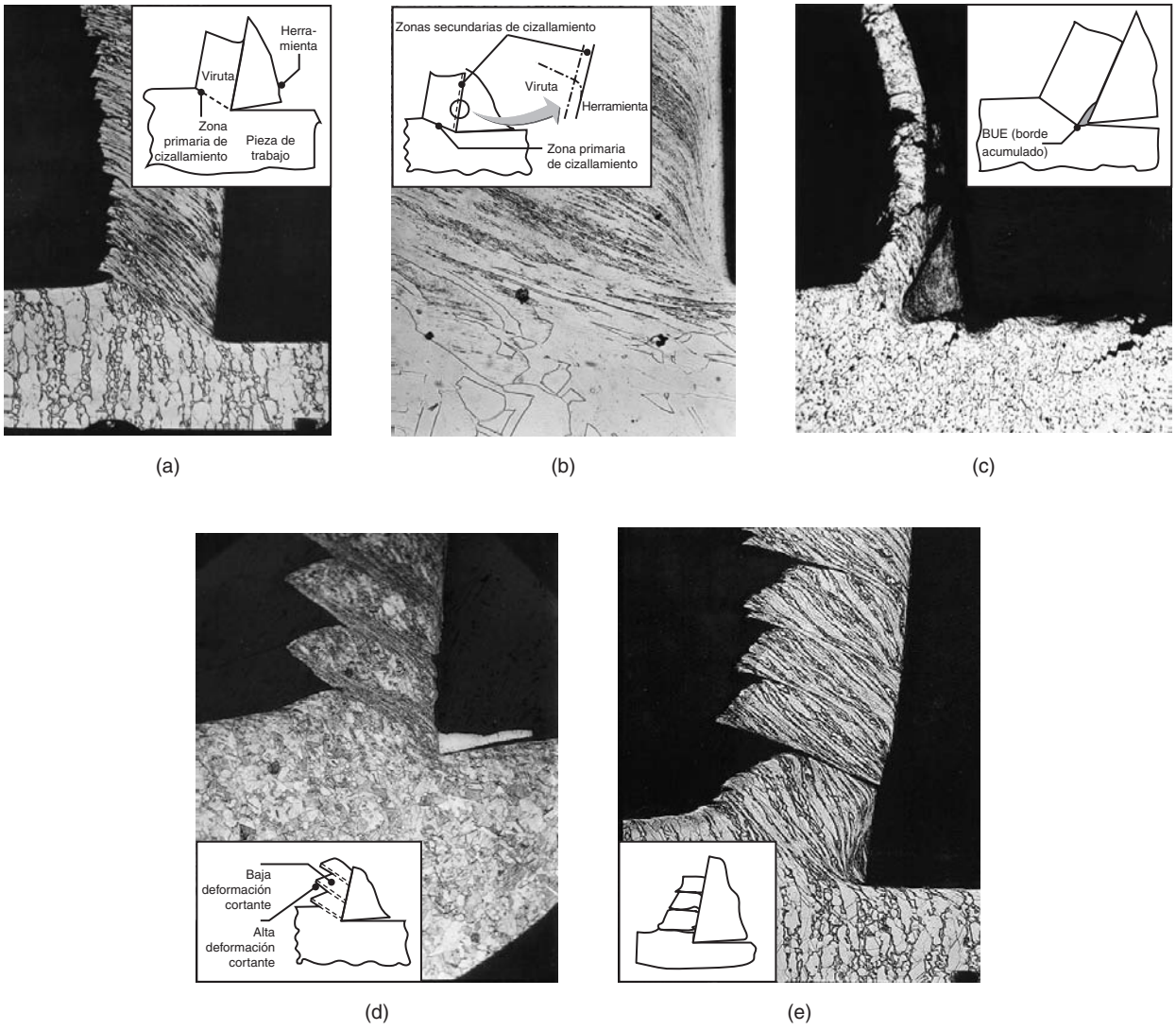


FIGURA 21.5 Tipos básicos de virutas generadas en el corte ortogonal de los metales, representación esquemática y fotomicrografías de la zona de corte: *(a)* viruta continua con una zona primaria de cizallamiento estrecha y recta; *(b)* viruta continua con una zona secundaria de cizallamiento en la interfaz viruta-herramienta; *(c)* borde acumulado o recrecido; *(d)* viruta segmentada o no homogénea; y *(e)* viruta discontinua. *Fuente:* M. C. Shaw, P. K. Wright y S. Kalpakjian.

Virutas de borde acumulado (o recrecido). Un *borde acumulado* o *recrecido* (BUE, por sus siglas en inglés) consiste en capas de material de la pieza de trabajo que se depositan gradualmente en la punta de la herramienta, de ahí el término *acumulado* (fig. 21.5c). Cuando crece, el BUE se vuelve inestable y al final se rompe. Parte del material del BUE es retirado mediante la cara de la herramienta de la viruta; el resto se deposita al azar sobre la superficie de la pieza de trabajo. El ciclo de formación y destrucción de BUE se repite en forma continua durante la operación de corte hasta que se toman medidas correctivas. En efecto, el borde acumulado cambia la geometría del filo y lo desafila (fig. 21.6a).

El borde acumulado se observa comúnmente en la práctica. Es un factor importante que afecta de manera adversa el acabado superficial, como puede verse en las figuras 21.5c y 21.6b y c. Sin embargo, por lo regular, un BUE delgado y estable se considera deseable

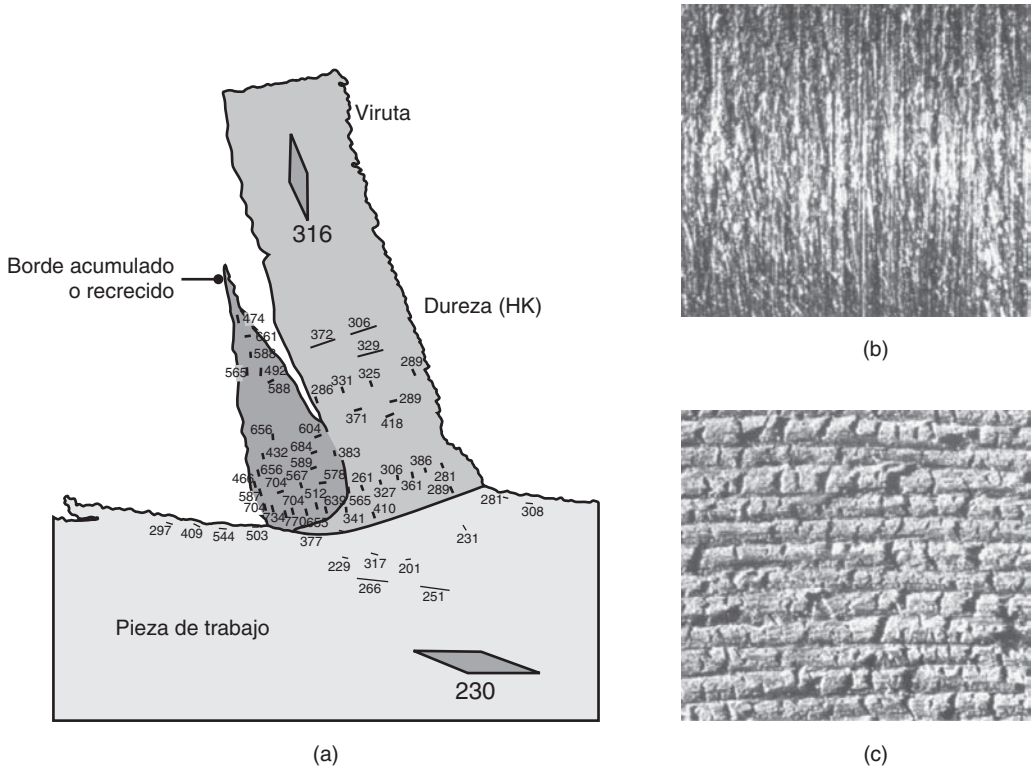


FIGURA 21.6 *(a)* Distribución de dureza con un borde acumulado o recrecido en la zona de corte (material, acero 3115). Obsérvese que algunas regiones en el borde acumulado son hasta tres veces más duras que la masa del metal de la pieza de trabajo. *(b)* Acabado superficial producido al cilindrar acero 5130 con un borde acumulado. *(c)* Acabado superficial en acero 1018 en fresado plano. Amplificaciones: 15×. *Fuente:* Cortesía de Metcut Research Associates, Inc.

porque reduce el desgaste de la herramienta al proteger su cara de ataque. En general, los metales trabajados en frío tienen menor tendencia a formar BUE que en su condición de recocidos. El endurecimiento por trabajo y la deposición de capas sucesivas de material incrementan de manera significativa la dureza del BUE (fig. 21.6a). Al aumentar la velocidad de corte, disminuye el tamaño del BUE; de hecho, puede no formarse siquiera.

La tendencia a la formación del BUE se puede reducir mediante uno o más de los siguientes medios:

- Aumento de las velocidades de corte.
- Disminución de la profundidad de corte.
- Incremento del ángulo de ataque.
- Uso de una herramienta afilada.
- Uso de un fluido de corte eficaz.
- Uso de una herramienta de corte que tenga menos afinidad química con el material de la pieza de trabajo.

Virutas aserradas. Las *virutas aserradas* (también llamadas virutas *segmentadas* o *no homogéneas*, ver fig. 21.5d) son semicontinuas, con grandes zonas de baja deformación cortante y pequeñas zonas de alta deformación cortante, de ahí que a estas últimas se les conozca como zonas de *localización del cizallamiento*. Este comportamiento se

muestra en los metales con baja conductividad térmica y resistencia, que disminuyen en forma abrupta con la temperatura (reblandecimiento térmico), más notablemente en el titanio. Las virutas tienen una apariencia aserrada. (No debe confundirse este tipo de viruta con la ilustración de la fig. 21.4a, donde la dimensión *d* ha sido muy exagerada).

Virutas discontinuas. Las *virutas discontinuas* consisten en segmentos que pueden estar firmemente sujetos uno a otro, o muy sueltos (fig. 21.5e). Es común que las virutas discontinuas se formen en las siguientes condiciones:

- Materiales frágiles de la pieza de trabajo, porque no tienen la capacidad de soportar la elevada deformación cortante comprendida en el corte.
- Materiales de la pieza de trabajo con inclusiones duras e impurezas, o que tienen estructuras como de hojuelas de grafito en la fundición de hierro gris.
- Velocidades de corte muy bajas o muy altas.
- Grandes profundidades de corte.
- Bajos ángulos de ataque.
- Falta de un fluido de corte eficaz.
- Poca rigidez del portaherramientas o de la máquina herramienta, lo que permite que ocurra la vibración y el traqueteo.

La naturaleza discontinua de la formación de viruta ocasiona que la fuerza varíe de manera continua durante el corte. En consecuencia, la rigidez del portaherramienta de la herramienta de corte, los dispositivos de sujeción del trabajo y la máquina herramienta son importantes tanto en el corte con virutas aserradas como con virutas discontinuas. Si no es suficientemente rígida, la máquina herramienta puede comenzar a vibrar y traquetear, como se discute con detalle en la sección 25.4. Esto, a su vez, afecta en forma adversa el acabado superficial y la precisión dimensional de la parte maquinada y, de ser excesivo, puede causar un desgaste prematuro o daño a la herramienta de corte, e incluso a los componentes de la máquina herramienta.

Rizo de viruta. En todas las operaciones de corte realizadas en metales y en materiales no metálicos, como plásticos y madera, las virutas desarrollan una curvatura (*rizo de viruta*) conforme abandonan la superficie de la pieza de trabajo (fig. 21.5). Entre los factores que afectan el rizo de la viruta están los siguientes:

- La distribución de esfuerzos en las zonas primaria y secundaria de cizallamiento.
- Los efectos térmicos.
- Las características de endurecimiento por trabajo del material de la pieza de trabajo.
- La geometría de la herramienta de corte.
- Los fluidos de corte.

Las variables del proceso también afectan el rizo de la viruta. Por lo general, al disminuir la profundidad de corte se reduce el radio de la curvatura; es decir, la viruta se vuelve más rizada. De la misma manera, los fluidos de corte pueden hacer que las virutas se vuelvan más rizadas (disminuyendo el radio de curvatura), esto es, reduciendo el área de contacto entre la herramienta y la viruta y concentrando el calor más cerca de la punta de la herramienta. El resultado es que aumenta el desgaste de la herramienta.

Rompevirutas. Como se estableció antes, las virutas largas y continuas son indeseables, ya que tienden a enrollarse y a interferir en las operaciones de maquinado y también se convierten en un riesgo potencial de seguridad. Si todas las variables del proceso están bajo control, el procedimiento que suele emplearse para evitar dicha situación consiste en romper la viruta de manera intermitente, con herramientas de corte que tienen elementos *rompevirutas*, como se muestra en la figura 21.7.

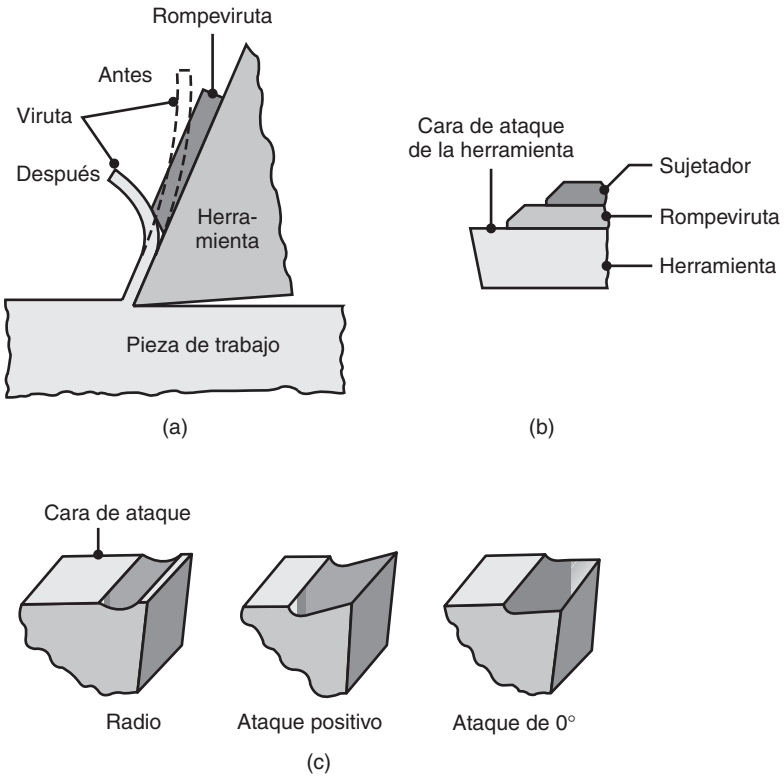


FIGURA 21.7 *(a)* Esquema de la acción de un rompevirutas. Obsérvese que éste disminuye el radio de la curvatura de la viruta y finalmente la rompe. *(b)* Rompeviruta sujeto sobre la cara de ataque de una herramienta de corte. *(c)* Ranuras en las herramientas de corte que actúan como rompevirutas. Ahora, la mayoría de las herramientas de corte utilizan *insertos* con características integradas para romper las virutas.

Tradicionalmente, los rompevirutas han sido piezas metálicas sujetas a la cara de ataque de la herramienta, que dobla y rompe la viruta. Sin embargo, las más modernas herramientas de corte e insertos ahora tienen características rompevirutas integradas (ver fig. 22.2) de diversos diseños (fig. 21.7). Las virutas también se pueden romper cambiando la geometría de la herramienta para controlar el flujo de la viruta, como en las operaciones de cilindrado mostradas en la figura 21.8. La experiencia indica que el tamaño ideal de viruta a romper es cuando tiene la forma de la letra C o del número 9 y cabe en un espacio cuadrado de 25 mm (1 pulgada).

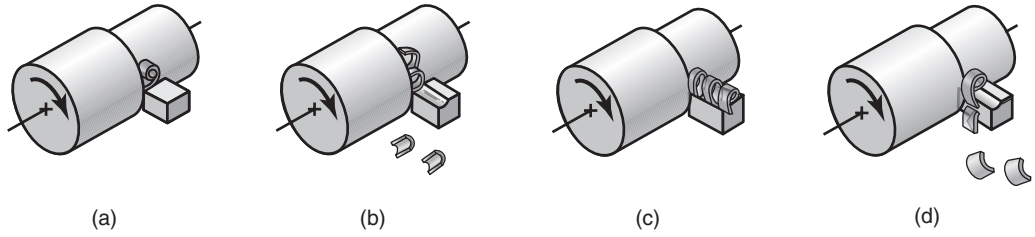


FIGURA 21.8 Virutas producidas en el cilindrado: *(a)* viruta muy rizada; *(b)* la viruta golpea la pieza de trabajo y se rompe; *(c)* viruta continua que se aleja radialmente de la pieza de trabajo, y *(d)* la viruta golpea el zanco de la herramienta y se rompe. *Fuente*: G. Boothroyd.

En los materiales blandos de la pieza de trabajo (como aluminio o cobre puros) tal vez no sea efectivo romper la viruta con tales medios, en cuyo caso el maquinado debe efectuarse por medio de incrementos pequeños (haciendo pausas para no generar viruta) o invirtiendo el avance en pequeños incrementos. En las operaciones de corte interrumpido (como en el fresado) por lo general no se necesitan los rompevirutas, porque las virutas ya tienen longitudes finitas.

Contacto controlado en las herramientas. Las herramientas de corte pueden diseñarse de manera que la longitud de contacto entre la herramienta y la viruta se reduzca, ahuecando la cara de ataque de la herramienta a una pequeña distancia de la punta. Esta disminución de la longitud de contacto afecta la mecánica de la formación de viruta. En primer lugar, reduce las fuerzas de corte y, por lo tanto, la energía y la temperatura. Es importante determinar una longitud óptima, ya que una longitud de contacto muy pequeña concentraría el calor en la punta de la herramienta, aumentando así el desgaste.

Corte de materiales no metálicos. Al cortar termoplásticos se encuentra una variedad de virutas, dependiendo del tipo de polímero y de los parámetros del proceso, como la geometría de la herramienta, la profundidad y la velocidad de corte. Muchas discusiones relativas a los metales también suelen aplicarse a los polímeros. En general, los plásticos termofijos y los cerámicos producen virutas discontinuas debido a que son frágiles. En la sección 21.7.3 se señalan las características para otros materiales maquinados (como madera, cerámicos y materiales compósitos).

21.2.2 Corte oblicuo

La mayoría de las operaciones de maquinado comprenden formas de herramientas tridimensionales cuyo corte es *oblicuo*. En la figura 21.9a se puede ver la diferencia básica entre el corte oblicuo y el ortogonal. Mientras que en éste la viruta se desliza directamente sobre la cara de la herramienta, en aquél la viruta es *helicoidal* y en un ángulo *i*, llamado **ángulo de inclinación** (fig. 21.9b). Obsérvese la dirección lateral del movimiento de la viruta en el corte oblicuo, una situación similar a la pala de la barredora de nieve que empuja la nieve hacia los lados. Se puede ver que dicha viruta helicoidal se mueve hacia los lados, alejándose de la zona de corte y sin obstruirla, como lo haría en el corte ortogonal.

Nótese que la viruta en la figura 21.9a fluye hacia arriba de la cara de ataque de la herramienta a un ángulo α_c (**ángulo de flujo de la viruta**), que se mide en el plano de la cara de la herramienta. El ángulo α_i es el **ángulo normal de ataque**, y es una propiedad geo-

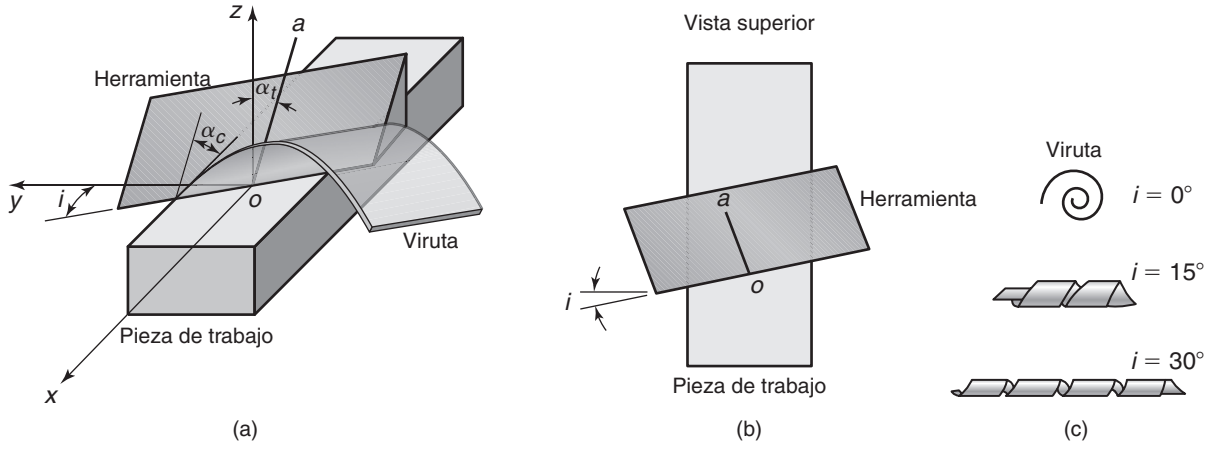


FIGURA 21.9 *(a)* Esquema de un corte con herramienta oblicua. Obsérvese la dirección de movimiento de la viruta. *(b)* Vista superior que muestra el ángulo de inclinación, *i*. *(c)* Tipos de virutas producidas por medio de herramientas con ángulos crecientes de inclinación.

métrica básica de la herramienta. Éste es el ángulo entre la línea *oz* normal a la superficie de la pieza de trabajo y a la línea *oa* de la cara de la herramienta.

El material de la pieza de trabajo se aproxima a la herramienta de corte a una velocidad (V) y abandona la superficie (como viruta) con una velocidad (V_c). El ángulo de ataque efectivo (α_e) se calcula en el plano de estas dos velocidades. Si el ángulo de flujo de la viruta (α_c) es igual al ángulo de inclinación, i (y se ha encontrado mediante experimentos que este supuesto es apropiado), el ángulo efectivo de ataque (α_e) es

$$\alpha_e = \text{sen}^{-1}(\text{sen}^2\, i + \cos^2 i \,\text{sen}\, \alpha_n). \tag{21.7}$$

Tanto i como α_n se pueden medir directamente, por lo que es posible calcular el ángulo efectivo de ataque. Obsérvese que, al aumentar i, se incrementa dicho ángulo y la viruta se vuelve más delgada y larga, y en consecuencia, disminuye la fuerza de corte. En la figura 21.9c se muestra la influencia del ángulo de inclinación en la forma de la viruta.

En la figura 21.10a se muestra una herramienta característica de torneado de un solo punto. Nótese los diversos ángulos involucrados, cada uno de los cuales debe seleccionarse de manera apropiada para obtener un corte eficiente. Aunque por lo general estos ángulos se pueden producir mediante rectificado, ahora la mayoría de las herramientas de corte se encuentran disponibles como **insertos** (ver fig. 21.10b), según se describe en el capítulo 22. En los capítulos 23 y 24 se examinan con mayor detalle diversas herramientas de corte tridimensionales, incluyendo las de taladrado, roscado, fresado, cepillado, formado, brochado, aserrado y limado.

Rasurado y pelado. Se pueden retirar delgadas capas de material de superficies rectas o curvas mediante un proceso similar al uso de un cepillo para rasurar madera. El *rasurado* es útil sobre todo para mejorar el acabado superficial y la precisión dimensional de las partes cizalladas y de las piezas troqueladas (fig. 16.9). También se aplica en el acabado de engranes, con un cortador en forma de diente del engrane (ver sección 24.7). Las partes largas, o que tienen una combinación de formas, se rasuran mediante el *pelado*, con una herramienta de corte cuya forma es especial, ya que se mueve tangencialmente a través de la longitud de la pieza de trabajo.

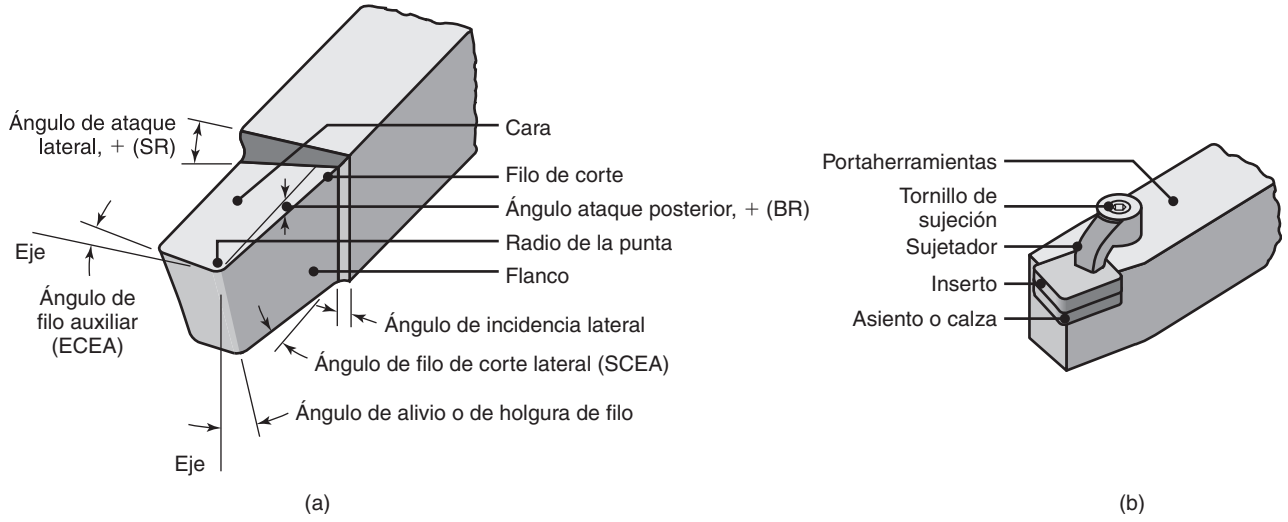


FIGURA 21.10 *(a)* Esquema de una herramienta de corte derecha. En la sección 23.2 se describen los diversos ángulos de estas herramientas y sus efectos en el maquinado. Aunque se han producido a partir de barras sólidas de acero, se han venido reemplazando en gran parte con *(b)* insertos fabricados con carburos y otros materiales de diversas formas y tamaños.

21.3 Fuerzas y potencia de corte

Es importante conocer las *fuerzas* y la *potencia de corte* comprendidas en las operaciones de maquinado por las siguientes razones:

- Los datos sobre las fuerzas de corte son fundamentales para que:
  - **a.** Las máquinas herramienta se puedan diseñar en forma apropiada para minimizar la distorsión de los componentes de la máquina, mantener la precisión dimensional deseada en la parte maquinada y ayudar a seleccionar tanto los portaherramientas como los dispositivos apropiados de sujeción de piezas.
  - **b.** La pieza de trabajo sea capaz de soportar estas fuerzas sin una distorsión excesiva.
- Deben conocerse los requerimientos de potencia para poder seleccionar una máquina herramienta con la potencia eléctrica adecuada.

En la figura 21.11a se muestran las fuerzas que actúan en el corte ortogonal. La **fuerza de corte** (F_c) actúa en la dirección de la velocidad de corte (V) y aporta la energía requerida para el corte. A la relación de dicha fuerza respecto del área transversal de la sección que se está cortando (es decir, el producto de la anchura de corte por la profundidad de corte) se le conoce como *fuerza específica de corte*.

La **fuerza de empuje** (F_t) actúa en dirección normal a la velocidad de corte. Estas dos fuerzas producen la **fuerza resultante** (R), como puede verse en el círculo de fuerzas mostrado en la figura 21.11b. Obsérvese que la fuerza resultante se puede resolver en dos componentes sobre la cara de la herramienta: una **fuerza de fricción** (F) a lo largo de la interfaz herramienta-viruta y una **fuerza normal** (N) perpendicular a ésta. También se puede demostrar que:

$$F = R \operatorname{sen} \beta \tag{21.8a}$$

y

$$N = R \cos \beta \tag{21.8b}$$

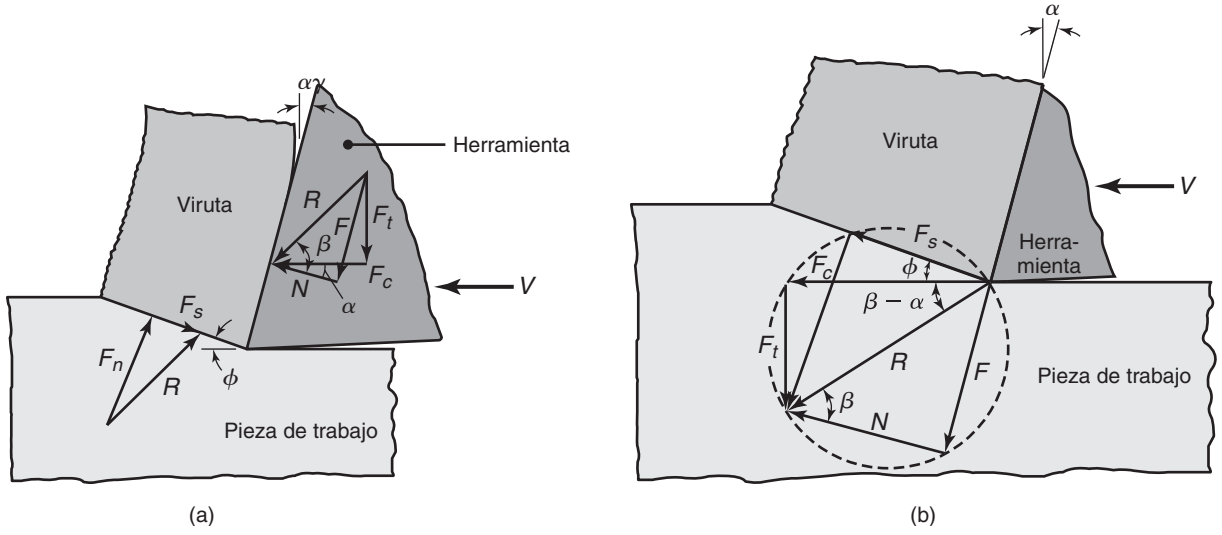


FIGURA 21.11 *(a)* Fuerzas que actúan en la zona de corte durante el corte bidimensional. Obsérvese que la fuerza resultante, R, debe ser colineal para equilibrar las fuerzas. *(b)* Círculo de fuerzas para determinar las diferentes fuerzas que actúan en la zona de corte.

Nótese que la fuerza resultante está equilibrada por una fuerza igual y opuesta a lo largo del plano de cizallamiento y se resuelve en una **fuerza de cizallamiento** (F_s) y una **fuerza normal** (F_n). Se puede demostrar que estas fuerzas se expresan de la siguiente manera:

$$F_s = F_c \cos \phi - F_t \operatorname{sen} \phi \tag{21.9}$$

y

$$F_n = F_c \operatorname{sen} \phi + F_t \cos \phi \tag{21.10}$$

Es posible calcular el área del plano de cizallamiento al conocer el ángulo de cizallamiento y la profundidad de corte, por lo que se pueden determinar los esfuerzos de cizallamiento y normal en dicho plano.

La relación de F a N es el **coeficiente de fricción** (μ) en la interfaz herramienta-viruta, y el ángulo β es el **ángulo de fricción** (como en la fig. 21.11). La magnitud de μ se puede determinar como:

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{F_t + F_c \tan \alpha}{F_c - F_t \tan \alpha} \tag{21.11}$$

Aunque la magnitud de las fuerzas en las operaciones reales de corte suele ser de unos cuantos cientos de newtons, los *esfuerzos locales* en la zona de corte y las *presiones* en la herramienta son muy elevados porque las áreas de contacto son muy pequeñas. Por ejemplo, la longitud de contacto entre la herramienta y la viruta (ver fig. 21.3) es comúnmente de 1 mm (0.04 pulgada). En consecuencia, la punta de la herramienta se somete a esfuerzos muy altos, lo que provoca desgaste y algunas veces astillado y fractura de la herramienta.

Fuerza de empuje. En el corte, es importante conocer la *fuerza de empuje* porque el portaherramientas, los dispositivos de sujeción del trabajo y la máquina herramienta deben ser lo suficientemente rígidos para soportarla con las deflexiones mínimas. Por ejemplo, si dicha fuerza es muy elevada, o si la máquina herramienta no es bastante rígida, la herramienta se alejaría de la superficie de la pieza de trabajo que se está maquinando. A su vez, este movimiento reduciría la profundidad de corte y produciría una falta de precisión dimensional en la parte maquinada.

También podemos mostrar el efecto de los ángulos de ataque y de fricción en la dirección de la fuerza de empuje, observando en la figura 21.11b que:

$$F_t = R \operatorname{sen}(\beta - \alpha) \tag{21.12a}$$

o

$$F_t = F_c \tan(\beta - \alpha) \tag{21.12b}$$

Obsérvese que la magnitud de la fuerza de corte (F_c) siempre es positiva, como se muestra en la figura 21.11, ya que ésta es la fuerza que aporta el trabajo requerido en el corte. Sin embargo, el signo de la fuerza de empuje (F_t) puede ser positivo o negativo, dependiendo de las magnitudes relativas de β y α. Cuando $\beta > \alpha$, el signo de F_t es positivo (esto es, *hacia abajo*), y cuando $\beta < \alpha$, el signo es negativo (*hacia arriba*). Por lo tanto, es posible tener una fuerza de empuje hacia arriba en condiciones de *(a)* ángulos grandes de ataque; *(b)* baja fricción en la interfaz herramienta-viruta, o *(c)* en ambas. Una fuerza negativa de empuje puede tener implicaciones importantes en el diseño de las máquinas herramienta y de los sujetadores del trabajo, así como en la estabilidad del proceso de corte.

Potencia. La *potencia* es el producto de la fuerza y la velocidad. Entonces, en referencia a la figura 21.11, la alimentación de potencia del corte es:

$$\text{Potencia} = F_c V \tag{21.13}$$

Esta potencia se disipa principalmente en la zona de cizallamiento (debido a la energía requerida para cizallar el material) y en la cara de ataque de la herramienta (por la fricción entre ésta y la viruta).

A partir de las figuras 21.4b y 21.11, se puede ver que la potencia disipada en el plano de cizallamiento es:

$$\text{Potencia de cizallamiento} = F_s V_s \tag{21.14}$$

Si permitimos que w sea la anchura de corte, la **energía específica de cizallamiento** (u_s) estará dada por:

$$u_s = \frac{F_s V_s}{w t_o V} \tag{21.15}$$

De manera similar, la potencia disipada en la fricción es:

$$\text{Potencia de fricción} = FV_c \tag{21.16}$$

y la **energía específica de fricción** (u_f) es:

$$u_f = \frac{FV_c}{w t_o V} = \frac{Fr}{w t_o} \tag{21.17}$$

Entonces, la **energía específica total** (u_t) es:

$$u_t = u_s + u_f \tag{21.18}$$

Debido a la multitud de factores involucrados, la predicción razonable de las fuerzas y las potencias de corte se basa en gran medida en datos experimentales, como los dados en la tabla 21.2. La amplia variedad de valores mostrados puede atribuirse a diferencias en la resistencia de cada grupo de materiales, y a diversos factores como la fricción, el uso de fluidos de corte y las variables del proceso.

El filo de la punta de la herramienta también influye en las fuerzas y la potencia. Como se fricciona contra la superficie maquinada y hace más grande la zona de deformación delante de la herramienta, las herramientas desafiladas requieren mayores fuerzas y potencia.

Medición de las fuerzas de corte y de la potencia. Las fuerzas de corte se pueden medir mediante un **transductor de fuerzas** (por lo común con sensores piezoeléctricos de cuarzo), un **dinamómetro** o una **celda de carga** (con calibradores de deformación de resistencia de alambre colocados en anillos octagonales), montados en el portaherramientas de

TABLA 21.2

Intervalo aproximado de requerimientos de energía en las operaciones de corte por lo que se refiere al motor de accionamiento de la máquina herramienta (multiplicar por 1.25 para herramientas desafiladas)

Material	Energía específica	
	$W \cdot s/mm^3$	$hp \cdot min/pulg^3$
Aleaciones de aluminio	0.4–1	0.15–0.4
Hierros fundidos	1.1–5.4	0.4–2
Aleaciones de cobre	1.4–3.2	0.5–1.2
Aleaciones de alta temperatura	3.2–8	1.2–3
Aleaciones de magnesio	0.3–0.6	0.1–0.2
Aleaciones de níquel	4.8–6.7	1.8–2.5
Aleaciones refractarias	3–9	1.1–3.5
Aceros inoxidables	2–5	0.8–1.9
Aceros	2–9	0.7–3.4
Aleaciones de titanio	2–5	0.7–2

la herramienta de corte. Los transductores poseen una frecuencia natural y una rigidez mucho mayores que los dinamómetros, cuyas tendencias a la deflexión y a la vibración son excesivas. Asimismo, es posible calcular la fuerza de corte con base en el **consumo de potencia** durante el corte, en la inteligencia de que se conoce, o se puede determinar, la eficiencia mecánica de la máquina herramienta. La potencia se puede medir con facilidad mediante un indicador de potencia, como un vatímetro. También puede utilizarse la *energía específica* del corte (como la mostrada en la tabla 21.2) para calcular las fuerzas de corte.

EJEMPLO 21.1 Energías relativas en el corte

En una operación de corte ortogonal, $t_o = 0.005$ pulgada, $V = 400$ pies/min, $\alpha = 10°$ y la anchura de corte = 0.25 pulgada. Se observa que $t_c = 0.009$ pulgada, $F_c = 125$ libras y $F_t = 50$ libras. Calcule el porcentaje de la energía total utilizada para vencer la fricción en la interfaz herramienta-viruta.

Solución El porcentaje de energía se puede expresar como:

$$\frac{\text{Energía de fricción}}{\text{Energía total}} = \frac{FV_c}{F_cV} = \frac{Fr}{F_c}$$

donde

$$r = \frac{t_o}{t_c} = \frac{5}{9} = 0.555$$

$$F = R \operatorname{sen} \beta$$

$$F_c = R \cos(\beta - \alpha)$$

y

$$R = \sqrt{F_t^2 + F_c^2} = \sqrt{50^2 + 125^2} = 135 \text{ lb}$$

Entonces,

$$125 = 135 \cos(\beta - 10)$$

por lo que,

$$\beta = 32°$$

y

$$F = 135 \operatorname{sen} 32° = 71.5 \text{ lb}$$

De ahí que,

$$\text{Porcentaje} = \frac{(71.5)(0.555)}{125} = 0.32 \quad \text{o} \quad 32\%$$

21.4 Temperaturas en el corte

Como en todos los procesos de trabajo de los metales en los que se involucra la deformación plástica, la energía disipada en el corte se convierte en calor, que a su vez eleva la temperatura en la zona de corte. La *elevación de la temperatura* es un factor muy importante en el maquinado por sus principales efectos adversos:

- La temperatura excesiva reduce la resistencia, la dureza, la rigidez y la resistencia al desgaste de la herramienta; las herramientas también se pueden reblandecer y sufrir deformación plástica, alterando de esta manera su forma.

- El aumento de calor provoca cambios dimensionales desequilibrados en la parte que se está maquinando, lo que dificulta el control de su precisión dimensional y de sus tolerancias.
- La elevación excesiva de temperatura puede ocasionar daños térmicos y cambios metalúrgicos en la superficie maquinada, afectando de manera adversa sus propiedades.

En las secciones precedentes se puede ver que las principales fuentes de calor en el maquinado son *(a)* el trabajo realizado en el cizallamiento en la zona primaria de cizallamiento, *(b)* la energía disipada como fricción en la interfaz herramienta-viruta, y *(c)* el calor generado cuando la herramienta roza contra la superficie maquinada, en particular en las herramientas desafiladas o gastadas. Se han empleado muchos esfuerzos para establecer relaciones entre la temperatura y diversas variables de los materiales y del proceso durante el corte. Una expresión completa para la temperatura media (T_{media}) en el *corte ortogonal* es:

$$T_{\text{media}} = \frac{1.2Y_f}{\rho c\,[V t_o/K]^{1/3}} \tag{21.19a}$$

donde la temperatura media está en °F, Y_f es el esfuerzo de fluencia en psi, ρc el calor específico volumétrico en lb/pulg^3-°F y K la difusividad térmica (la relación de conductividad térmica respecto del calor específico volumétrico) en pulg^2/s. Debido a que los parámetros del material en esta ecuación no dependen de la temperatura, es importante utilizar los valores apropiados que son compatibles con el intervalo de temperatura pronosticado. En la ecuación 21.19a puede verse que la temperatura media de corte aumenta con la resistencia de la pieza de trabajo, la velocidad de corte y la profundidad de corte; disminuye con el aumento de calor específico y con la conductividad térmica del material de la pieza de trabajo.

Una expresión para la *temperatura media de torneado* en un torno está dada por:

$$T_{\text{media}} \; r \; V^a f^b \tag{21.19b}$$

donde V es la velocidad de corte y f es el avance de la herramienta, como se muestra en la figura 21.2. Valores aproximados para los exponentes a y b son: para herramientas de *carburos*, $a = 0.2$ y $b = 0.125$; para herramientas de *acero de alta velocidad*, $a = 0.5$ y $b = 0.375$.

Distribución de la temperatura. Las fuentes de generación de calor en el maquinado se concentran en la zona primaria de cizallamiento y en la interfaz herramienta-viruta, por lo que es de esperarse que existan severos gradientes de temperatura en la zona de corte. En la figura 21.12 se muestra una distribución común de temperaturas. Obsérvese la presencia de severos gradientes y que la temperatura *máxima* se encuentra casi a la mitad arriba de la interfaz herramienta-viruta. Con base en los análisis anteriores, debe ser evidente que el patrón particular de temperaturas depende de varios factores relacionados con las propiedades del material y con las condiciones de corte, incluyendo el tipo de fluido de corte utilizado (si es que se usa alguno) durante el maquinado.

En la figura 21.13 se presentan las temperaturas desarrolladas en una operación de cilindrado en acero 52100. En la figura 21.13a se muestra la distribución de temperaturas a lo largo de la *superficie del flanco* de la herramienta, para V igual a 60, 90 y 170 m/min, respectivamente, como función de la distancia a la punta de la herramienta. En la figura 21.13b se describen las distribuciones de temperatura en la interfaz herramienta-viruta para las mismas tres velocidades de corte, como función de la fracción de longitud de contacto. Entonces, el cero en la abscisa representa la punta de la herramienta y 1.0 significa el extremo de la longitud de contacto entre la herramienta y la viruta.

Nótese que la temperatura aumenta con la velocidad de corte y que la temperatura más elevada es casi 1100 °C (2000 °F). Se puede verificar la presencia de temperaturas tan elevadas en el maquinado simplemente observando el color azul oscuro de las virutas (originado por la oxidación) producida a altas velocidades de corte. Las virutas se ponen al rojo vivo y crean un riesgo de seguridad para el operador.

De la ecuación 21.19b y de los valores del exponente a, se puede ver que la velocidad de corte (V) influye mucho sobre la temperatura. La explicación es que al aumentar

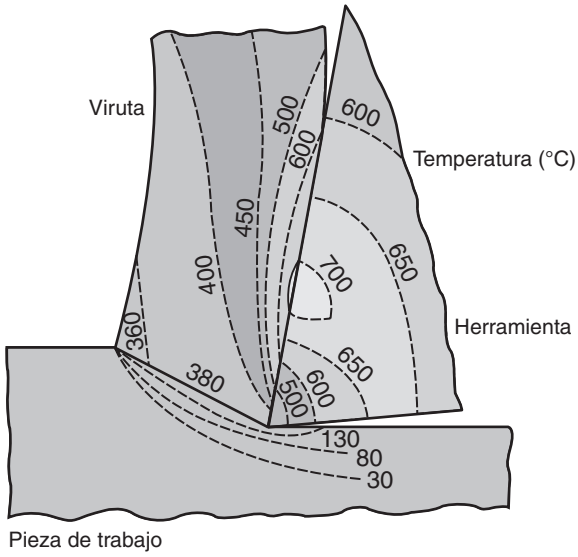


FIGURA 21.12 Distribución característica de temperaturas en la zona de corte. Obsérvese los severos gradientes de temperatura dentro de la herramienta y la viruta, y que la pieza de trabajo está relativamente fría. *Fuente:* G. Vieregge.

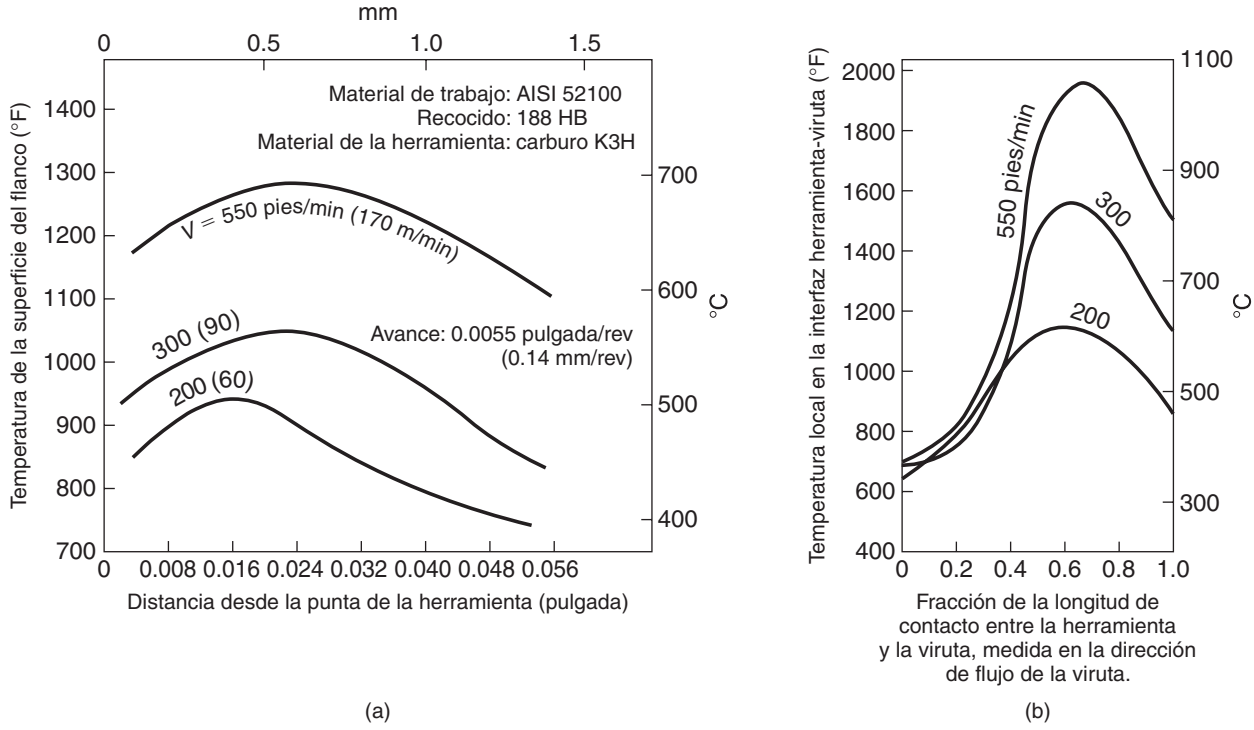


FIGURA 21.13 Temperaturas desarrolladas en el cilindrado de acero 52100: *(a)* distribución de temperaturas del flanco, y *(b)* distribución de temperaturas en la interfaz herramienta-viruta. *Fuente:* B. T. Chao y K. J. Trigger.

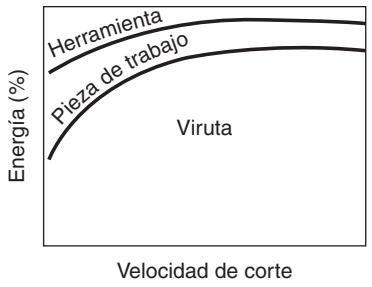


FIGURA 21.14 Proporción del calor generado en el corte transferido a la herramienta, la pieza de trabajo y la viruta, en función de la velocidad de corte. Obsérvese que la viruta retira la mayor parte del calor.

la velocidad disminuye el tiempo para disipar el calor, de ahí que la temperatura se eleve (convirtiéndose al final en casi un proceso adiabático). Este efecto de la velocidad puede demostrarse con facilidad frotando sus manos una contra la otra cada vez más rápido.

Como puede verse en la figura 21.14, la viruta retira la mayor parte del calor generado. Se ha estimado que durante una operación característica de maquinado, 90% de la energía se disipa en la viruta, mientras que el resto lo hace en la herramienta y en la pieza de trabajo. Obsérvese en esta figura que (al aumentar la velocidad de corte) la viruta retira una mayor proporción del calor total generado y menos calor va hacia la pieza de trabajo y la herramienta. Por esta razón las velocidades de maquinado se han incrementado de modo significativo a lo largo de los años (ver *maquinado de alta velocidad*, sección 25.5). El otro beneficio principal se asocia con la economía favorable que resulta al reducir el tiempo de maquinado, como se indica en la sección 25.8.

Técnicas para medir la temperatura. Las temperaturas y su distribución en la zona de corte se pueden determinar mediante **termopares** embebidos en la herramienta o en la pieza de trabajo. Esta técnica se ha utilizado con éxito, aunque implica un esfuerzo considerable. Es más fácil definir la temperatura *media* con la **fem térmica** (fuerza electromotriz) en la interfaz herramienta-viruta, que actúa como una *unión caliente* entre dos materiales diferentes (es decir, la herramienta y la viruta). Se puede supervisar la **radiación infrarroja** de la zona de corte mediante un *pirómetro de radiación*. Sin embargo, esta técnica sólo indica las temperaturas superficiales; la precisión de los resultados depende de la emisividad de las superficies, que es difícil determinar exactamente.

21.5 Vida útil de la herramienta: desgaste y falla

Se ha visto que las herramientas de corte se someten a *(a)* elevados esfuerzos localizados en la punta de la herramienta; *(b)* altas temperaturas, sobre todo a lo largo de la cara de ataque; *(c)* el deslizamiento de la viruta a lo largo de la cara de ataque, y *(d)* deslizamiento de la herramienta a lo largo de la superficie recién cortada de la pieza de trabajo. Estas condiciones inducen **desgaste de la herramienta**, que es un factor importante en todas las operaciones de maquinado, como lo son el desgaste del molde y de la matriz en la fundición y en el formado de los metales. El desgaste de la herramienta afecta de manera adversa la vida útil de la herramienta, la calidad de la superficie maquinada y su precisión dimensional, y, en consecuencia, la economía de las operaciones de corte.

El desgaste es un proceso gradual, muy parecido al desgaste de la punta de un lápiz ordinario. La rapidez de desgaste de la herramienta depende de los materiales de la misma y de la pieza de trabajo, de la geometría de la herramienta, de los parámetros del proceso, de los fluidos de corte y de las características de la máquina herramienta. El desgaste de la herramienta y los cambios en su geometría durante el corte se manifiestan de diferente manera; por lo general se clasifican como *desgaste del flanco*, *craterización*, *desgaste de la punta*, *muescado*, *deformación plástica de la punta de la herramienta*, *astillado* y *fractura gruesa* (fig. 21.15).

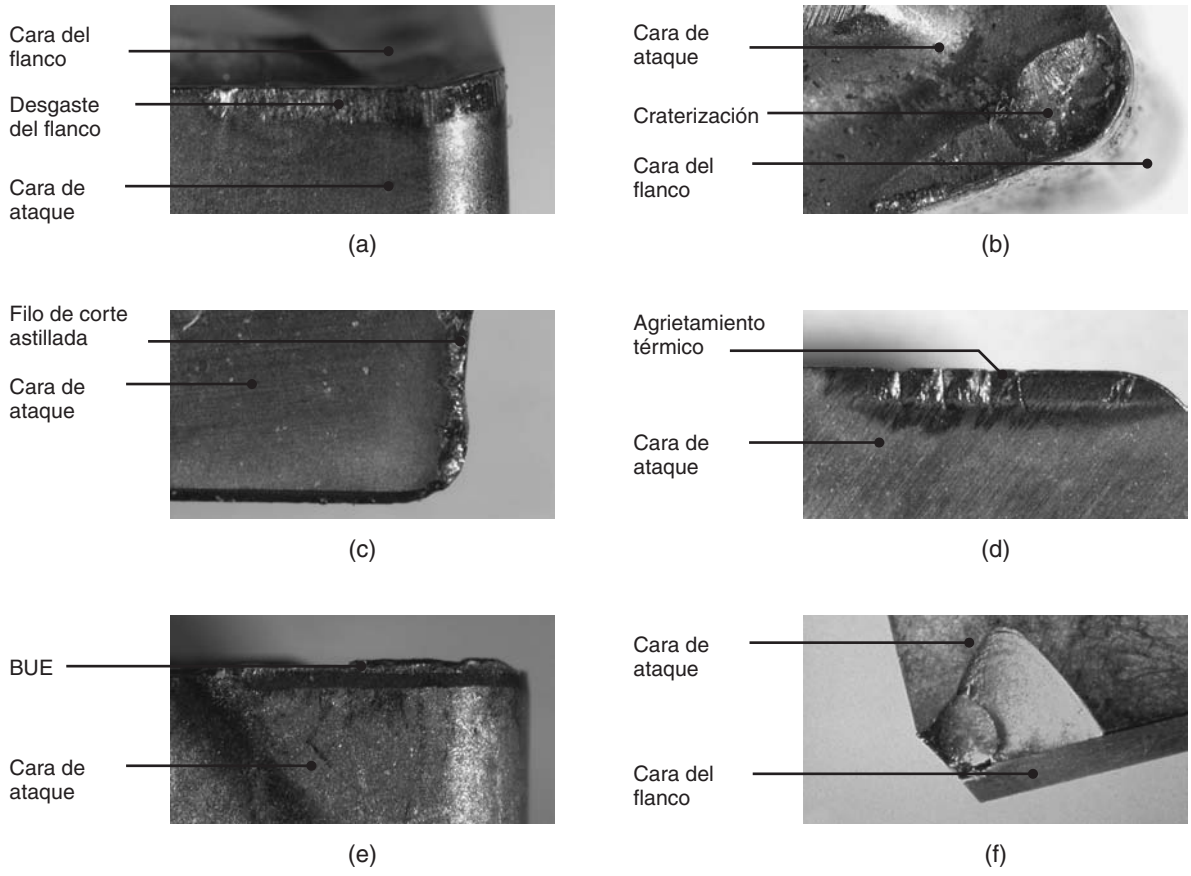


FIGURA 21.15 *(a)* Desgaste del flanco y craterización en una herramienta de corte; la herramienta se mueve a la izquierda, como en la figura 21.3. *(b)* Vista de la cara de ataque de una herramienta de cilindrado que muestra diversos patrones de desgaste. *(c)* Vista de la cara del flanco de una herramienta de cilindrado que muestra diversos patrones de desgaste. *(d)* Tipos de desgaste en una herramienta de cilindrado: 1. desgaste del flanco; 2. craterización; 3. filo de corte astillado; 4. agrietamiento térmico en la cara de ataque; 5. borde acumulado; 6. falla catastrófica. (Ver también fig. 21.18.) *Fuente:* Cortesía de Kennametal, Inc.

21.5.1 Desgaste del flanco

El *desgaste del flanco* ocurre en la cara de alivio (o flanco) de la herramienta (fig. 21.15a, c y d). Por lo general se atribuye a *(a)* rozamiento de la herramienta a lo largo de la superficie maquinada, lo que origina un desgaste adhesivo o abrasivo (ver sección 33.5), y *(b)* altas temperaturas, que afectan de manera adversa las propiedades del material de la herramienta.

En un estudio clásico de F. W. Taylor sobre el maquinado de aceros, conducido en la década de 1890, se estableció la siguiente relación aproximada:

$$VT^n = C \tag{21.20a}$$

donde V es la velocidad de corte, T el tiempo (en minutos) que se requiere para desarrollar una cierta **profundidad de desgaste** del flanco (mostrado como *VB* en la fig. 21.15c), n un exponente (que depende de los materiales de la herramienta y de la pieza de trabajo y de las condiciones de corte) y C una constante. Cada combinación de materiales de dicha pieza y de la herramienta y cada condición de corte tienen sus propios valores de n y C, los cuales se determinan de manera experimental. Sin embargo, por lo general, n depende del material de la herramienta, como se muestra en la tabla 21.3, y C del material de la pieza de trabajo. Obsérvese que la magnitud de C es la velocidad de corte a $T = 1$ min.

Para apreciar la importancia del exponente n, la ecuación 21.20 se puede reescribir como:

$$T = \left(\frac{C}{V}\right)^{\frac{1}{n}} \tag{21.20b}$$

en donde se puede ver que para valores constantes de C, cuanto menor sea el valor de n menor será la vida útil de la herramienta.

La velocidad de corte es la variable del proceso más importante asociada con la vida útil de la herramienta, seguida de la profundidad de corte y del avance (f). La ecuación 21.20 se puede modificar como sigue:

$$VT^n d^x f^y = C \tag{21.21}$$

donde d es la profundidad de corte y f el avance en mm/rev, o en pulgadas/rev, como se muestra en la figura 21.2. Los exponentes x y y deben determinarse de forma experimental para cada condición de corte. Si se considera $n = 0.15$, $x = 0.15$ y $y = 0.6$ como valores comunes encontrados en la práctica del maquinado, se puede ver que la velocidad de corte, la razón de avance y la profundidad de corte tienen una importancia decreciente.

Podemos reescribir la ecuación 21.21 como:

$$T = C^{1/n} V^{-1/n} d^{-x/n} f^{-y/n} \tag{21.22}$$

o, utilizando valores característicos, como

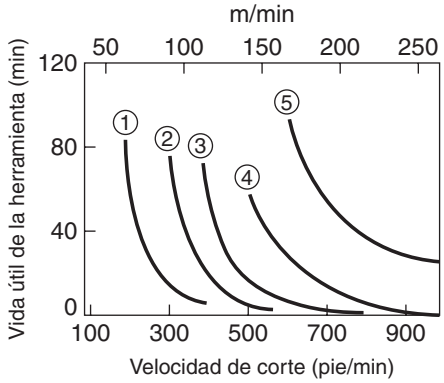
$$T \simeq C^7 V^{-7} d^{-1} f^{-4} \tag{21.23}$$

A partir de la ecuación 21.23, se pueden hacer las siguientes observaciones para obtener la misma vida útil de la herramienta: *(a)* si se incrementa el avance o la profundidad de corte, debe disminuirse la velocidad de corte (y viceversa), y *(b)* dependiendo de los exponentes, una reducción de la velocidad puede producir un incremento en el volumen del material retirado, debido al aumento del avance o de la profundidad de corte.

Curvas de vida útil de la herramienta. Las *curvas de la vida útil de la herramienta* son gráficas de datos experimentales obtenidas mediante pruebas de corte en diversos

TABLA 21.3

Intervalos de valores de *n* para la ecuación de Taylor (21.20a) en diversos materiales para herramientas	
Aceros de alta velocidad	0.08–0.2
Aleaciones fundidas	0.1–0.15
Carburos	0.2–0.5
Carburos recubiertos	0.4–0.6
Cerámicos	0.5–0.7



	Dureza (HB)	Ferrita	Perlita
① Fundido	265	20%	80%
② Fundido	215	40	60
③ Fundido	207	60	40
④ Recocido	183	97	3
⑤ Recocido	170	100	—

FIGURA 21.16 Efecto de la dureza y la microestructura de la pieza de trabajo sobre la vida útil de la herramienta en el cilindrado de hierro dúctil fundido. Obsérvese la rápida disminución de la vida útil de la herramienta (aproximándose a cero) conforme aumenta la velocidad de corte. Se han desarrollado materiales para herramientas que resisten altas temperaturas, entre ellos carburos, cerámicos y nitruro de boro cúbico, como se indicará en el capítulo 22.

materiales y en diferentes condiciones de corte, como el avance, la velocidad y la profundidad de corte, el material y la geometría de la herramienta y los fluidos de corte. Obsérvese en la figura 21.16, por ejemplo, que: *(a)* la vida útil de la herramienta disminuye con rapidez al aumentar la velocidad de corte; *(b)* las condiciones del material de la pieza de trabajo tienen una fuerte influencia en la vida útil de la herramienta, y *(c)* existe una gran diferencia en la vida útil de la herramienta para diferentes microestructuras del material de la pieza de trabajo.

El tratamiento térmico de la pieza de trabajo es importante, en gran medida debido a la dureza creciente de la misma. Por ejemplo, la ferrita tiene una dureza de alrededor de 100 HB, la perlita 200 HB y la martensita 300 a 500 HB. Las impurezas y los constituyentes duros en el material o en la superficie de la pieza (como óxido, cascarilla, escoria, etc.) también son factores importantes, porque su acción abrasiva reduce la vida útil de la herramienta.

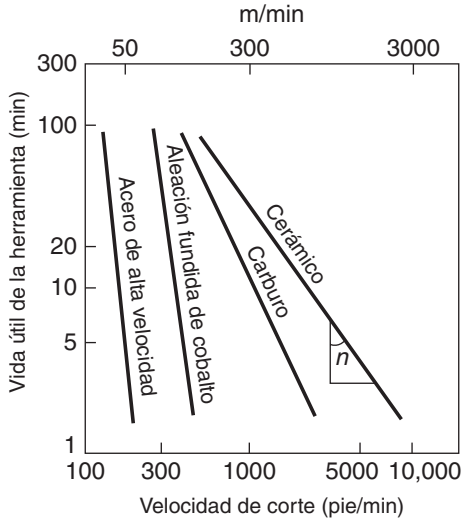


FIGURA 21.17 Curvas de vida útil de herramientas para varios materiales para herramientas de corte. El negativo inverso de la pendiente de estas curvas es el exponente n en la ecuación de Taylor para la vida útil de las herramientas, y C es la velocidad de corte a $T = 1$ min, que va de aproximadamente 200 a 10,000 pies/min en esta figura.

Por lo general, las curvas de la vida útil de la herramienta, de las cuales se puede determinar el exponente *n* (fig. 21.17), se trazan en escala logarítmica-logarítmica. Obsérvese que cuanto menor es el valor de *n*, más aguda es la curva, por lo que el desgaste de la herramienta aumenta con más rapidez al incrementarse la velocidad de corte. Aunque las curvas de vida útil de la herramienta son de alguna manera lineales para un intervalo limitado de velocidades de corte, raramente son lineales a lo largo de un intervalo grande. Además, el exponente *n* puede volverse *negativo* a bajas velocidades de corte, lo que significa que las curvas de vida útil de la herramienta pueden alcanzar un máximo y después curvarse hacia abajo. Debido a esta posibilidad, debe tenerse cuidado al usar ecuaciones de vida útil de la herramienta más allá del intervalo de velocidades corte en las que son aplicables.

La temperatura tiene una gran influencia en las propiedades físicas y mecánicas de los materiales, por lo que también puede esperarse que influya de manera importante en el desgaste. Por ello, al aumentar la temperatura, el desgaste del flanco se incrementa con rapidez.

EJEMPLO 21.2 Determinación de los coeficientes *C* y *n* en la ecuación de Taylor

Determine los valores de *C* y *n* en la ecuación de Taylor para los cuatro materiales para herramienta mostrados en la figura 21.17.

Solución Se ha indicado que el valor de *C* corresponde a la velocidad de corte para una vida útil de la herramienta de un minuto. Por extrapolación, las cuatro líneas de la figura 21.17 tienen una vida útil de un minuto (que en este caso es la abscisa). Encontramos que de HSS (acero de alta velocidad, por sus siglas en inglés) a cerámico, los valores de *C* son de alrededor de 200, 400, 3,000 y 11,000, respectivamente.

Los valores de *n* se obtienen de las pendientes inversas negativas de las líneas en una gráfica logarítmica-logarítmica. Después estimamos que:

Para HSS es 6°, o $n = 0.11$
Para la aleación de cobalto fundido es 8°, o $n = 0.14$
Para el carburo es 25°, o $n = 0.47$
Para el cerámico es 36°, o $n = 0.73$

Comparando con los valores dados en la tabla 21.3, observamos que nuestros estimados se encuentran dentro del intervalo de los valores dados de *n*.

EJEMPLO 21.3 Incremento de la vida de la herramienta mediante la reducción de la velocidad de corte

Mediante la ecuación 21.20a de Taylor para la vida útil de la herramienta, y permitiendo que $n = 0.5$ y $C = 400$, calcule el porcentaje de incremento de la vida útil de la herramienta cuando la velocidad de corte se reduce 50%.

Solución Debido a que $n = 0.5$, la ecuación de Taylor se puede reescribir como $VT^{0.5} = 400$. Denotemos como V_1 la velocidad inicial y V_2 la velocidad reducida; entonces $V_2 = 0.5V_1$. Como *C* es una constante igual a 400, tenemos la relación:

$$0.5V_1\sqrt{T_2} = V_1\sqrt{T_1}$$

Simplificando esta expresión, $T_2/T_1 = 1/0.25 = 4$. Esto indica que el cambio de vida útil de la herramienta es:

$$\frac{T_2 - T_1}{T_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right) - 1 = 4 - 1 = 3$$

o que la vida útil de la herramienta aumenta 300%. Por lo tanto, la reducción de la velocidad de corte ha producido un incremento importante en la vida útil de la herramienta. Obsérvese también que, para este problema, la magnitud de *C* no es relevante.

TABLA 21.4

Profundidad de desgaste permisible promedio (ver *VB* en la fig. 21.15c) para herramientas de corte en diversas operaciones de maquinado

Operación	Profundidad de desgaste permisible (mm)	
	Herramientas de acero de alta velocidad	Herramientas de carburo
Cilindrado	1.5	0.4
Fresado de careado	1.5	0.4
Fresado frontal	0.3	0.3
Taladrado	0.4	0.4
Rimado o escariado	0.15	0.15

Nota: La profundidad de desgaste para las herramientas de cerámico es aproximadamente 50% mayor. El muescado permisible ($VB_{máx}$) es unas dos veces *VB*.

Profundidad de desgaste permisible. Nos damos cuenta de que tenemos que afilar un cuchillo o un par de tijeras cuando se deteriora la calidad del corte o cuando las fuerzas necesarias para hacerlo son muy elevadas. De manera similar, las herramientas de corte requieren reemplazo (o reafilado) cuando *(a)* el acabado superficial de la pieza de trabajo maquinada comienza a deteriorarse; *(b)* las fuerzas de corte aumentan de manera significativa, o *(c)* la temperatura se eleva en forma importante. En la tabla 21.4 se da la profundidad *de desgaste permisible* (*VB* en la fig. 21.15c) para diversas condiciones de maquinado. Para mejorar la precisión dimensional, las tolerancias y el acabado superficial, la profundidad de desgaste permisible puede ser menor que los valores dados en la tabla.

Por lo general, la *velocidad recomendada de corte* para una herramienta de acero de alta velocidad es la que produce una vida útil de la herramienta de 60 a 120 min, y para una herramienta de carburo, una de 30 a 60 min. Sin embargo, dependiendo de la pieza de trabajo en particular, la operación y las consideraciones de alta productividad debidas al uso de máquinas herramienta modernas controladas por computadora, las velocidades de corte seleccionadas pueden variar de modo significativo con respecto a estos valores.

Velocidad óptima de corte. Se ha indicado que al aumentar la velocidad de corte, la vida útil de la herramienta se reduce con rapidez. Por otro lado, si dicha velocidad es baja, la vida de la herramienta es larga, pero la *rapidez* a la que se remueve material también es baja. Por ello, existe una *velocidad óptima de corte*. Como comprende otros parámetros, describiremos este tema en la sección 25.8.

EJEMPLO 21.4 Efecto de la velocidad de corte en la remoción de material

El efecto de la velocidad de corte en el volumen de metal removido entre los cambios de herramienta (o reafilado) se puede apreciar analizando la figura 21.16. Supóngase que se está maquinando un material en la condición "uno" (esto es, fundido, con una dureza de 265 HB). Se observa que cuando la velocidad de corte es 60 m/min, la vida útil de la herramienta es de unos 40 min. Entonces, la herramienta se desplaza una distancia de 60 m/min × 40 min = 2400 m antes de que se reemplace. Sin embargo, cuando la velocidad de corte se incrementa a 120 m/min, la vida de la herramienta se reduce a casi 5 min y la herramienta viaja 120 m/min × 5 min = 600 m antes que tenga que reemplazarse.

Como el volumen de material removido es directamente proporcional a la distancia que se ha desplazado la herramienta, se puede ver que *disminuyendo* la velocidad de corte se retira *más* material entre cambios de herramienta. Sin embargo, cuanto menor sea la velocidad de corte, más tiempo se requerirá para maquinar una parte, lo que tiene un impacto económico significativo en la operación (ver la sección 25.8).

21.5.2 Craterización

La *craterización* ocurre en la cara de ataque de la herramienta, como se muestra en las figuras 21.15a, b y d, y 21.18, que presenta diversos tipos de desgaste y fallas de las herramientas. Se puede ver con facilidad que la craterización cambia la geometría de contacto de la interfaz herramienta-viruta. Los factores más significativos que influyen sobre la craterización son *(a)* la temperatura en la interfaz herramienta-viruta, y *(b)* la afinidad química entre los materiales de la herramienta y la pieza de trabajo. Además, los factores que influyen en el desgaste del flanco también influyen en la craterización.

Por lo general, la craterización se atribuye a un **mecanismo de difusión**, esto es, el movimiento de átomos a través de la interfaz herramienta-viruta. Debido a que la rapidez de difusión aumenta con el incremento de temperatura, la craterización aumenta al mismo tiempo que la temperatura. Obsérvese en la figura 21.19, por ejemplo, cuán rápidamente se incrementa la craterización dentro de un intervalo estrecho de temperatura. El *recubrimiento* de las herramientas es un medio efectivo para reducir la velocidad del proceso de difusión, disminuyendo así la craterización. Los recubrimientos comunes son el nitruro de titanio, el carburo de titanio, el carbonitruro de titanio y el óxido de aluminio, que se describen con mayor detalle en la sección 22.6.

Si se comparan las figuras 21.12 y 21.15a, se puede ver que la ubicación de la profundidad máxima de craterización (*KT*) coincide con la ubicación de la *temperatura máxima* en la interfaz herramienta-viruta. En la figura 21.20 se muestra una sección transversal real de esta interfaz cuando se corta acero a altas velocidades. Nótese que el patrón de craterización en la herramienta coincide con el patrón de decoloración, que es una indicación de la presencia de temperaturas elevadas.

21.5.3 Otros tipos de desgaste, astillado y fractura

Ahora se describirán los factores comprendidos en otros tipos de desgaste y fractura de las herramientas de corte.

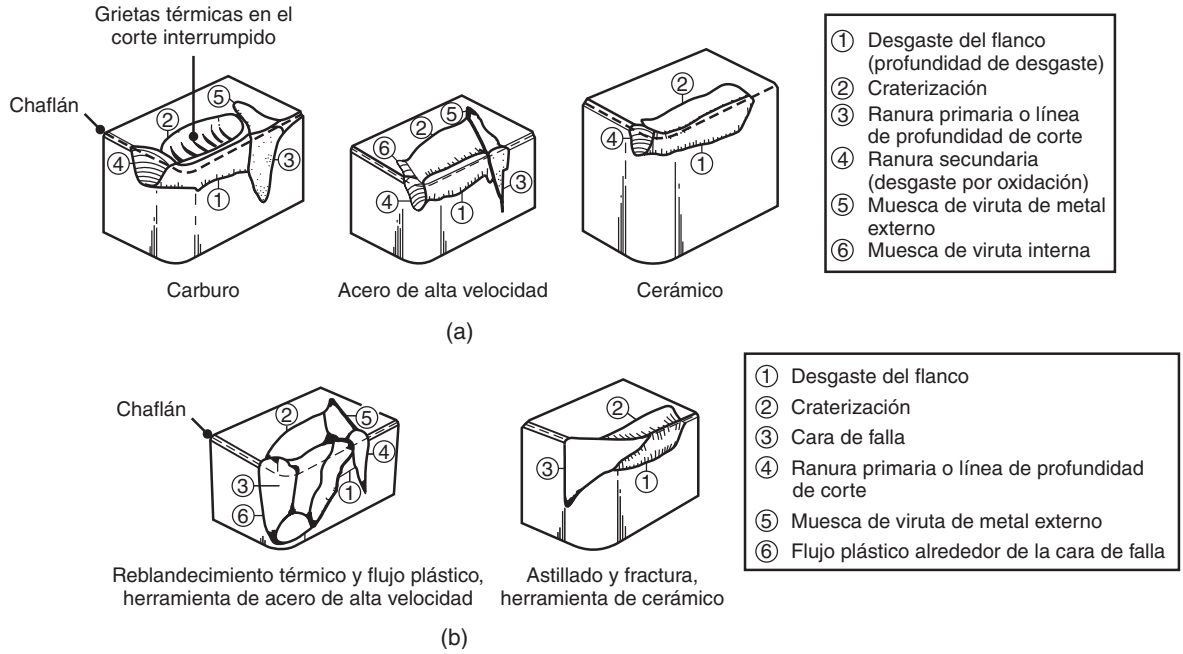


FIGURA 21.18 *(a)* Esquemas de los tipos de desgaste observados en diversas herramientas de corte. *(b)* Esquemas de fallas catastróficas de herramientas. Una gran variedad de parámetros influyen en estos patrones de desgaste y falla. *Fuente:* Cortesía de V. C. Venkatesh.

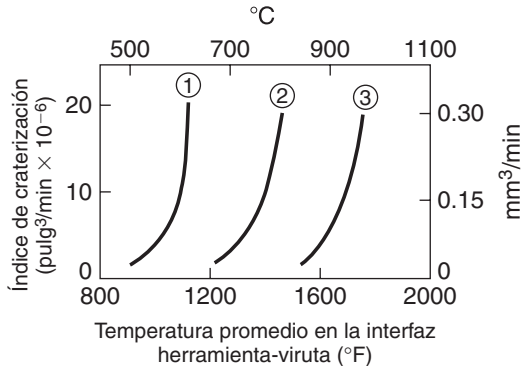


FIGURA 21.19 Relación entre el índice de craterización y la temperatura promedio de la interfaz herramienta-viruta: (1) acero de alta velocidad; (2) carburo C1, y (3) carburo C5 (ver la tabla 22.4). Obsérvese cómo el índice de craterización aumenta rápidamente con el incremento continuo de la temperatura. *Fuente:* B. T. Chao y K. J. Trigger.

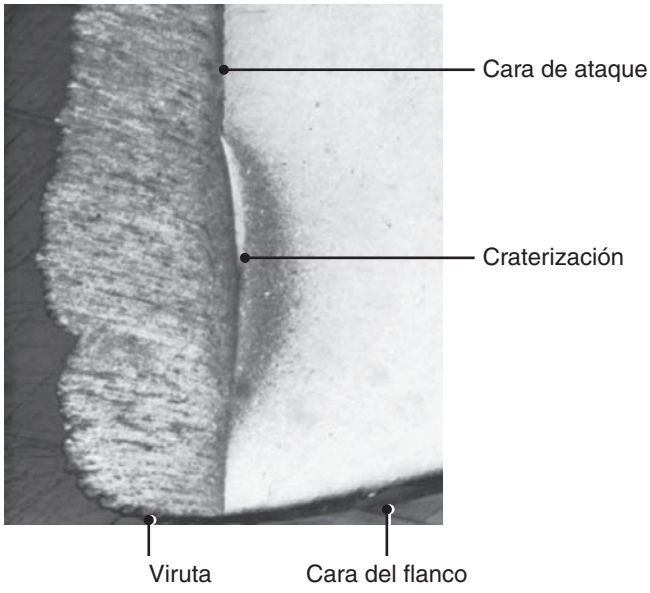


FIGURA 21.20 Interfaz de una herramienta de corte (a la derecha) y viruta (a la izquierda) en el maquinado de acero simple al carbono. La decoloración de la herramienta indica la presencia de altas temperaturas. Compárese esta figura con los perfiles de temperatura mostrados en la figura 21.12. *Fuente:* Cortesía de P. K. Wright.

El *desgaste de la punta* (fig. 21.15b) es el redondeo de una herramienta afilada, debido a los efectos mecánicos y térmicos. Esto desafila la herramienta, afecta la formación de viruta y provoca rozamiento de la herramienta sobre la pieza de trabajo, elevando su temperatura y posiblemente induciendo esfuerzos residuales en la superficie maquinada. Un fenómeno relacionado con éste es el *redondeo del filo*, como se muestra en la figura 21.15b y c.

La elevación de la temperatura es importante, en particular para las herramientas de acero de alta velocidad, como se puede apreciar en la figura 22.1. Las herramientas también pueden sufrir *deformación plástica* por las elevaciones de temperatura en la zona de corte, que con facilidad puede llegar a 1000 °C (1800 °F) en el maquinado de los aceros y ser más alta para materiales más fuertes.

La *muesca* o *ranura* observada en las herramientas de corte, como se muestra en las figuras 21.15b y c y 21.18, se ha atribuido al hecho de que esta región es el límite en el que la viruta ya no se encuentra en contacto con la herramienta. Conocida como la **línea de profundidad de corte** (DOC, por sus siglas en inglés) con una profundidad *VN*, dicho límite oscila debido a las variaciones inherentes en la operación de corte. Además, esta región está en contacto con la superficie maquinada generada durante el corte anterior; la delgada capa endurecida por trabajo que se puede desarrollar contribuye a la formación de ranuras de desgaste. Si es lo suficientemente profunda, la muesca puede provocar un astillado grave de la punta de la herramienta por su reducida sección transversal, así como la sensibilidad a las muescas del material de la herramienta.

La cascarilla y las capas de óxido en la superficie de una pieza de trabajo también contribuyen al desgaste de muesca, ya que estas capas son duras y abrasivas. Por lo tanto, no deben realizarse cortes ligeros sobre piezas de trabajo oxidadas, y la profundidad de corte debe ser mayor que el espesor de la película de óxido o de la capa endurecida por trabajo. En la figura 21.3, por ejemplo, la profundidad de corte (t_o) debe ser mayor que el espesor de las cascarillas en la pieza de trabajo.

Además del desgaste, las herramientas pueden sufrir *astillado*, en donde se rompe un pequeño fragmento del filo de la herramienta. Este fenómeno, que de manera característica ocurre en los materiales frágiles para herramientas, como los cerámicos, es similar al astillado de la punta de un lápiz si está demasiado afilado. Los fragmentos astillados de la herramienta de corte pueden ser muy pequeños (**microastillado** o **macroastillado**), o pueden ser relativamente grandes, llamados de diversas maneras como **astillado grueso**, **fractura gruesa** y **falla catastrófica** (figs. 21.15d y 21.18).

El astillado también puede ocurrir en una región de la herramienta donde ya existe una pequeña grieta o defecto. A diferencia del desgaste, que es un proceso gradual, el astillado es una súbita pérdida de material de la herramienta y el cambio correspondiente de su forma; como es de esperarse, tiene un efecto dañino importante en el acabado superficial, la integridad de la superficie y la precisión dimensional de la pieza de trabajo.

Dos causas principales del astillado son:

- El **impacto mecánico** (es decir, el impacto debido al corte interrumpido, como sucede al tornear una flecha estriada en un torno).
- La **fatiga térmica** (es decir, las variaciones cíclicas en la temperatura de la herramienta en el corte interrumpido).

Es común que las *grietas térmicas* sean perpendiculares al filo de corte de la herramienta, como se muestra en la cara de ataque de la herramienta de carburo en las figuras 21.15d y 21.18a. Las variaciones importantes en la composición del material de trabajo, o en su estructura, también pueden causar astillado.

El astillado se puede reducir seleccionando materiales para herramientas con resistencia al alto impacto y al choque térmico, como se describe en el capítulo 22. Los ángulos grandes positivos de ataque pueden contribuir al astillado debido al pequeño ángulo comprendido en la punta de la herramienta, como se puede visualizar en la figura 21.3. Igualmente, es posible que la región de craterización avance hacia la punta de la herramienta, debilitándola por el reducido volumen del material y provocando astillado.

21.5.4 Supervisión de las condiciones de la herramienta

Con las máquinas herramienta controladas por computadora y con la manufactura automatizada, el desempeño confiable y repetible de las herramientas de corte es un factor crítico. Como se indica en los capítulos 23 a 25, las máquinas herramienta modernas

operan con muy poca supervisión directa por parte de un operador y por lo común están cerradas, imposibilitando o dificultando la supervisión del maquinado y las condiciones de la herramienta. Por lo tanto, es fundamental supervisar continua e indirectamente las condiciones de la herramienta de corte para observar, por ejemplo, el desgaste, el astillado o una falla gruesa.

En las máquinas herramienta modernas, los sistemas de supervisión de las condiciones de las herramientas se encuentran integrados en el control numérico computarizado y en los controles lógicos programables. Las técnicas para supervisar dichas condiciones por lo común caen dentro de dos categorías generales: directas e indirectas.

El **método directo** para revisar las condiciones de una herramienta de corte comprende mediciones ópticas del desgaste, como la observación periódica de los cambios en el perfil de la herramienta. Ésta es una técnica común y confiable, y se aplica utilizando un microscopio (**microscopio de fabricantes de herramientas**). Sin embargo, requiere que se detenga la operación de corte para examinar la herramienta. Otro método directo consiste en programar la herramienta para que entre en contacto con un sensor después de cada ciclo de maquinado; esto permite detectar herramientas rotas. Por lo general, el sensor tiene la apariencia de un tornillo que debe oprimir la punta de la herramienta.

Los **métodos indirectos** de observación de las condiciones de las herramientas comprenden la correlación de dichas condiciones con parámetros como las fuerzas de corte, la potencia, la elevación de la temperatura, el acabado superficial de la pieza de trabajo, la vibración y el traqueteo. Una técnica poderosa es la técnica de emisión acústica (AE, por sus siglas en inglés), que utiliza un transductor piezoeléctrico montado sobre un portaherramientas. El transductor detecta emisiones acústicas (por lo regular de más de 100 kHz), resultantes de las ondas de esfuerzos generadas durante el corte. Al analizar las señales, se pueden supervisar el desgaste y el astillado de la herramienta. Esta técnica es muy efectiva en las operaciones de maquinado de precisión, donde las fuerzas de corte son bajas debido a las pequeñas cantidades de material removido. Otro uso efectivo de la AE es la detección de fracturas en pequeñas herramientas de carburo a altas velocidades de corte.

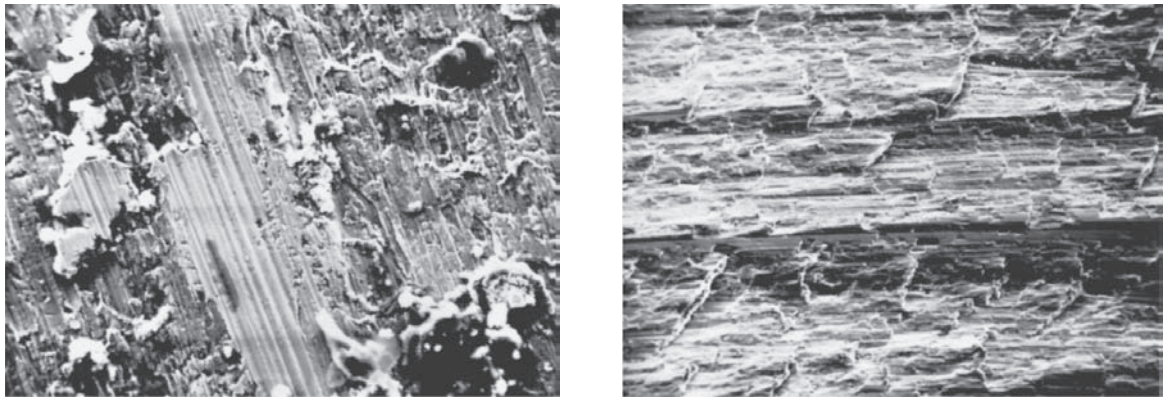
Un sistema indirecto semejante para supervisar las condiciones de las herramientas consta de **transductores** que se instalan originalmente en las máquinas herramienta, o que se retroalimentan a las máquinas existentes. Estos transductores supervisan en forma continua el torque y las fuerzas durante el corte. Las señales se preamplifican y un microprocesador analiza e interpreta su contenido. El sistema es capaz de diferenciar las señales que provienen de diferentes fuentes, como la rotura, el desgaste o la falta de una herramienta, la sobrecarga de la máquina herramienta o la colisión entre componentes de la máquina. El sistema también puede compensar el desgaste de la herramienta de manera automática, mejorando así la precisión dimensional de la parte que se está maquinando.

El diseño de los transductores debe ser tal que: *(a)* no interfieran en la operación de maquinado; *(b)* la detección de señales sea precisa y repetible; *(c)* sean resistentes al abuso y al ambiente imperante en el taller, y *(d)* sean efectivos en costo. En el desarrollo de sensores se han obtenido continuos avances, incluyendo el uso de técnicas *infrarrojas* y de *fibras ópticas* para medir la temperatura durante el maquinado.

En las máquinas herramientas de control numérico computarizado de menor costo, la supervisión se realiza mediante el **tiempo del ciclo de la herramienta**. En el ambiente de la producción, una vez que se ha determinado la expectativa de vida útil de una herramienta de corte o de un inserto, se puede anotar en la unidad de control de la máquina, a fin de que se le pida al operador que cambie la herramienta o el cortador cada que se alcanza dicho tiempo. Este proceso no es costoso y resulta muy confiable, aunque no totalmente, debido a la variación estadística inherente en la vida de la herramienta.

21.6 Acabado superficial e integridad

El acabado superficial influye no sólo en la precisión dimensional de las partes maquinadas, sino también en sus propiedades y en su desempeño durante el servicio. El término



(a) (b)

FIGURA 21.21 Superficies maquinadas, producidas sobre acero (amplificadas), observadas con un microscopio electrónico de barrido: *(a)* superficie cilindrada, y *(b)* superficie producida mediante cepillado. *Fuente:* Cortesía de J. T. Black y S. Ramalingam.

acabado superficial describe las características geométricas de una superficie (ver capítulo 33), en tanto que *integridad superficial* se refiere a las propiedades del material, como la resistencia a la fatiga y la resistencia a la corrosión, que se ven fuertemente influidas por la naturaleza de la superficie producida.

Con su efecto significativo sobre el perfil de la punta de la herramienta, el *borde acumulado* (o *recrecido*) tiene la mayor influencia sobre el acabado superficial. En la figura 21.21 se muestran las superficies obtenidas en dos diferentes operaciones de corte. Obsérvese el daño considerable que el BUE causa a las superficies; se manifiesta en marcas de rayado que se desvían de las ranuras rectas que deberían ser el resultado del maquinado normal, como se ve en la figura 21.2. Por lo general, las herramientas de cerámico y de diamante producen un mejor acabado superficial que otras, en gran parte debido a su menor tendencia a formar un BUE.

Una herramienta *desafilada, o mellada,* tiene un radio grande entre sus filos, al igual que la punta de un lápiz o el extremo de corte de un cuchillo desafilado. En la figura 21.22 se ilustra la relación entre el radio del filo de corte y la profundidad de corte en el corte ortogonal. Nótese que a pequeñas profundidades de corte, el ángulo de ataque se vuelve negativo y la herramienta simplemente puede deslizarse sobre la superficie de la pieza de trabajo en lugar de cortarla y producir virutas. Éste es un fenómeno parecido al

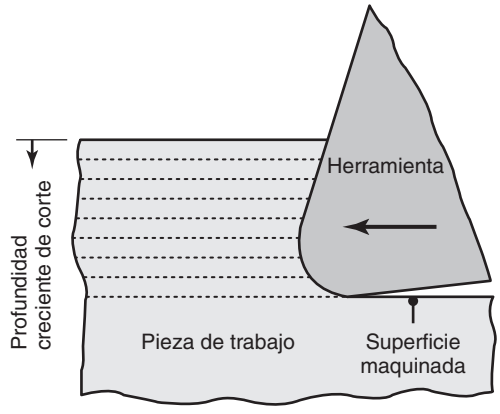


FIGURA 21.22 Esquema de una herramienta desafilada con respecto a la profundidad de corte en maquinado de corte ortogonal (exagerado). Obsérvese que la herramienta tiene un ángulo positivo de ataque, pero al disminuir la profundidad de corte, el ángulo de ataque se puede volver negativo. La herramienta simplemente se desliza sobre la pieza de trabajo (sin cortar) y pule su superficie; esta acción eleva la temperatura de la pieza y provoca esfuerzos residuales superficiales.

de tratar de raspar una capa delgada de la superficie de una barra de mantequilla con un cuchillo desafilado.

Si el *radio de la punta* de la herramienta (no confundir con el radio R en la fig. 21.15b) es grande en relación con la profundidad de corte, la herramienta simplemente roza sobre la superficie maquinada. El rozamiento genera calor e induce esfuerzos superficiales residuales, que a su vez pueden ocasionar daño superficial, como desgarramiento y agrietamiento. En consecuencia, la profundidad de corte debe ser mayor que el radio del filo de corte.

En una operación de cilindrado, al igual que en otros procesos de corte, la herramienta deja un perfil espiral (**marcas del avance**) sobre la superficie maquinada conforme se mueve a través de la pieza de trabajo, como se muestra en las figuras 21.2 y 21.23. Cuanto mayor sea el avance (f) y menor el radio de la punta de la herramienta (R), más prominentes serán estas marcas. Se puede demostrar que la rugosidad de la superficie para dicho caso está dada por:

$$R_a = \frac{f^2}{8R} \tag{21.24}$$

donde R_a es el valor medio aritmético, como se indica en la sección 33.3. Aunque no son significativas en las operaciones de maquinado de desbaste, las marcas del avance son importantes en el maquinado de acabado. Conforme se analicen, se darán mayores detalles sobre la rugosidad superficial para procesos individuales de maquinado.

En la sección 25.4 se describen con detalle la *vibración* y el *traqueteo*. Por ahora debe reconocerse que, si la herramienta vibra o traquetea durante el corte, afecta de manera adversa el acabado superficial de la pieza de trabajo. La razón es que una herramienta que vibra cambia periódicamente las dimensiones del corte. Un traqueteo excesivo también puede provocar astillado y falla prematura de las herramientas de corte más frágiles, como los cerámicos y el diamante.

Los factores que influyen en la *integridad superficial* son:

- Las temperaturas generadas durante el proceso y las posibles transformaciones metalúrgicas.
- Esfuerzos residuales superficiales.
- Deformación plástica severa y endurecimiento por deformación de las superficies maquinadas, desgarrado y agrietamiento.

Cada uno de estos factores puede tener efectos adversos importantes sobre la parte maquinada, pero es posible cuidar este aspecto mediante una selección cuidadosa y el mantenimiento de las herramientas de corte y control de las variables del proceso.

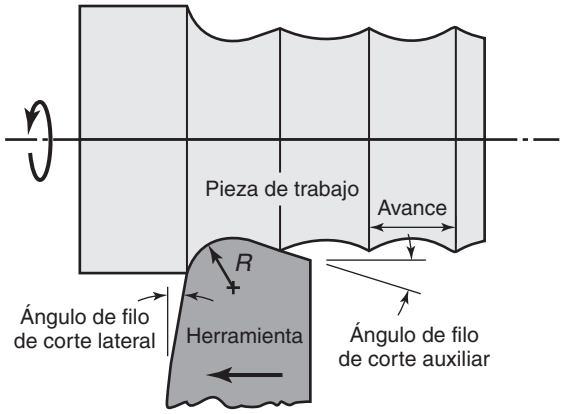


FIGURA 21.23 Esquema de las marcas de avance (exageradas) sobre una superficie que se está cilindrando.

Debe enfatizarse la diferencia entre *maquinado de acabado* y *maquinado de desbaste*. En el primero es esencial considerar el acabado superficial a producir, mientras que en el segundo el principal propósito es retirar una gran cantidad de material a una velocidad elevada; el acabado superficial no es una consideración fundamental, ya que se mejorará durante el maquinado de acabado. Desde luego, es importante que durante el maquinado de desbaste no se produzcan daños subsuperficiales que no se puedan eliminar durante el maquinado de acabado (ver fig. 21.21).

21.7 Maquinabilidad

La *maquinabilidad* de un material se define por lo general en términos de cuatro factores:

1. El acabado superficial y la integridad superficial de la parte maquinada.
2. La vida útil de la herramienta.
3. La fuerza y potencia requeridas.
4. El nivel de dificultad de control de la viruta.

Entonces, una buena maquinabilidad indica un buen acabado superficial y una buena integridad superficial, una larga vida útil de la herramienta y bajos requerimientos de fuerza y de potencia. Por lo que se refiere al control de la viruta, y como se estableció antes en relación con las virutas continuas, las virutas largas, delgadas, filamentosas y rizadas pueden interferir de manera severa en la operación de corte al atorarse en la zona de corte.

La compleja naturaleza de las operaciones de corte hace difícil establecer relaciones que definan en forma cuantitativa la maquinabilidad de un material en particular. En la práctica de maquinado, por lo general, se considera que la vida útil de la herramienta y la rugosidad superficial son los factores más importantes de la maquinabilidad. Aunque ya no se usan mucho debido a su naturaleza cualitativa y engañosa, por muchos años ha existido la **capacidad** (**índice**) **de maquinabilidad** para cada tipo material y sus condiciones.

En estos índices, el material estándar es el acero AISI 1112 (desulfurado), con una capacidad de 100. Esto significa que para una vida útil de una herramienta de 60 min, este acero debe maquinarse a una velocidad de 100 pies/min (30 m/min). Ejemplos de índices comunes son: acero 3140 a 55; latón de corte libre a 300; 2011 aluminio forjado a 200; hierro gris perlítico a 70; y acero 17–7 endurecible por precipitación a 20.

Estos aspectos cualitativos de la maquinabilidad no son suficientes (desde luego) para guiar al operador de una máquina a fin de que determine los parámetros de maquinado para producir una parte en forma económica. De ahí que, en capítulos posteriores, presentamos varias tablas en las que, para diversos grupos de materiales, se dan *recomendaciones específicas* respecto de parámetros como el avance, la velocidad, la profundidad y las herramientas de corte y su forma, y el tipo de fluidos de corte.

21.7.1 Maquinabilidad de los metales ferrosos

En esta sección se describe la maquinabilidad de los aceros, aceros aleados, aceros inoxidables e hierros fundidos.

Aceros. Los aceros se encuentran entre los materiales más importantes de la ingeniería (como se indicó también en el capítulo 5), por lo que se ha estudiado ampliamente su maquinabilidad. Los aceros al carbono tienen un amplio intervalo de maquinabilidad, según su ductilidad y su dureza. Si son demasiado dúctiles, la formación de viruta puede producir un borde acumulado y provocar un acabado superficial deficiente; si el acero es demasiado duro, puede originar un desgaste abrasivo a la herramienta debido a la presencia de carburos en el acero. Desde el punto de vista de la maquinabilidad, son deseables los aceros al carbono trabajados en frío.

Un grupo importante de aceros es el de los **aceros de libre maquinado**, que contienen azufre y fósforo. El *azufre* forma inclusiones de sulfuro de manganeso (partículas de segunda fase), que actúan como elevadores de esfuerzo en la zona de cizallado primario.

El resultado es que las virutas producidas se rompen con facilidad y son pequeñas, mejorando así la maquinabilidad. El tamaño, forma, distribución y concentración de estas inclusiones influye de manera significativa en la maquinabilidad. Elementos como el *telurio* y el *selenio*, ambos químicamente similares al azufre, actúan como *modificadores de inclusiones* en los aceros desulfurados.

El *fósforo* tiene dos efectos principales en los aceros: *(a)* refuerza la ferrita, provocando un aumento de la dureza y una mejor formación de viruta y acabado superficial, y *(b)* incrementa la dureza, causando así la formación de virutas cortas en lugar de filamentosas continuas y mejorando la productividad. Obsérvese que puede ser difícil maquinar los aceros blandos por su tendencia a formar bordes acumulados y por el deficiente acabado superficial resultante.

En los **aceros al plomo**, un alto porcentaje de plomo se solidifica en las puntas de las inclusiones de sulfuro de manganeso. En los grados no desulfurados de acero, el plomo toma la forma de partículas finas dispersas. Es insoluble en hierro, cobre y aluminio y sus aleaciones. Debido a su baja resistencia al cizallamiento, el plomo actúa como lubricante *sólido* y se distribuye sobre la interfaz herramienta-viruta durante el corte.

Cuando la temperatura desarrollada se eleva de manera suficiente, como en el caso de altas velocidades de corte y avances, el plomo se funde directamente en frente de la herramienta, actuando como un lubricante *líquido*. Además de este efecto, el plomo reduce el esfuerzo cortante en la zona primaria de cizallamiento, disminuyendo así las fuerzas de corte y el consumo de potencia. El plomo se puede usar con todos los grados de acero y se identifica por la letra "L" entre el segundo y el tercer números de la identificación del acero (por ejemplo, 10L45). (Nótese que en los aceros inoxidables el uso similar de la letra *L* significa "bajo carbono", una condición que mejora su resistencia a la corrosión).

Sin embargo, debido a que el plomo es una *toxina* bien conocida y un contaminante, existen serios problemas ambientales ocasionados por su uso en los aceros (se estima que cada año se consumen 4,500 toneladas de plomo en la producción de aceros). Por lo tanto, existe una tendencia continua hacia la eliminación del uso de plomo en los aceros (**aceros sin plomo**). El *bismuto* y el *estaño* lo han sustituido, aunque su desempeño no es tan elevado.

Los **aceros desoxidados con calcio** contienen hojuelas de óxidos de silicatos de calcio (CaSO), que a su vez reducen la resistencia de la zona secundaria de cizallamiento y disminuyen la fricción y el desgaste en la interfaz herramienta-viruta. Por lo tanto, también se reduce la elevación de la temperatura. En consecuencia, estos aceros producen menos craterización, sobre todo a altas velocidades de corte.

Los **aceros aleados** tienen una amplia variedad de composiciones y durezas. En consecuencia, no se puede generalizar su maquinabilidad, aunque tienen mayores niveles de dureza y otras propiedades mecánicas. Una tendencia importante en el maquinado de estos aceros es el torneado duro, descrito con detalle en la sección 25.6. Mediante herramientas de corte de nitruro de boro cúbico policristalino, los aceros aleados con niveles de dureza de 45 a 65 HRC se pueden maquinar con buen acabado, integridad superficial y precisión dimensional.

Efectos de diversos elementos en los aceros. La presencia de *aluminio* y *silicio* en los aceros siempre es nociva, porque estos elementos se combinan con el oxígeno para producir óxido de aluminio y silicatos, que son duros y abrasivos. El resultado es que aumenta el desgaste de la herramienta y se reduce la maquinabilidad.

El *carbono* y el *manganeso* tienen diversos efectos en la maquinabilidad de los aceros, dependiendo de su composición. Los aceros simples de bajo carbono (menos de 0.15% de C) pueden producir un acabado superficial deficiente al formar bordes acumulados o recrecidos. Los aceros fundidos son más abrasivos, aunque su maquinabilidad es similar a la de los aceros forjados. Los aceros para herramentales y matrices son muy difíciles de maquinar y por lo general requieren recocido antes del maquinado. La maquinabilidad de la mayoría de los aceros se mejora mediante el trabajado en frío, que endurece el material y reduce la tendencia a la formación de bordes acumulados.

Otros elementos de aleación (como *níquel*, *cromo*, *molibdeno* y *vanadio*) que mejoran las propiedades de los aceros, por lo general reducen la maquinabilidad. El efecto del *boro* es despreciable. Los elementos gaseosos como el *hidrógeno* y el *nitrógeno* pueden tener consecuencias particularmente dañinas en las propiedades del acero. Se ha demostrado que el *oxígeno* tiene un fuerte efecto sobre la relación de aspecto de las inclusiones de sulfuro de manganeso: cuanto mayor es el contenido de oxígeno, menor será la relación de aspecto y mayor la maquinabilidad.

Sin embargo, al mejorar la maquinabilidad de los aceros, es importante considerar los posibles efectos nocivos de los elementos de aleación en las propiedades y la resistencia de la parte maquinada durante el servicio. Por ejemplo, a temperaturas elevadas el plomo provoca la *fragilización* de los aceros (fragilización líquido-metal y fragilización en caliente; ver sección 1.4.2), aunque a temperatura ambiente no tiene efectos sobre las propiedades mecánicas.

El azufre puede reducir en forma severa la capacidad de trabajado en caliente de los aceros, debido a la formación de sulfuro de hierro (a menos que exista suficiente manganeso para evitar dicha formación). A temperatura ambiente, las propiedades mecánicas de los aceros desulfurados dependen de la orientación de las inclusiones deformadas de sulfuro de manganeso (anisotropía). Los aceros refosforados son menos dúctiles y sólo se producen para mejorar la maquinabilidad.

Aceros inoxidables. Por lo general, es difícil maquinar los aceros austeníticos (serie 300). El traqueteo puede constituir un problema, requiriendo máquinas herramienta con mayor rigidez. Los aceros inoxidables ferríticos (serie 400) tienen buena maquinabilidad. Los aceros martensíticos (la serie 400) son abrasivos, tienden a formar bordes acumulados y requieren materiales para herramientas con alta resistencia en caliente y resistencia a la craterización. Los *aceros inoxidables endurecibles por precipitación* también son fuertes y abrasivos; por tanto, necesitan materiales para herramientas duros y resistentes a la abrasión.

Hierros fundidos. Por lo general, los *hierros grises* son maquinables, pero pueden ser abrasivos, dependiendo de su composición, sobre todo la perlita. Los carburos libres en las fundiciones reducen su maquinabilidad y provocan el astillado o la fractura de la herramienta. Los hierros *nodulares* y *maleables* son maquinables utilizando materiales duros para herramientas.

21.7.2 Maquinabilidad de los metales no ferrosos

A continuación se da un resumen de la maquinabilidad de metales y aleaciones no ferrosas, en orden alfabético del metal.

Aleaciones con base de cobalto, son abrasivas y altamente endurecibles por trabajo. Requieren materiales para herramientas afiladas y resistentes a la abrasión, así como bajos avances y velocidades.

Aleaciones y superaleaciones con base níquel, se endurecen por trabajo, son abrasivas y fuertes a altas temperaturas. Su maquinabilidad depende de sus condiciones y mejora con el recocido.

Aluminio, por lo general es muy fácil maquinarlo, aunque los grados más suaves tienden a formar un borde acumulado, lo que produce un acabado superficial deficiente. Por lo tanto, se recomiendan altas velocidades de corte, así como ángulos grandes de ataque y de alivio. Las aleaciones forjables de aluminio con alto contenido de *silicio* y las aleaciones de aluminio fundido suelen ser abrasivas, de ahí que requieran materiales más duros para herramientas. El control de las tolerancias dimensionales puede ser un problema en el maquinado del aluminio, ya que tiene un alto coeficiente de dilatación térmica y un módulo elástico relativamente bajo.

Berilio, por lo general es maquinable, pero debido a que las finas partículas producidas durante el maquinado son tóxicas, requiere maquinarse en un ambiente controlado.

Cobre, en la condición de forjado puede ser difícil de maquinar debido a la formación de bordes acumulados, aunque las aleaciones de cobre fundido se pueden maquinar fácilmente. Los latones pueden maquinarse sin problemas, sobre todo con la adición de plomo (*latón al plomo de libre maquinado*). Sin embargo, debe considerarse la toxicidad del plomo. Los bronces son más difíciles de maquinar que los latones.

Magnesio, se maquina con mucha facilidad, buen acabado superficial y una vida útil prolongada de la herramienta. Sin embargo, debe tenerse cuidado debido a su alta relación de oxidación (*pirofórica*) y al riesgo de incendio.

Molibdeno, es dúctil y se endurece por trabajo. Puede producir un acabado superficial deficiente; por lo tanto, son fundamentales las herramientas afiladas.

Tantalio, se endurece muy bien por trabajo, es dúctil y blando. Produce un acabado superficial deficiente y el desgaste de la herramienta es elevado.

Titanio y sus aleaciones, tienen conductividad térmica muy deficiente (la menor de todos los metales), lo que provoca un aumento significativo de la temperatura y borde acumulado. Son altamente reactivas y pueden ser difíciles de maquinar.

Tungsteno, es frágil, fuerte y muy abrasivo, de ahí que su maquinabilidad sea baja, aunque mejora en gran medida a temperaturas elevadas.

Zirconio, tiene buena maquinabilidad, pero requiere un fluido de corte del tipo refrigerante debido al riesgo de explosión e incendio.

21.7.3 Maquinabilidad de materiales diversos

Por lo general, los **termoplásticos** tienen baja conductividad térmica, un bajo módulo elástico y se suavizan por la temperatura. En consecuencia, maquinarlos requiere herramientas afiladas con ángulos positivos de ataque (para reducir las fuerzas de corte), ángulos grandes de alivio, pequeñas profundidades de corte y avance, velocidades relativamente altas y soporte apropiado de la pieza de trabajo. Puede ser necesario el enfriamiento externo de la zona de corte para evitar que las virutas se vuelvan gomosas y se peguen a las herramientas. El enfriamiento suele obtenerse mediante una corriente de aire, niebla de vapor o aceites solubles en agua.

Los **plásticos termofijos** son frágiles y sensibles a los gradientes térmicos durante el corte; en general, las condiciones de maquinado son similares a las de los termoplásticos.

Los **compósitos con matriz de polímero** son muy abrasivos debido a las fibras presentes, de ahí que sean difíciles de maquinar. El desgarre de las fibras, el jalado y la delaminación de los extremos son problemas significativos y pueden llevar a una severa reducción de la capacidad de carga del componente maquinado. El maquinado de estos materiales requiere un manejo cuidadoso y la remoción de los restos para evitar el contacto con ellos o la inhalación de las fibras.

Los **compósitos de matriz metálica** y **de matriz cerámica** pueden ser difíciles de maquinar, dependiendo de las propiedades del material de la matriz y de las fibras de refuerzo.

El **grafito** es abrasivo; requiere herramientas afiladas, duras y resistentes a la abrasión.

Los **cerámicos** tienen una maquinabilidad mejorada continuamente, en particular con el desarrollo de *cerámicos maquinables* y *nanocerámicos* (sección 8.2.5) y con la selección de los parámetros apropiados de procesamiento, como el *corte a régimen dúctil* (descrito en la sección 25.7).

La **madera** es un material ortotrópico con propiedades variables respecto de su dirección de grano. En consecuencia, el tipo de virutas y las superficies producidas varían de manera significativa, lo que depende también del tipo de madera y de sus condiciones. El trabajo de la madera, que data del año 3000 a.C., se mantiene en mayor medida como un arte. En general, dos requerimientos básicos son las herramientas afiladas y altas velocidades de corte.

21.7.4 Maquinado asistido térmicamente

Los metales y aleaciones que son difíciles de maquinar a temperatura ambiente pueden maquinarse con más facilidad a temperaturas elevadas. En el *maquinado asistido térmi-*

camente (también llamado **maquinado en caliente**) se concentra una fuente de calor (como un soplete, bobina de inducción, corriente eléctrica, rayo láser, haz de electrones y arco de plasma) en un área justo delante de la herramienta de corte. Investigada por primera vez en la década de 1940, esta operación suele efectuarse por encima de la temperatura homóloga de $T/T_m = 0.5$ (ver sección 1.7 y las tablas 1.2 y 3.1). Así, por ejemplo, los aceros se maquinan en caliente por arriba del intervalo de temperatura de 650 °C a 750 °C (1200 °F a 1400 °F). Aunque es difícil y complicado efectuarla en las plantas de producción, las ventajas generales del maquinado en caliente son: *(a)* fuerzas reducidas de corte; *(b)* incremento de la vida útil de la herramienta; *(c)* mayores velocidades de remoción de material, y *(d)* reducción de la tendencia a la vibración y el traqueteo.

RESUMEN

- Con frecuencia, los procesos de maquinado son necesarios para proporcionar la precisión dimensional deseada, así como características geométricas y de acabado superficial a los componentes, en particular a los de formas complejas que no se pueden producir de manera económica o mediante otras técnicas de formado. En general estos procesos requieren mayor tiempo, desperdician material en la forma de virutas y pueden tener efectos adversos en las superficies producidas.
- Los tipos de viruta que por lo común se observan en el maquinado son continuo, de borde acumulado, discontinuo y aserrado. Variables importantes en el proceso de maquinado son la forma y el material de la herramienta; condiciones de corte como velocidad, avance y profundidad de corte; el uso de fluidos de corte; y las características del material de la pieza de trabajo y la máquina herramienta. Los parámetros sobre los que influyen estas variables son las fuerzas y el consumo de potencia; el desgaste de la herramienta; el acabado y la integridad superficiales; la elevación de la temperatura, y la precisión dimensional de la pieza de trabajo.
- El aumento de la temperatura es un factor importante, ya que puede tener efectos adversos sobre la vida útil de la herramienta y sobre la precisión dimensional y la integridad superficial de la parte maquinada.
- Dos tipos principales de desgaste de la herramienta son el desgaste del flanco y la craterización. El desgaste de la herramienta depende de las características del material de la pieza de trabajo y de la herramienta; el avance, la velocidad, la profundidad y los fluidos de corte; y las características de la máquina herramienta. La falla de la herramienta también puede ocurrir por muescado, astillado y fractura gruesa.
- El acabado superficial de los componentes maquinados puede dañar la integridad del producto. Variables importantes son la geometría y las condiciones de la herramienta de corte, el tipo de viruta producida y las variables del proceso.
- En general, la maquinabilidad se define en términos de acabado superficial, vida útil de la herramienta, fuerza y requerimientos de potencia y control de la viruta. La maquinabilidad de los materiales depende de su composición, propiedades y microestructura. Por lo tanto, es importante una selección apropiada y el control de las variables del proceso.

TÉRMINOS CLAVE

Acabado superficial
Acero desulfurado
Acero refosforado
Ángulo de alivio
Ángulo de ataque
Ángulo de cizallamiento
Ángulo de fricción
Ángulo de holgura
Ángulo de inclinación
Astillado de la herramienta
Borde acumulado o recrecido
Corte oblicuo
Corte ortogonal
Craterización
Desgaste del flanco

Ecuación de Taylor
Emisión acústica
Energía específica
Fuerza de corte
Fuerza de empuje
Índice de maquinabilidad
Integridad superficial
Línea de profundidad de corte
Máquina herramienta
Maquinabilidad
Maquinado
Maquinado en caliente
Marcas de avance
Muescado
Pelado
Plano de cizallamiento
Profundidad de desgaste
Rasurado
Relación de corte
Rizo de la viruta
Rompe virutas
Supervisión de las condiciones de la herramienta
Vida útil de la herramienta
Viruta
Viruta aserrada
Viruta continua
Viruta discontinua
Zona primaria de cizallamiento
Zona secundaria de cizallamiento

BIBLIOGRAFÍA

Astakhov, V. P., *Metal Cutting Mechanics*, CRC Press, 1998.
ASM Handbook, Vol. 16: *Machining*, ASM International, 1989.
Boothroyd, G. y Knight, W. A., *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, 2a. ed., Marcel Dekker, 1989.
Brown, J., *Advanced Machining Technology Handbook*, McGraw-Hill, 1998.
Davis, J. R. (ed.), *Tool Materials*, ASM International, 1995.
DeVries, W. R., *Analysis of Material Removal Processes*, Springer, 1992.
Juneja, B. L., *Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools*, Wiley, 1987.
Kalpakjian, S. (ed.), *Tool and Die Failures: Source Book*, ASM International, 1982.
Metal Cutting Tool Handbook, 7a. ed., Industrial Press, 1989.
Meyers, A. L. y Slattery, T., *Basic Machining Reference Handbook*, Industrial Press, 1988.
Oxley, P. L. B., *Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability,* Wiley, 1989.
Shaw, M. C., *Metal Cutting Principles,* 2a. ed., Oxford, 2005.
Stephenson, D. A. y Agapiou, J. S., *Metal Cutting Theory and Practice*, Marcel Dekker, 1997.
Stout, K. J., Davis, E. J. y Sullivan, P. J., *Atlas of Machined Surfaces*, Chapman and Hall, 1990.
Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4a. ed., Vol. 1: *Machining* Society of Manufacturing Engineers, 1983.
Trent, E. M. y Wright, P. K., *Metal Cutting*, 4a. ed., Butterworth Heinemann, 2000.
Walsh, R. A., *McGraw-Hill Machining and Metalworking Handbook*, McGraw-Hill, 1994.

PREGUNTAS DE REPASO

21.1 Explique por qué las virutas continuas pueden no ser necesariamente deseables.
21.2 Nombre los factores que contribuyen a la formación de virutas discontinuas.
21.3 Explique la diferencia entre ángulos de ataque positivo y negativo. ¿Qué importancia tiene el ángulo de ataque?
21.4 Comente el papel y la importancia del ángulo de alivio.
21.5 Explique la diferencia entre virutas discontinuas y virutas segmentadas.
21.6 ¿Por qué debería interesarnos la magnitud de la fuerza de empuje en el corte?
21.7 ¿Cuáles son las diferencias entre el corte ortogonal y el oblicuo?
21.8 ¿Existe alguna ventaja en tener un borde acumulado o recrecido en una herramienta? Explique su respuesta.
21.9 ¿Cuál es la función de los rompevirutas? ¿Cómo funcionan?
21.10 Identifique las fuerzas comprendidas en una operación de corte. De estas fuerzas, ¿cuáles contribuyen a la potencia requerida?
21.11 Explique las características de los distintos tipos de desgaste de la herramienta.
21.12 Liste los factores que contribuyen a un acabado superficial deficiente en el corte.
21.13 Explique qué significa y qué implica el término *maquinabilidad*. ¿Por qué el titanio tiene una maquinabilidad deficiente?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

21.14 ¿Están relacionadas la ubicación de la temperatura máxima y de la craterización? De ser así, explique por qué.
21.15 ¿Es importante la ductilidad del material para la maquinabilidad? Explique su respuesta.
21.16 Explique por qué es importante estudiar los tipos de virutas producidas para entender las operaciones de corte.
21.17 ¿Por qué cree que la temperatura máxima en el corte ortogonal se localiza casi a la mitad de la interfaz herramienta-viruta? (*Sugerencia:* observe que las dos fuentes de calor son *(a)* cizallamiento en su plano primario, y *(b)* fricción en la interfaz herramienta-viruta).
21.18 La vida útil de una herramienta puede ser casi infinita a bajas velocidades de corte. ¿Entonces recomendaría que todo el maquinado se hiciera a bajas velocidades? Explique su respuesta.
21.19 Explique las consecuencias de permitir que se eleven las temperaturas a niveles altos durante el corte.
21.20 La fuerza de corte aumenta con la profundidad de corte y reduciendo el ángulo de ataque. Explique por qué.
21.21 ¿Por qué no siempre es recomendable aumentar la velocidad de corte para incrementar la velocidad de producción?
21.22 ¿Cuáles son las consecuencias si se astilla una herramienta de corte?
21.23 ¿Cuáles son los efectos de realizar una operación de corte con una herramienta desafilada? ¿Y con una muy afilada?
21.24 ¿A qué factores atribuye la diferencia de energías específicas cuando se maquinan los materiales mostrados en la tabla 21.2? ¿Por qué existe un intervalo de energías para cada grupo de materiales?
21.25 Explique por qué es posible retirar más material entre el reafilado de las herramientas, reduciendo la velocidad de corte.
21.26 Al observar que la dimensión d en la figura 21.4a es muy pequeña, explique por qué la rapidez de deformación cortante en el corte de metales es tan elevada.
21.27 Explique la importancia de la ecuación 21.7.
21.28 Comente sus observaciones en relación con las figuras 21.12 y 21.13.
21.29 Describa las consecuencias de exceder la profundidad permisible de desgaste (tabla 21.4) en diversos materiales para herramientas de corte.
21.30 Comente sus observaciones respecto de las variaciones de dureza mostradas en la figura 21.6a.
21.31 ¿Por qué en el corte la temperatura depende del avance, la velocidad y la profundidad de corte? Explique en términos de las variables correspondientes del proceso.
21.32 Observará que los valores de a y b en la ecuación 21.19b son mayores para los aceros de alta velocidad que para los carburos. ¿Por qué es así?
21.33 Como se muestra en la figura 21.14, el porcentaje de la energía total de corte que retira la viruta aumenta con la velocidad de corte. ¿Por qué?
21.34 Describa los efectos que una herramienta desafilada puede tener sobre las operaciones de corte.
21.35 Explique si es deseable tener valores elevados o bajos para *(a)* n, y *(b)* C en la ecuación de Taylor para la vida útil de la herramienta.
21.36 La curva de la vida útil para las herramientas de cerámicos de la figura 21.17 se encuentra a la derecha de la de otros materiales para herramienta. ¿Por qué?
21.37 ¿Por qué las temperaturas de la herramienta son bajas a velocidades mínimas de corte y elevadas a altas velocidades de corte?
21.38 ¿Se puede realizar el maquinado de alta velocidad sin el uso de un fluido de corte?
21.39 Dados sus conocimientos sobre el proceso básico de corte de metales, ¿cuáles son las propiedades físicas y químicas importantes de una herramienta de corte?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

21.40 Permite que $n = 0.5$ y $C = 300$ en la ecuación de Taylor para el desgaste de la herramienta. ¿Cuál es el incremento porcentual de la vida útil de la herramienta si se reduce la velocidad de corte *(a)* 30%, y *(b)* 50%?
21.41 Suponga que, en corte ortogonal, el ángulo de ataque es 15° y el coeficiente de fricción es 0.2. Mediante la ecuación 21.3, determine el incremento porcentual en el espesor de la viruta cuando se duplica la fricción.

21.42 Derive la ecuación 21.11.
21.43 Tomando el carburo como un ejemplo y mediante la ecuación 21.19b, determine cuánto debe reducirse el avance para mantener constante la temperatura cuando se triplica la velocidad de corte.
21.44 Utilizando las relaciones trigonométricas, derive una expresión para la relación de energía de cizallamiento respecto de la energía de fricción en el corte ortogonal, sólo en términos de los ángulos α, β y ϕ.
21.45 Se está efectuando una operación de corte ortogonal en las siguientes condiciones: $t_o = 0.1$ mm, $t_c = 0.2$ mm, ancho de corte = 5 mm, $V = 2$ m/s, ángulo de ataque = 10°, $F_c = 500$ N y $F_t = 200$ N. Calcule el porcentaje de la energía total que se disipa en el plano de cizallamiento.
21.46 Explique cómo haría para estimar los valores de C y n para los materiales de las cuatro herramientas mostradas en la figura 21.17.
21.47 Derive las ecuaciones 21.1.
21.48 Suponga que, en un corte ortogonal, el ángulo de ataque (α) es 25° y el ángulo de fricción (β) es 30° en la interfaz viruta-herramienta. Determine el porcentaje de cambio del espesor de la viruta si el ángulo de fricción es 50°. (*Nota:* no utilice las ecuaciones 21.3 o 21.4).
21.49 Demuestre que, para el mismo ángulo de cizallamiento, existen dos ángulos de ataque que dan la misma relación de corte.
21.50 Con los diagramas apropiados, demuestre cómo el uso de un fluido de corte puede cambiar la magnitud de la fuerza de empuje (F_t) en la figura 21.11.
21.51 Para una operación de cilindrado que usa una herramienta de corte de cerámico, si la velocidad aumenta 50%, ¿por cuál factor debe modificarse la relación de avance para obtener una vida útil constante de la herramienta? Utilice $n = 0.5$ y $y = 0.6$.
21.52 En el ejemplo 21.3, si se duplica la velocidad de corte (V), ¿será diferente la respuesta? Explique su respuesta.
21.53 Mediante la ecuación 21.24, seleccione un avance apropiado para $R = 1$ mm y una rugosidad deseada de 1 μm. ¿Cómo ajustaría este avance para permitir que la punta de la herramienta se desgaste en tiempos de corte más largos? Explique su razonamiento.
21.54 Utilizando una herramienta de corte de carburo, la temperatura en una operación de corte con una velocidad de 300 pies/min y un avance de 0.002 pulgada/rev se mide como 1200 °F. ¿Cuál es la temperatura aproximada si se duplica la velocidad? ¿Qué velocidad se requiere para reducir la temperatura máxima de corte a 900 °F?
21.55 Suponga que es un instructor que cubre los temas descritos en este capítulo y que está entregando un cuestionario sobre los aspectos numéricos para poner a prueba los conocimientos de los estudiantes. Elabore dos problemas cuantitativos y proporcione las respuestas.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

21.56 Como hemos visto, las virutas retiran la mayor parte del calor generado durante el maquinado. Si no tuvieran esta capacidad, ¿qué sugerencias haría para efectuar los procesos de maquinado sin calor excesivo? Explique su respuesta.
21.57 La vida útil de la herramienta se incrementa mucho al implantarse un medio efectivo de enfriamiento y lubricación. Diseñe métodos para proveer este fluido a la zona de corte y discuta las ventajas y limitaciones de su diseño.
21.58 Diseñe un arreglo experimental en el que se pueda simular el corte ortogonal en una operación de cilindrado en un torno.
21.59 ¿Cree que las virutas generadas durante el maquinado pueden utilizarse para fabricar productos útiles? Dé algunos ejemplos de posibles productos y comente sus características y diferencias si se fabricaran mediante otros procesos de manufactura. ¿Qué tipos de virutas serían deseables para este propósito?
21.60 Se estableció que las herramientas de corte se pueden diseñar para que la longitud de contacto entre la herramienta y la viruta se reduzca, ahuecando la cara de ataque de la herramienta a cierta distancia de la punta. Explique las posibles ventajas de dicha herramienta.
21.61 Se estableció que el mecanismo de formación de viruta también se puede observar raspando la superficie de una barra de mantequilla con un cuchillo afilado. Utilizando mantequilla a diferentes temperaturas, incluso congelada, efectúe un experimento como ése. Mantenga constante la profundidad de corte y sostenga el cuchillo a diferentes ángulos (para simular el ángulo de ataque de la herramienta), incluyendo el raspado oblicuo. Describa sus observaciones respecto del tipo de virutas producidas. También comente la fuerza que siente su mano al raspar y

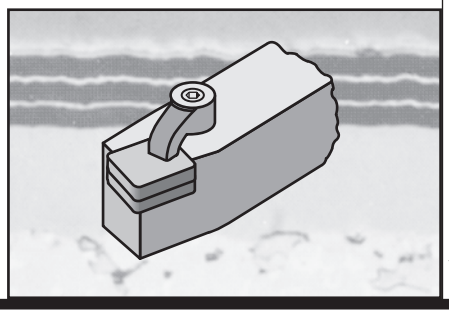
si observa algún traqueteo cuando la mantequilla está muy fría.

21.62 Algunos experimentos han demostrado que es posible producir virutas delgadas y anchas, hasta de 0.08 mm (0.003 pulgada) de espesor y 10 mm (4 pulgadas) de anchura, que serían similares a una hoja laminada. Los materiales han sido aluminio, magnesio y acero inoxidable. Un arreglo característico sería similar al del corte ortogonal, maquinando la periferia de una barra redonda sólida con una herramienta recta, que se desplaza radialmente hacia dentro. Diga lo que piensa sobre la producción de láminas metálicas mediante este método, sus características superficiales y sus propiedades.

21.63 Diga lo que piensa sobre el reciclado de virutas producidas durante el maquinado en una planta. Incluya consideraciones respecto de las virutas producidas mediante corte en seco contra las producidas mediante maquinado con un fluido de corte.

Materiales para herramientas de corte y fluidos de corte

CAPÍTULO 22



Para seguir con la cobertura de los fundamentos de corte en el capítulo precedente, ahora describimos dos elementos esenciales en el maquinado (mecanizado): los materiales para las herramientas y los fluidos de corte. En específico:

- Tipos y características de los materiales para herramientas de corte.
- Propiedades y aplicaciones de los aceros de alta velocidad, los carburos, los cerámicos, el nitruro de boro cúbico y el diamante.
- Recubrimientos en herramientas, su composición y cómo funcionan.
- Tipos de fluidos de corte y sus aplicaciones.
- Tendencias en el maquinado casi seco y en seco.

22.1 Introducción 647
22.2 Aceros de alta velocidad 652
22.3 Aleaciones de cobalto fundido 653
22.4 Carburos 653
22.5 Herramientas recubiertas 656
22.6 Cerámicos con base de alúmina 661
22.7 Nitruro de boro cúbico 662
22.8 Cerámicos con base de nitruro de silicio 663
22.9 Diamante 663
22.10 Materiales para herramientas reforzados con triquitas 664
22.11 Costos y reacondicionamiento de las herramientas 664
22.12 Fluidos de corte 665

EJEMPLOS:

22.1 El papel que juegan los elementos de aleación en las herramientas de corte de aceros de alta velocidad 652
22.2 Efectos de los fluidos de corte en el maquinado 666

22.1 Introducción

La selección de los materiales que se utilizarán en las herramientas de corte para una aplicación en particular es uno de los factores más importantes en las operaciones de maquinado, como lo es la selección del material para moldes y matrices (dados) en los procesos de formado y moldeado. A lo largo de este capítulo discutiremos las propiedades básicas y las características de desempeño de los tipos más importantes de materiales para herramientas de corte, lo que nos ayudará en su selección. Sin embargo, como será obvio, la compleja naturaleza de este tema no siempre sirve al determinar los materiales apropiados para las herramientas, de ahí que también debamos confiar en guías y *recomendaciones* que se han acumulado en la industria durante muchos años. Comenzaremos con el capítulo 23, donde se presentará información sobre recomendaciones de materiales para herramientas, materiales de piezas de trabajo y operaciones específicas de maquinado.

Como se indicó en el capítulo precedente, la herramienta de corte se somete a *(a)* temperaturas elevadas; *(b)* esfuerzos de contacto elevados; *(c)* rozamiento a lo largo de la interfaz herramienta-viruta y a lo largo de la superficie maquinada. En consecuencia, el material de la herramienta de corte debe poseer las siguientes características:

- **Dureza en caliente:** para que se mantengan la dureza, resistencia y resistencia al desgaste de la herramienta a las temperaturas habituales en las operaciones de maquinado. Esto asegura que la herramienta no sufra alguna deformación plástica y, por ende, retenga su forma y filo. En la figura 22.1 se muestra la dureza del material para herramientas en función de la temperatura. Obsérvese la amplia respuesta de

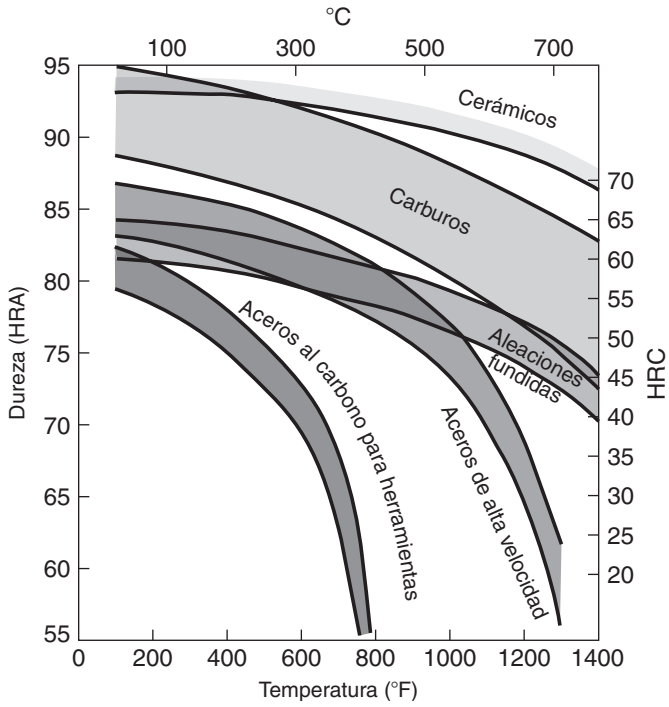


FIGURA 22.1 Dureza de diversos materiales para herramientas de corte en función de la temperatura (dureza en caliente). El amplio intervalo en cada grupo de materiales se debe a la variedad de composiciones de las herramientas y a los tratamientos disponibles para cada grupo.

estos materiales y (sin ser sorpresivo) lo bien que los cerámicos mantienen su dureza a temperaturas elevadas. Las herramientas de aceros al carbono se utilizaron como materiales para herramientas hasta el desarrollo de los aceros de alta velocidad a principios del siglo XX. Los aceros al carbono para herramientas comienzan a perder su dureza con rapidez, incluso a temperaturas moderadas, lo que significa que no se pueden emplear en maquinado a altas velocidades (y de ahí a altas temperaturas). En consecuencia, la capacidad de producción sería baja y los costos elevados.

- **Tenacidad** y **resistencia al impacto** (impacto mecánico): para que las fuerzas de impacto sobre la herramienta, que se repiten en operaciones de corte interrumpido (como el fresado, torneado de una flecha estriada en un torno, o debido a la vibración y el traqueteo durante el maquinado), no astillen o fracturen la herramienta.
- **Resistencia al impacto térmico**: para soportar los ciclos rápidos de temperatura encontrados en el corte interrumpido.
- **Resistencia al desgaste**: para obtener una vida útil aceptable de la herramienta antes de reemplazarla.
- **Estabilidad química** y **neutralidad**: con respecto al material a maquinar, para evitar o minimizar cualquier reacción adversa, adhesión y difusión en la herramienta-viruta que pudiera contribuir al desgaste de la herramienta.

Para responder a estos demandantes requerimientos, a lo largo de los años se han desarrollado diversos materiales para herramientas de corte con una amplia variedad de propiedades mecánicas, físicas y químicas, como se muestra en la tabla 22.1. Las propiedades

TABLA 22.1

Propiedades generales de los materiales para herramientas

Propiedad	Aceros de alta velocidad	Aleaciones de cobalto fundido	Carburos		Cerámicos	Nitruro de boro cúbico	Diamante monocristalino *
			WC	TiC			
Dureza	83–86 HRA	82–84 HRA 46–62 HRC	90–95 HRA 1800–2400 HK	91–93 HRA 1800–3200 HK	91–95 HRA 2000–3000 HK	4000–5000 HK	7000–8000 HK
Resistencia a la compresión,							
MPa	4100–4500	1500–2300	4100–5850	3100–3850	2750–4500	6900	6900
psi $\times 10^3$	600–650	220–335	600–850	450–560	400–650	1000	1000
Resistencia a la ruptura transversal,							
MPa	2400–4800	1380–2050	1050–2600	1380–1900	345–950	700	1350
psi $\times 10^3$	350–700	200–300	150–375	200–275	50–135	105	200
Resistencia al impacto,							
J	1.35–8	0.34–1.25	0.34–1.35	0.79–1.24	<0.1	<0.5	<0.2
pulg.-lb	12–70	3–11	3–12	7–11	<1	<5	<2
Módulo de elasticidad,							
GPa	200	—	520–690	310–450	310–410	850	820–1050
psi $\times 10^6$	30	—	75–100	45–65	45–60	125	120–150
Densidad,							
kg/m^3	8600	8000–8700	10,000–15,000	5500–5800	4000–4500	3500	3500
lb/pulg^3	0.31	0.29–0.31	0.36–0.54	0.2–0.22	0.14–0.16	0.13	0.13
Volumen de fase dura, %	7–15	10–20	70–90	—	100	95	95
Temperatura de fusión o de descomposición,							
°C	1300	—	1400	1400	2000	1300	700
°F	2370	—	2550	2550	3600	2400	1300
Conductividad térmica, W/m K	30–50	—	42–125	17	29	13	500–2000
Coeficiente de expansión térmica, $\times 10^{-6}$/°C	12	—	4–6.5	7.5–9	6–8.5	4.8	1.5–4.8

*En general, los valores para el diamante policristalino son más bajos, excepto por la resistencia al impacto, que es mayor.

indicadas en la primera columna son útiles al determinar las características deseables de los materiales para herramientas para una aplicación en particular. Así, por ejemplo:

- La dureza y la resistencia son importantes en relación con la dureza y resistencia del material de la pieza de trabajo a maquinar.
- La resistencia al impacto es importante para producir cortes interrumpidos en el maquinado, como en el caso del fresado.
- La temperatura de fusión del material para herramientas es importante contra las temperaturas desarrolladas en la zona de corte.
- Las propiedades físicas de conductividad térmica y coeficiente de dilatación térmica son importantes para determinar la resistencia a la fatiga térmica y al impacto térmico de los materiales para herramientas.

Sin embargo, debe reconocerse que las propiedades deseables en las herramientas para una operación de maquinado particular pueden parecer contradictorias respecto de las propiedades de la herramienta de corte. Esta situación se puede ver con claridad en la tabla 22.2, observando las direcciones opuestas de las flechas horizontales largas. Como ejemplos: *(a)* los aceros de alta velocidad son tenaces, pero tienen una dureza en caliente limitada, y *(b)* los materiales cerámicos tienen alta resistencia a la temperatura y al desgaste, pero son frágiles y pueden astillarse. Obsérvese también que el costo de las herramientas aumenta conforme nos movemos hacia la derecha en la tabla 22.2: de aceros de alta velocidad (HSS, por sus siglas en inglés) a diamante (que es el más costoso).

En la tabla 22.3 se muestran las características de operación de los materiales para herramientas en el maquinado. En general, dichos materiales se dividen en las siguientes categorías, indicadas según el orden en que se desarrollaron e implantaron en la indus-

TABLA 22.2

Características generales de los materiales para herramientas de corte (estos materiales para herramientas tienen una amplia variedad de composiciones y propiedades. En muchas categorías de materiales para herramientas existen traslapes)

	Aceros de alta velocidad	Aleaciones de cobalto fundido	Carburos no recubiertos	Carburos recubiertos	Cerámicos	Nitruro de boro cúbico policristalino	Diamante
Dureza en caliente	→	→	→	→	→	→	→
Tenacidad	←	←	←	←	←	←	←
Resistencia al impacto	←	←	←	←	←	←	←
Resistencia al desgaste	→	→	→	→	→	→	→
Resistencia al astillado	←	←	←	←	←	←	←
Velocidad de corte	→	→	→	→	→	→	→
Resistencia al impacto térmico	←	←	←	←	←	←	←
Costo del material de la herrramienta	→	→	→	→	→	→	→
Profundidad de corte	De ligera a profunda	De ligera a profunda	De ligera a profunda	De ligera a profunda	De ligera a profunda	De ligera a profunda	Muy ligera para el diamante monocristalino
Método de procesamiento	Forjado, fundido, sinterizado HIP*	Fundido y sinterizado HIP	Prensado en frío y sinterizado	CVD o PVD†	Prensado en frío y sinterizado o sinteri- zado HIP	Sinterizado de alta presión y alta temperatura	Sinterizado de alta presión y alta temperatura

Fuente: R. Komanduri

*Prensado isostático en caliente.

†Deposición química de vapor, deposición física de vapor.

TABLA 22.3

Características generales de operación de los materiales para herramientas de corte

Materiales para herramientas	Características generales	Modos de desgaste o falla de las herramientas	Limitaciones
Aceros de alta velocidad	Alta tenacidad, resistencia a la fractura, amplio intervalo de cortes de desbaste y acabado, buenos para cortes interrumpidos.	Desgaste del flanco, craterización.	Baja resistencia en caliente, capacidad limitada de endurecimiento y limitada resistencia al desgaste.
Carburos no recubiertos	Alta dureza para un amplio intervalo de temperaturas, tenacidad, resistencia al desgaste, variedad de aplicaciones amplia y versátil.	Desgaste del flanco, craterización.	No se puede usar a bajas velocidades debido al soldado en frío de las virutas y el microastillado.
Carburos recubiertos	Mejor resistencia al desgaste que los carburos no recubiertos, mejores propiedades térmicas y de fricción.	Desgaste del flanco, craterización.	No se puede usar a bajas velocidades debido al soldado en frío de las virutas y el microastillado.
Cerámicos	Alta dureza a temperaturas elevadas, alta resistencia al desgaste abrasivo.	Muescado de línea de profundidad de corte, microastillado, fractura gruesa.	Baja resistencia mecánica y baja resistencia a la fatiga termomecánica.
Nitruro de boro cúbico policristalino (cBN)	Alta resistencia en caliente, tenacidad, resistencia del filo de corte.	Muescado de línea de profundidad de corte, astillado, oxidación, grafitización.	Baja resistencia y baja estabilidad química a temperaturas altas.
Diamante	Alta dureza y tenacidad, resistencia al desgaste abrasivo.	Astillado, oxidación, grafitización.	Baja resistencia y baja estabilidad química a temperaturas altas.

Fuente: R. Komanduri y otras fuentes.

tria. Obsérvese que muchos de estos materiales también se utilizan para matrices y moldes en fundición, formado y moldeado de materiales metálicos y no metálicos.

1. Aceros de alta velocidad.
2. Aleaciones de cobalto fundido.
3. Carburos.
4. Herramientas recubiertas.
5. Cerámicos con base alúmina.
6. Nitruro de boro cúbico.
7. Cerámicos con base de nitruro de silicio.
8. Diamante.
9. Materiales reforzados con triquitas y nanomateriales.

Los aceros al carbono son los materiales para herramientas más antiguos y se han utilizado ampliamente en brocas, machuelos, brocas y rimas desde la década de 1880. Después se desarrollaron aceros de baja y media aleación para aplicaciones similares, pero con una vida útil más larga de la herramienta. Aunque son económicos y es fácil darles forma y afilarlos, estos aceros no tienen la suficiente dureza en caliente ni la resistencia al desgaste para cortar a altas velocidades, cuando la temperatura se eleva de manera significativa. Su uso se limita a operaciones de baja velocidad de corte, de ahí que no tengan una importancia particular en la manufactura moderna.

En este capítulo se describe lo siguiente:

- Las características, aplicaciones y limitaciones de estos materiales para herramientas en las operaciones de maquinado, incluyendo las características requeridas que hemos señalado y los costos correspondientes.

- El intervalo aplicable de las variables de proceso para un desempeño óptimo.
- Los tipos y características de los fluidos de corte y sus aplicaciones específicas en una amplia variedad de operaciones de maquinado.

22.2 Aceros de alta velocidad

Las herramientas de *acero de alta velocidad* (HSS) se llaman así porque se desarrollaron para maquinar a mayores velocidades de las que era posible hacerlo antes. Producidos por primera vez a principios del siglo XX, los *aceros de alta velocidad* son los que tienen mayor aleación de todos los aceros para herramientas. Se pueden endurecer a diferentes profundidades, poseen buena resistencia al desgaste y son relativamente económicos. Debido a su tenacidad (de ahí su alta resistencia a la fractura), los aceros de alta velocidad son adecuados para: *(a)* herramientas de ángulos grandes y positivos de ataque (es decir, aquellas con pequeños ángulos comprendidos); *(b)* cortes interrumpidos, *(c)* máquinas herramienta con baja rigidez, sujetas a vibración y traqueteo, y *(d)* herramientas complejas y de una sola pieza, como brocas, rimas, machuelos y cortadores de engranes. Su limitación más importante (por su baja resistencia en caliente) es que las velocidades de corte son bajas, en relación con las de las herramientas de carburo, como se puede ver en la figura 22.1.

Existen dos tipos básicos de aceros de alta velocidad: **al molibdeno** (serie M) y **al tungsteno** (serie T). La serie M contiene hasta 10% de Mo, con Cr, V, W y Co como elementos de aleación. La serie T contiene de 12% a 18% de W, con Cr, V y Co como elementos de aleación. Los carburos formados en el acero constituyen de 10% a 20% en volumen. En general, la serie M tiene mayor resistencia a la abrasión que la serie T, sufre menos distorsión durante el tratamiento térmico y es menos costosa. En consecuencia, 95% de todos los aceros de alta velocidad para herramientas se producen con la serie M. La tabla 5.6 incluye tres de estos aceros y sus características.

Existen aceros de alta velocidad para herramientas ya conformadas (laminados o forjados), fundidas y para metalurgia de polvos (sinterización). Se pueden **recubrir** para mejorar su desempeño, como se indica en la sección 22.5. Los aceros de alta velocidad para herramientas también se pueden someter a *tratamientos superficiales* (como endurecimiento superficial para mejorar la dureza y la resistencia al desgaste, ver sección 4.10) o a tratamiento con vapor a temperaturas elevadas para desarrollar una capa dura de óxido negro *(azulado)* a fin de mejorar el desempeño, incluyendo una tendencia reducida a la formación de borde acumulado.

EJEMPLO 22.1 El papel que juegan los elementos de aleación en las herramientas de corte de acero de alta velocidad

Liste los principales elementos de aleación en los aceros de alta velocidad y describa sus efectos en las herramientas de corte.

Solución Los principales elementos de aleación en los HSS son el cromo, vanadio, tungsteno, cobalto y molibdeno.
Para apreciar su función en las herramientas de corte, consulte la sección 5.5.1 sobre los efectos de los diversos elementos en los aceros y observe lo siguiente:

Cromo: mejora la tenacidad, la resistencia al desgaste y la resistencia a temperaturas elevadas.
Vanadio: mejora la tenacidad, la resistencia a la abrasión y la dureza en caliente.
El *tungsteno* y el *cobalto* tienen efectos similares: mejoran la resistencia y la dureza en caliente.
Molibdeno: mejora la resistencia al desgaste, la tenacidad y la resistencia y dureza a la temperatura elevada.

22.3 Aleaciones de cobalto fundido

Presentadas en 1915, las *aleaciones de cobalto fundido* tienen los siguientes intervalos de composición: de 38% a 53% de Co, de 30% a 33% de Cr y de 10% a 20% de W. Debido a su elevada dureza (comúnmente entre 58 y 64 HRC), tienen buena resistencia al desgaste y pueden mantener su dureza a temperaturas elevadas. No son tan tenaces como los aceros de alta velocidad y son sensibles a las fuerzas de impacto. En consecuencia, son menos adecuadas que los aceros de alta velocidad para las operaciones de corte interrumpido. Conocidas comúnmente como herramientas de *estelita*, estas aleaciones se funden y se rectifican para darles formas relativamente sencillas. En la actualidad sólo se utilizan en aplicaciones especiales que implican **cortes de desbaste,** profundos y continuos, con avances y velocidades relativamente elevadas, hasta del doble de las capacidades posibles con los aceros de alta velocidad. Como se indica en la sección 23.2, por lo general los cortes de desbaste comprenden grandes proporciones de avance y grandes profundidades de corte, con el propósito fundamental de retirar grandes cantidades de material, con poco cuidado por el acabado superficial. Por el contrario, los **cortes de acabado** se realizan con menores avances y profundidades de corte, y el acabado superficial es prioritario.

22.4 Carburos

Los dos grupos de materiales para herramientas descritos hasta este punto poseen la tenacidad y resistencia al impacto requeridos, pero también tienen limitaciones importantes, en particular respecto de la resistencia y la dureza en caliente. En consecuencia, no pueden utilizarse efectivamente donde existen altas velocidades de corte (y de ahí, altas temperaturas). Sin embargo, esta condición es necesaria a menudo para mejorar la productividad de la planta.

Para cumplir el reto de las velocidades de corte cada vez mayores se presentaron los *carburos* (también conocidos como *carburos cementados* o *sinterizados*) por primera vez en la década de 1930. Debido a su elevada dureza en un amplio intervalo de temperaturas (fig. 22.1), su alto módulo elástico, alta conductividad térmica y baja dilatación térmica, los carburos se encuentran entre los materiales para herramientas y matrices (dados) más importantes, versátiles y de costo efectivo para una amplia gama de aplicaciones. Los dos grupos más importantes de carburos utilizados en maquinado son el *carburo de tungsteno* y el *carburo de titanio*. Para diferenciarlos de las herramientas recubiertas que se describen en la sección 22.6, a las herramientas simples de carburo se les conoce comúnmente como **carburos no recubiertos**.

22.4.1 Carburo de tungsteno

Por lo común, el *carburo de tungsteno* (WC) consiste en partículas de carburo de tungsteno aglutinadas en una matriz de cobalto. Estas herramientas se manufacturan mediante técnicas de metalurgia de polvos (de ahí el término *carburos sinterizados* o *carburos cementados*), como se señala en el ejemplo 17.4. Primero, las partículas de carburo de tungsteno se combinan con *cobalto* en una mezcladora, produciendo un material compósito con una matriz de cobalto que circunda a las partículas de carburo. Después, estas partículas, que tienen un tamaño de 1 a 5 μm (40 a 200 μpulg) se prensan y sinterizan para darles las formas de *inserto* deseadas. Con frecuencia, los carburos de tungsteno se integran con *carburo de titanio* y *carburo de niobio* para proporcionar propiedades especiales al material.

La cantidad de cobalto presente, que por lo común va de 6% a 16%, afecta de manera significativa las propiedades de las herramientas de carburo de tungsteno. Al aumentar el contenido de cobalto disminuyen la resistencia, dureza y resistencia al desgaste del WC, mientras que aumenta su tenacidad debido a la mayor tenacidad del cobalto. Por lo general, las herramientas de carburo de tungsteno se utilizan para cortar aceros, hierros fundidos y materiales no ferrosos abrasivos y han reemplazado ampliamente a las herramientas de HSS debido a su mejor desempeño.

Carburos micrograno. Las herramientas de corte también se producen con carburos de granos de tamaños submicroscópicos y ultrafinos *(micrograno)*. El tamaño del grano se encuentra en el intervalo de 0.2 a 0.8 μm (8 a 30 μpulg). Si se comparan con los carburos tradicionales descritos antes, estos materiales para herramientas son más fuertes, duros y resistentes al desgaste, mejorando de esta manera la productividad. En una aplicación, con estos materiales se están produciendo microbrocas con diámetros del orden de 100 μm (0.004 pulgada), que se utilizan en la fabricación de tarjetas de circuitos microelectrónicos (capítulo 28).

Carburos con gradientes funcionales. En estas herramientas, la composición del carburo en el inserto tiene un gradiente a través de la profundidad cercana a su superficie, en lugar de ser uniformes, como los insertos comunes de carburo. El gradiente tiene una distribución gradual de composiciones y fases con funciones similares a las descritas como propiedades deseables de los recubrimientos para herramientas de corte. Las propiedades mecánicas graduadas eliminan las concentraciones de esfuerzos y promueven la vida útil y el desempeño de las herramientas. Sin embargo, son más costosas y no se pueden justificar en todas las aplicaciones.

22.4.2 Carburo de titanio

El *carburo de titanio* (TiC) consiste en una matriz de níquel-molibdeno. Tiene una resistencia al desgaste mayor que la del carburo de tungsteno, pero no es tan tenaz. El carburo de titanio es adecuado para maquinar materiales duros (principalmente aceros e hierros fundidos) y para cortar a velocidades superiores a las apropiadas para el carburo de tungsteno.

22.4.3 Insertos

A las herramientas de acero de alta velocidad se les da forma en una sola pieza y se rectifican para proporcionarles diversas características geométricas (fig. 21.10a); dichas herramientas incluyen insertos, brocas y cortadores para fresado y para engranes. Una vez que se desgasta el filo de corte, la herramienta tiene que retirarse de su soporte y reafilarse.

Aunque por lo general existe un suministro de herramientas afiladas o reafiladas en los talleres de herramientas, las operaciones de cambio de herramientas son laboriosas e ineficientes. La necesidad de un método más efectivo ha llevado al desarrollo de *insertos*, que son herramientas individuales de corte con varios puntos de corte (fig. 22.2). Un inserto cuadrado tiene ocho puntos de corte y un inserto triangular tiene seis. En general, los insertos se sujetan sobre el *portaherramientas* con diversos mecanismos de sujeción (fig. 22.3). Aunque no se utilizan con tanta frecuencia de esta manera, los insertos también se pueden *soldar* al zanco de la herramienta, pero esta práctica se abandonó desde hace mucho tiempo.

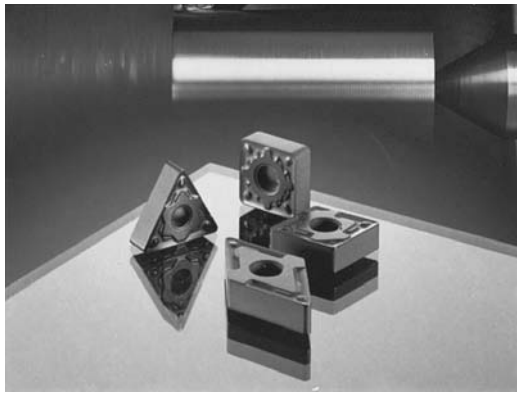


FIGURA 22.2 Insertos típicos de carburo con diversas formas y rompevirutas; también existen insertos redondos, como puede verse en las figuras 22.3c y 22.4. Los orificios en los insertos se han estandarizado para hacerlos intercambiables en los portaherramientas. *Fuente:* Cortesía de Kyocera Engineered Ceramics, Inc.

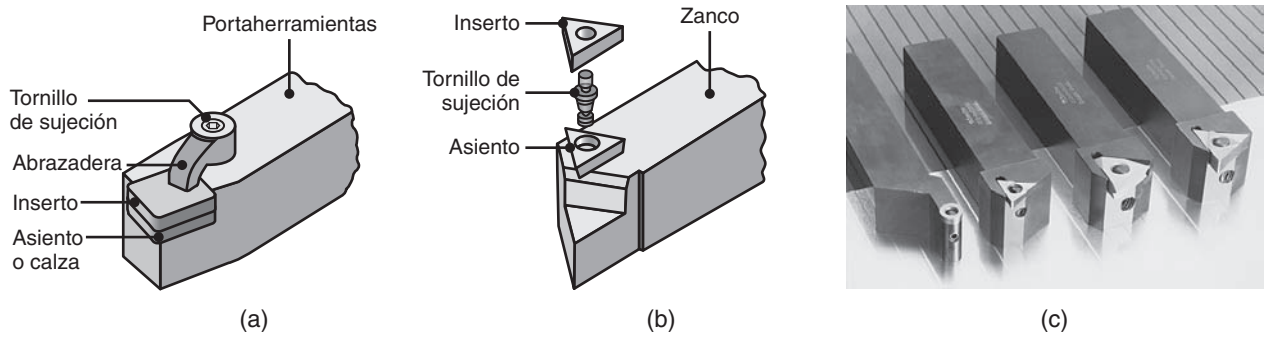


FIGURA 22.3 Métodos de montaje de insertos en portaherramientas: *(a)* Con abrazaderas, y *(b)* con tornillos de sujeción. *(c)* Ejemplos de insertos montados con tornillos de sujeción sin rosca, que se aseguran con tornillos laterales. *Fuente*: Cortesía de Valenite.

El método preferido para asegurar un inserto es la sujeción, ya que cada uno tiene varios puntos de corte y después de que se ha gastado un filo, el inserto se **indexa** (se gira en su soporte) para disponer de otro punto de corte. Además de los ejemplos de esta figura, existe una amplia variedad de otros portaherramientas para aplicaciones específicas, incluyendo los de inserción y remoción rápida.

Existen varias formas de insertos o pastillas de carburo, tales como cuadrado, triángulo, diamante y redonda. La resistencia del filo de corte de un inserto depende de su forma. Cuanto menor sea el ángulo comprendido o incluido (fig. 22.4), menor será la resistencia del filo. Para mejorar la resistencia del filo y evitar el astillado, por lo general todos los filos de los insertos se honean o asentan, achaflanan, o se producen con un descanso negativo (fig. 22.5). La mayoría de los insertos se honean a un radio de casi 0.025 mm (0.001 pulgada).

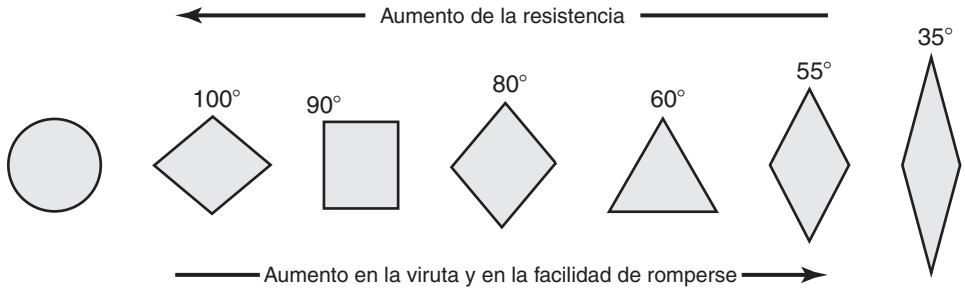


FIGURA 22.4 Resistencia relativa de los filos y tendencia al astillado de los insertos de diversas formas. La resistencia se refiere al filo de corte indicado por los ángulos comprendidos. *Fuente*: Cortesía de Kennametal, Inc.



FIGURA 22.5 Preparación del filo en los insertos para mejorar su resistencia. *Fuente:* Cortesía de Kennametal, Inc.

TABLA 22.4

Clasificación ISO de las herramientas de corte de carburos de acuerdo con su uso

Símbolo	Material de la pieza de trabajo	Código de color	Designación en orden creciente de la resistencia al desgaste y en orden decreciente de tenacidad en cada categoría (en incrementos de 5)
P	Metales ferrosos con virutas largas.	Azul	P01, P05–P50
M	Metales ferrosos con virutas largas o cortas, metales no ferrosos.	Amarillo	M10–M40
K	Metales ferrosos con virutas cortas, metales no ferrosos, materiales no metálicos.	Rojo	K01, K10–K40

Los **rompevirutas** (descritos en la sección 21.2.1) en los insertos tienen los propósitos de *(a)* controlar el flujo de la viruta durante el maquinado; *(b)* eliminar las virutas largas, y *(c)* reducir la vibración y el calor generado. Existen insertos comerciales de carburo con una amplia variedad de complejos rompevirutas, ejemplos de los cuales se muestran en la figura 22.2. La selección de un rompevirutas en particular depende de elementos como el avance y la profundidad de corte de la operación, el material de la pieza de trabajo, el tipo de viruta producida durante el corte y si se trata de un corte de desbaste o de acabado. Con el uso del diseño asistido por computadora y técnicas de análisis de elementos finitos se siguen desarrollando geometrías óptimas para los rompevirutas.

La **rigidez** de la máquina herramienta (sección 25.3) es muy importante cuando se utilizan herramientas de carburo. Los avances cortos, las velocidades bajas y el traqueteo son dañinos porque tienden a dañar el filo de corte de la herramienta. Los avances cortos, por ejemplo, concentran las fuerzas y temperaturas más cerca de los filos de la herramienta, aumentando su tendencia al astillado.

Las bajas velocidades de corte tienden a promover el soldado en frío de la astilla a la herramienta. Los fluidos de corte también deben aplicarse de manera continua y en grandes cantidades si se utilizan para minimizar el calentamiento y enfriar la herramienta en las operaciones de corte interrumpido.

22.4.4 Clasificación de los carburos

Con la manufactura global que cada vez crece más rápidamente y el mayor uso de las normas ISO (Organización Internacional para la Estandarización), los grados de carburo se clasifican mediante las letras P, M y K (como se muestra en las tablas 22.4 y 22.5) para numerosas aplicaciones, incluyendo los grados tradicionales C que se utilizan en Estados Unidos. Debido a la amplia variedad disponible de composiciones de los carburos, de aplicaciones de maquinado y de materiales de piezas de trabajo que comprenden, los esfuerzos de la clasificación ISO continúan siendo una tarea muy difícil. Esto es cierto en particular cuando se comparan los grados ISO con los grados tradicionales clasificados por el American National Standards Institute (ANSI), que van de los grados C1 a C8.

22.5 Herramientas recubiertas

Como se indicó en la parte I, el desarrollo de nuevas aleaciones y materiales de ingeniería es continuo desde la década de 1960. Estos materiales tienen una alta resistencia y tenacidad, aunque por lo general son abrasivos y químicamente reactivos con los materiales de las herramientas. La dificultad de maquinar estos materiales de manera efi-

TABLA 22.5

Clasificación de los carburos de tungsteno de acuerdo con sus aplicaciones de maquinado

Norma ISO	Número de clasificación ANSI (grado)	Materiales a ser maquinados	Operación de maquinado	Tipo de carburo	Características de:	
					Corte	Carburo
K30–K40	C1	Hierro fundido, metales no ferrosos y materiales no metálicos que requieren resistencia a la abrasión	Desbaste	Grados resistentes al desgaste; en general sólo WC-Co con tamaños variables de granos	Incremento de velocidad de corte ↓ ↑ Incremento de avance	Incremento dureza y resistencia al desgaste ↓ ↑ Incremento de resistencia y contenido de aglutinante
K20	C2		Propósito general			
K10	C3		Acabado ligero			
K01	C4		Acabado de precisión			
P30–P50	C5	Aceros y aceros aleados que requieren resistencia a la craterización y a la deformación	Desbaste	Grados resistentes al desgaste; diversas composiciones de WC-Co con TiC y/o aleaciones de TaC	Incremento de velocidad de corte ↓ ↑ Incremento de avance	Incremento de dureza y resistencia al desgaste ↓ ↑ Incremento de resistencia y contenido de aglutinante
P20	C6		Propósito general			
P10	C7		Acabado ligero			
P01	C8		Acabado de precisión			

Nota: Las comparaciones ISO y ANSI son aproximadas.

ciente y la necesidad de mejorar el desempeño en el maquinado de los materiales de ingeniería más comunes ha llevado a importantes desarrollos en *herramientas recubiertas*. Los recubrimientos tienen propiedades únicas, como:

- Menor fricción.
- Mayor adhesión.
- Mayor resistencia al desgaste y al agrietamiento.
- Actúan como una barrera para la difusión.
- Mayor dureza en caliente y resistencia al impacto.

Las herramientas recubiertas pueden tener una vida útil 10 veces más larga que la de las herramientas no recubiertas, permitiendo mayores velocidades de corte y reduciendo así tanto el tiempo requerido para las operaciones de maquinado como los costos de producción. Como se puede ver en la figura 22.6, el tiempo de maquinado se ha reducido de manera consistente en un factor de más de 100 desde 1900. Esta mejora ha tenido un impacto importante en la economía de las operaciones de maquinado, junto con desarrollos continuos en el diseño y la construcción de máquinas herramienta modernas y sus controles computarizados. El resultado es que ahora entre 40% y 80% de todas las operaciones de maquinado utilizan herramientas recubiertas, en particular en el torneado, fresado y taladrado. Algunas investigaciones indican que el uso de dichas herramientas tiene mayor preponderancia en las grandes compañías que en las pequeñas.

22.5.1 Materiales y métodos de recubrimiento

Los materiales que suelen utilizarse para recubrimiento son el nitruro de titanio (TiN), el carburo de titanio (TiC), el carbonitruro de titanio (TiCN) y el óxido de aluminio (Al_2O_3), cuyo espesor varía por lo general de 2 a 15 μm (80 a 600 μpulg); se aplican sobre las herramientas y los insertos mediante dos técnicas, descritas con mayor detalle en la sección 34.6.

1. **Deposición química de vapor** (CVD, por sus siglas en inglés), incluyendo la **deposición química de vapor asistida por plasma**.
2. **Deposición física de vapor** (PVD, por sus siglas en inglés).

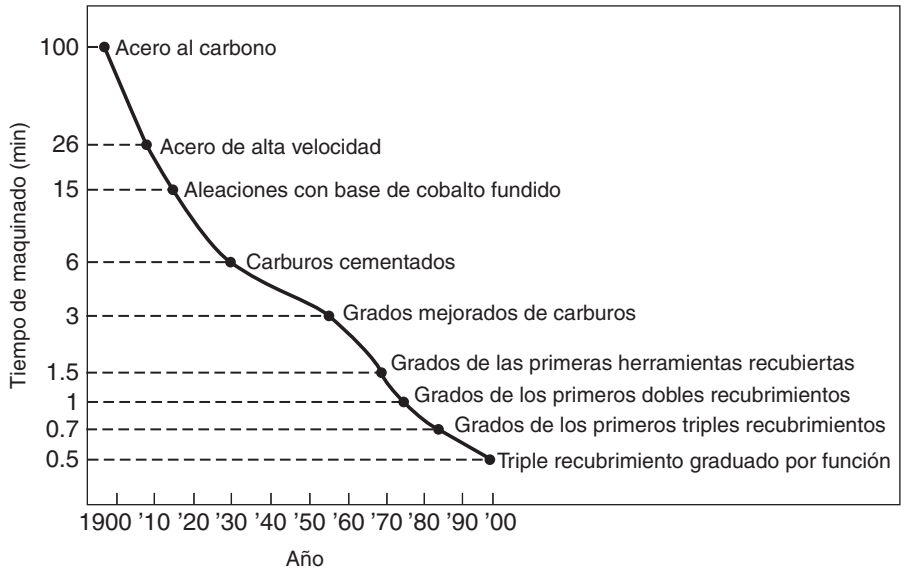


FIGURA 22.6 Tiempo relativo requerido para maquinar con diversos materiales para herramientas de corte, indicando el año en que dichos materiales se introdujeron por primera vez. Obsérvese que el tiempo de maquinado se ha reducido en dos órdenes de magnitud en 100 años. *Fuente*: Cortesía de Sandvik.

El proceso CVD es el método más utilizado para las herramientas de carburo con recubrimientos de fases múltiples y cerámicos; ambos se describen después en esta sección. Por otro lado, los carburos recubiertos mediante PVD con recubrimientos de TiN tienen más resistencia en el filo de corte, menos fricción y menor tendencia a formar un borde acumulado o recrecido; son más lisos y su espesor es más uniforme, por lo general de 2 a 4 μm (80 a 160 μpulg). Otra tecnología (que se emplea en particular para los recubrimientos de fases múltiples) es la **deposición química de vapor de temperatura media** (MTCVD, por sus siglas en inglés), desarrollada para maquinar hierro dúctil (nodular) y aceros inoxidables y para proporcionar una resistencia mayor a la propagación de las grietas que la de los recubrimientos CVD.

Los recubrimientos para herramientas de corte y matrices (dados) deben tener las siguientes características generales:

- **Alta dureza** a elevadas temperaturas, para resistir el desgaste.
- **Estabilidad química** y **neutralidad** con respecto al material de la pieza de trabajo, para reducir el desgaste.
- **Baja conductividad térmica,** para evitar la elevación de la temperatura en el sustrato.
- **Compatibilidad y buena unión o adherencia** con el sustrato, para evitar la descamación o astillado.
- **Poca o nada de porosidad** en el recubrimiento, para mantener su integridad y resistencia.

La efectividad de los recubrimientos se ve realzada por la dureza, tenacidad y alta conductividad térmica del sustrato (que puede ser carburo o acero de alta velocidad). El honeado de los filos de corte es un procedimiento importante para mantener la resistencia del recubrimiento; en caso contrario, éste se puede descascarar o astillar en los filos y esquinas.

Recubrimientos de nitruro de titanio. Los recubrimientos de nitruro de titanio tienen bajos coeficientes de fricción, dureza elevada, resistencia a temperaturas altas y buena adhesión al sustrato. En consecuencia, mejoran mucho la vida útil de las herramientas tanto de acero de alta velocidad como de carburo, los insertos para brocas y los cortadores. El

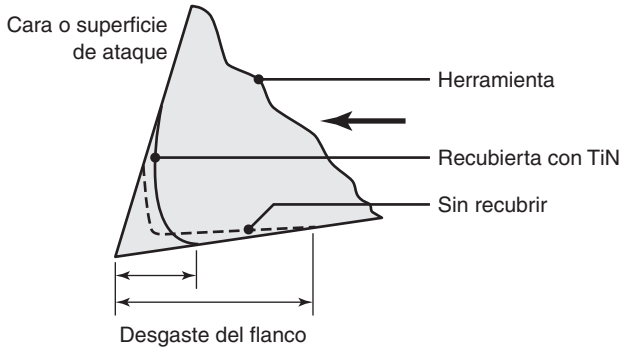


FIGURA 22.7 Esquema de los patrones característicos de desgaste en herramientas de acero de alta velocidad sin recubrir y con recubrimiento de nitruro de titanio. Obsérvese que el desgaste del flanco es significativamente menor en la herramienta recubierta.

desempeño de las herramientas recubiertas con nitruro de titanio (de color dorado) es bueno a mayores velocidades de corte y avances, en tanto que el desgaste del flanco es significativamente menor que el de las herramientas sin recubrimiento (fig. 22.7); las superficies de los flancos se pueden rectificar otra vez después del uso, ya que el nuevo rectificado de la herramienta no retira el recubrimiento de la cara de ataque de la herramienta. Sin embargo, las herramientas recubiertas no se comportan muy bien a bajas velocidades de corte porque el recubrimiento puede desgastarse debido a la adhesión de la viruta. Por lo tanto, es importante usar fluidos apropiados de corte para evitar la adhesión.

Recubrimientos de carburo de titanio. Los recubrimientos de carburo de titanio sobre insertos de carburo de tungsteno tienen alta resistencia al desgaste del flanco al maquinar materiales abrasivos.

Recubrimientos cerámicos. Debido a su neutralidad química, baja conductividad térmica, resistencia a las temperaturas elevadas y resistencia al desgaste del cráter y del flanco, los cerámicos son adecuados para recubrir materiales para herramientas. El recubrimiento cerámico más utilizado es el óxido de aluminio (Al_2O_3). Sin embargo, ya que son muy estables (no reactivos químicamente), por lo general, los recubrimientos de óxidos se unen con debilidad al sustrato.

Recubrimientos de fases múltiples. Las propiedades deseables de los recubrimientos, recién descritas, se pueden combinar y optimizar con el uso de recubrimientos de *fases múltiples o multifásicos*. Ahora existen herramientas de carburos con dos o tres capas de tales recubrimientos y son particularmente efectivas en el maquinado de hierros fundidos y aceros.

Por ejemplo, primero se puede depositar TiC sobre el sustrato, seguido de Al_2O_3 y después TiN. La primera capa debe unirse bien al sustrato; la exterior tiene que resistir el desgaste y presentar una baja conductividad térmica; la intermedia debe unirse bien y ser compatible con las otras dos.

Las aplicaciones típicas de las herramientas con recubrimientos de capas múltiples son las siguientes:

1. Corte de alta velocidad y continuo: TiC/Al_2O_3.
2. Corte de trabajo rudo y continuo: $TiC/Al_2O_3/TiN$.
3. Corte interrumpido ligero: TiC/TiC + TiN/TiN.

También existen recubrimientos en **capas múltiples alternas**. El espesor de estas capas es de 2 a 10 μm, menores que los recubrimientos regulares de fases múltiples (fig. 22.8). Se usan recubrimientos delgados porque su dureza aumenta al disminuir el tamaño de grano, un fenómeno similar al incremento de la resistencia de los metales cuando se reduce el tamaño de grano. Por lo tanto, las capas delgadas son más duras que las gruesas.

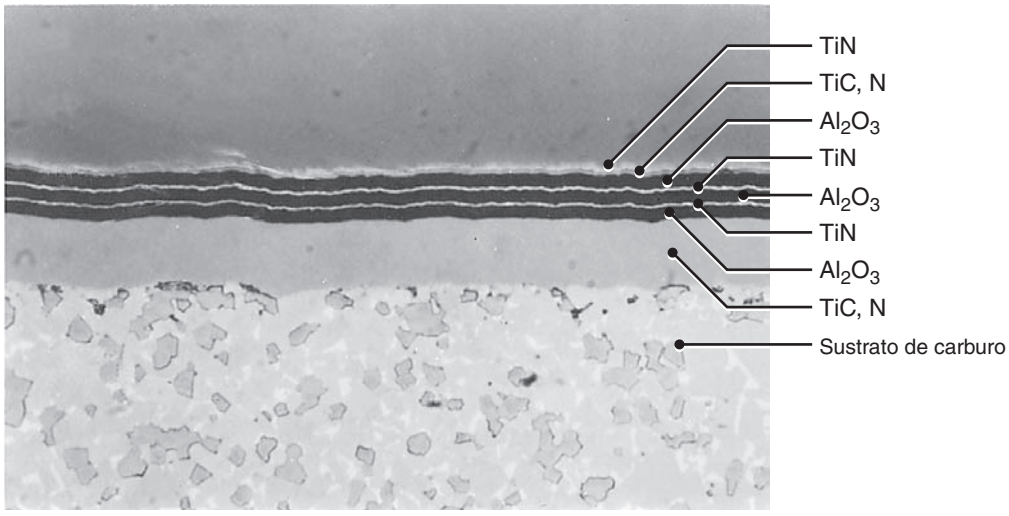


FIGURA 22.8 Recubrimientos de etapas múltiples sobre un sustrato de carburo de tungsteno. Capas muy delgadas de nitruro de titanio separan tres capas alternadas de óxido de aluminio. Se han producido insertos hasta con 13 capas de recubrimiento. El espesor de los recubrimientos se encuentra por lo común dentro del intervalo de 2 a 10 μm. *Fuente*: Cortesía de Kennametal, Inc.

Una herramienta típica recubierta con fases múltiples puede constar de las siguientes capas, empezando desde arriba, junto con sus funciones fundamentales:

1. TiN: baja fricción.
2. Al_2O_3: alta estabilidad térmica.
3. TiCN: reforzado con fibra, tiene un buen equilibrio de resistencia al desgaste del cráter y del flanco, en particular para corte interrumpido.
4. Sustrato delgado de carburo: alta tenacidad a la fractura.
5. Sustrato grueso de carburo: duro y resistente a la deformación plástica a temperaturas elevadas.

Recubrimientos de diamante. En las secciones 8.7 y 34.13 se indican las propiedades y aplicaciones del diamante, los recubrimientos de diamante y el *carbono similar al diamante*, respectivamente, y en la sección 22.9 se describe su uso como recubrimiento para herramientas de corte, sobre todo en los insertos de carburo de tungsteno y nitruro de silicio. Las herramientas recubiertas con diamante son muy efectivas en el maquinado de metales no ferrosos y materiales abrasivos, como las aleaciones de aluminio que contienen silicio, materiales compósitos reforzados con fibras y con matriz metálica, y grafito. Su vida útil ha mejorado hasta 10 veces más respecto de otras herramientas recubiertas.

Existen **insertos recubiertos con diamante** comerciales, en los que, mediante las técnicas PVD y CVD, se depositan delgadas películas sobre sustratos. Las películas gruesas se obtienen haciendo crecer una hoja grande de diamante puro, que después se corta con láser para darle forma y soldarla a un inserto de carburo. También se han desarrollado *recubrimientos de diamante nanocristalino en multicapas*, con capas de unión de diamante que dan resistencia al recubrimiento. Como en todos los recubrimientos, es importante desarrollar una buena adherencia de la película de diamante al sustrato y minimizar la diferencia de expansión térmica entre el diamante y los materiales del sustrato.

22.5.2 Diversos materiales de recubrimiento

En la mejora del desempeño de las herramientas recubiertas se han producido importantes avances. El **carbonitruro de titanio** (TiCN) y el **nitruro de aluminio titanio** (TiAlN) son efectivos para cortar aceros inoxidables. El TiCN (que se deposita mediante técnicas

de deposición física de vapor) es más duro y tenaz que el TiN y se puede utilizar sobre herramientas de carburos y de acero de alta velocidad. El TiAlN es efectivo para maquinar aleaciones aeroespaciales. Los recubrimientos con base de cromo, como el **carburo de cromo** (CrC), son efectivos para maquinar metales más blandos que tienden a adherirse a la herramienta de corte, como el aluminio, cobre y titanio. Otros nuevos materiales son el **nitruro de zirconio** (ZrN) y el **nitruro de hafnio** (HfN). Se requieren considerables datos experimentales antes de que se puedan evaluar totalmente estos recubrimientos y su desempeño para aplicaciones apropiadas en el maquinado.

Los desarrollos más recientes incluyen *(a)* **recubrimientos nanocapa**, entre ellos carburo, boruro, nitruro, óxido o alguna combinación (ver también la sección 6.16), y *(b)* **recubrimientos de compósitos**, que utilizan varios materiales. La dureza de algunos de estos recubrimientos se aproxima a la del nitruro de boro cúbico; aunque aún se encuentran en etapas experimentales, se espera que tengan los beneficios combinados de diferentes tipos de recubrimientos, así como aplicaciones más amplias en las operaciones de maquinado.

22.5.3 Implantación de iones

En este proceso se introducen iones dentro de la superficie de la herramienta de corte, mejorando sus propiedades superficiales (sección 34.6) sin cambiar sus dimensiones. Se han utilizado con éxito herramientas de carburo con implantes de **iones de nitrógeno** en aceros aleados e inoxidables. La implantación de herramientas con **iones de xenón** también se encuentra en desarrollo.

22.6 Cerámicos base alúmina

Los materiales para herramientas fabricados de material **cerámico**, que se presentaron en la década de 1950, consisten fundamentalmente en **óxido de aluminio** de alta pureza de grano fino (ver también la sección 8.2). Se prensan en frío para darles la forma del inserto a alta presión y se sinterizan a elevada temperatura; al producto final se le conoce como **cerámicos blancos** (**prensados en frío**). La adición de carburo de titanio y óxido de zirconio mejora propiedades como la tenacidad y la resistencia al impacto térmico.

Las herramientas de material *cerámico con base de alúmina* tienen una resistencia muy elevada a la abrasión y alta dureza en caliente (fig. 22.9). Químicamente, son más estables que los aceros de alta velocidad y que los carburos, por lo que tienden menos a adherirse a los metales durante el corte y a formar bordes acumulados o recrecidos. En

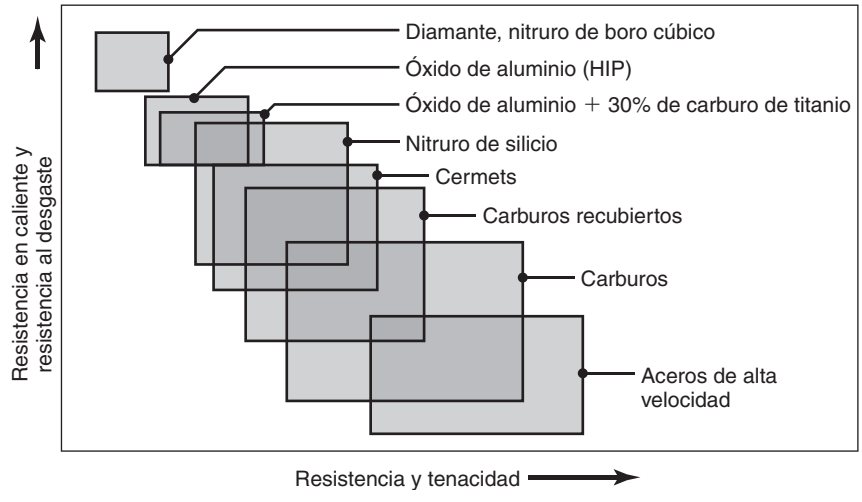


FIGURA 22.9 Intervalos de propiedades mecánicas para diversos grupos de materiales para herramientas. Ver también las tablas 22.1 a 22.5.

consecuencia, al cortar hierros fundidos y aceros se obtiene un buen acabado superficial con las herramientas a base de cerámicos. Sin embargo, éstos no tienen tenacidad y su uso puede provocar la falla prematura de la herramienta por astillado o por falla catastrófica.

Existen insertos cerámicos en formas similares a las de los insertos de carburo. Son efectivos en alta velocidad y en operaciones de corte interrumpido, como el acabado o semiacabado mediante torneado. Para reducir el impacto térmico, el corte debe realizarse en seco o con una copiosa cantidad de fluido de corte, aplicado como una corriente estable. Las aplicaciones inapropiadas o intermitentes del fluido pueden provocar un impacto térmico y la fractura de la herramienta a base de cerámicos.

La forma de la herramienta a base de cerámicos y su arreglo son importantes. Por lo general se prefieren ángulos negativos de ataque (ángulos comprendidos grandes) para evitar el astillado debido a la pobre resistencia a la tensión de los cerámicos. La falla de la herramienta se puede reducir aumentando la rigidez y la capacidad de amortiguamiento de las máquinas herramienta, montajes y dispositivos de sujeción del trabajo, reduciendo así la vibración y el traqueteo.

Cermets. Los *cermets* (de las palabras *cer*ámico y *met*al) se utilizaron por primera vez en la década de 1950 y consisten en partículas de material cerámico en una matriz metálica. Se presentaron en la década siguiente y son materiales *cerámicos negros* o *prensados en caliente* (carbóxidos). Un cermet típico tiene 70% de óxido de aluminio y 30% de carburo de titanio; otros cermets contienen carburo de molibdeno, carburo de niobio y carburo de tantalio. Aunque poseen estabilidad química y resistencia a la formación de bordes acumulados, su fragilidad y alto costo han limitado su uso más amplio. Refinamientos posteriores de estas herramientas han mejorado su resistencia, tenacidad y confiabilidad. Su desempeño se encuentra entre el de los cerámicos y el de los carburos, y ha sido adecuado para cortes ligeros de desbaste y cortes de acabado de alta velocidad. Los rompevirutas son importantes para los insertos de cermets. Aunque se pueden recubrir, los beneficios de los cermets recubiertos son discutibles, ya que la mejora en la resistencia al desgaste parece marginal.

22.7 Nitruro de boro cúbico

Después del diamante, el *nitruro de boro cúbico* (cBN) es el material más duro que existe. Presentado en 1962 con el nombre comercial de Borazón, se produce uniendo una capa de 0.5 mm a 1 mm (0.02 a 0.04 pulgada) de **nitruro de boro cúbico policristalino** a un sustrato de carburo mediante sinterización a alta presión y alta temperatura. En tanto que el carburo proporciona resistencia al impacto, la capa de cBN aporta una resistencia muy elevada al desgaste y resistencia del filo de corte (fig. 22.10). Las herramientas de nitruro de boro cúbico también se producen en tamaños pequeños, sin sustrato.

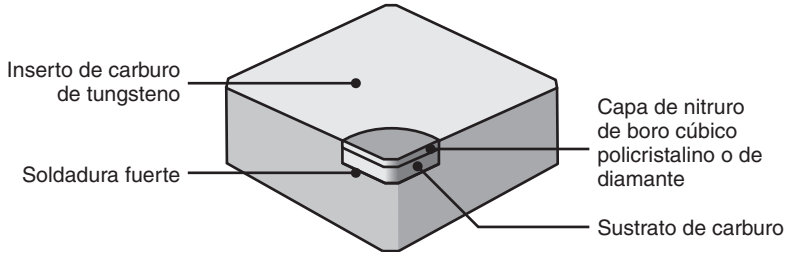


FIGURA 22.10 Inserto de nitruro de boro cúbico policristalino o de diamante sobre carburo de tungsteno.

A temperaturas elevadas, el cBN es químicamente inerte al hierro y al níquel (de ahí que no exista desgaste debido a la difusión). Su resistencia a la oxidación es elevada, por lo que resulta adecuado para cortar ferrosos endurecidos y aleaciones de alta temperatura (ver *maquinado duro* en la sección 25.6). También se utiliza como abrasivo. Como las herramientas de cBN son frágiles, la rigidez de la máquina y de los soportes es importante para impedir la vibración y el traqueteo. Pueden evitarse además el astillado y el agrietamiento por los impactos térmicos si el maquinado se realiza en seco (esto es, deben evitarse los fluidos de corte), sobre todo en las operaciones de corte interrumpido (como el fresado), que somete la herramienta a ciclos térmicos de manera repetitiva.

22.8 Cerámicos con base de nitruro de silicio

Desarrollados en la década de 1970, los materiales para herramientas de *cerámico con base de nitruro de silicio* (SiN) consisten en nitruro de silicio con diversas adiciones de óxido de aluminio, óxido de itrio y carburo de titanio. Estas herramientas tienen tenacidad, dureza en caliente y buena resistencia al impacto térmico. Un ejemplo de material con base de SiN es el **sialón**, cuyo nombre proviene de los elementos que lo conforman: *si*licio, *al*uminio, *o*xígeno y *n*itrógeno. Posee una resistencia al impacto térmico mayor que el nitruro de silicio y se recomienda para maquinar hierros fundidos y superaleaciones con base de níquel a velocidades intermedias de corte. Sin embargo, debido a su afinidad química con el hierro a temperaturas elevadas, las herramientas con base de SiN no son adecuadas para maquinar aceros.

22.9 Diamante

El diamante es la sustancia más dura que se conoce (ver también la sección 8.7); como herramienta de corte tiene propiedades deseables, entre ellas baja fricción, alta resistencia al desgaste y la capacidad de mantener su filo de corte. El diamante se utiliza cuando se requiere un buen acabado superficial y precisión dimensional, en particular con las aleaciones no ferrosas blandas y con los materiales abrasivos metálicos y no metálicos (sobre todo algunas aleaciones de aluminio-silicio). En la actualidad se usan ampliamente *diamantes sintéticos* o industriales, ya que el natural tiene defectos y su desempeño puede ser impredecible, como en el caso de los abrasivos empleados en ruedas de esmerilado.

Para aplicaciones especiales se pueden utilizar **diamantes monocristalinos** de varios quilates. Sin embargo, se han sustituido en gran medida por herramientas de **diamante policristalino** (PCD, por sus siglas en inglés), llamados *compactos*, que también se usan como matrices para estirado de alambre fino. Estas herramientas de diamante consisten en cristales sintéticos muy pequeños fundidos mediante un proceso de alta presión y alta



FIGURA 22.11 Insertos con puntas de nitruro de boro cúbico policristalino (fila superior) e insertos de cBN sólido policristalino (fila inferior). *Fuente*: Cortesía de Valenite.

temperatura, a un espesor de entre 0.5 mm y 1 mm (0.02 a 0.04 pulgada), aglutinados en un sustrato de carburo; este producto es similar a las herramientas cBN (fig. 22.11). La orientación aleatoria de los cristales de diamante evita la propagación de grietas a lo largo de la estructura, mejorando su tenacidad de manera significativa.

El diamante es frágil, por lo que son importantes la forma y el afilado de la herramienta. En general se utilizan ángulos pequeños de ataque para proveer un filo de corte fuerte (debido a los ángulos mayores comprendidos). Se tiene que poner atención particular en el montaje y la orientación apropiada de los cristales, a fin de obtener una vida útil óptima de la herramienta. El desgaste puede ocurrir por microastillado (a causa de los esfuerzos térmicos y la oxidación) y la transformación a carbono (provocada por el calor generado durante el corte). Las herramientas de diamante se pueden emplear en forma satisfactoria casi a cualquier velocidad, pero son más adecuadas para cortes de acabado ligero, ininterrumpido. Con el propósito de minimizar la fractura de la herramienta, el diamante monocristalino debe reafilarse en cuanto se desafile. Debido a su fuerte afinidad química a temperaturas elevadas (lo que produce difusión), no se recomienda el diamante para maquinar aceros simples al carbono o aleaciones de titanio, níquel y cobalto. También se usa como abrasivo en las operaciones de rectificado y pulido y como *recubrimientos*.

22.10 Materiales para herramientas reforzados con triquitas

Para mejorar aún más el desempeño y la resistencia al desgaste de las herramientas de corte (en particular cuando se maquinan nuevos materiales y compósitos), se ha tenido un avance continuo en el desarrollo de nuevos materiales para herramientas con propiedades mejoradas, como:

- Alta tenacidad a la fractura.
- Resistencia al choque térmico.
- Resistencia en el filo de corte.
- Resistencia al deslizamiento.
- Dureza en caliente.

Los avances incluyen el uso de *triquitas* como fibras de refuerzo en los materiales para herramientas de corte. Ejemplos de esto son *(a)* las herramientas con base de nitruro de silicio reforzadas con triquitas de carburo de silicio, y *(b)* las herramientas con base de óxido de aluminio reforzadas con 25% a 40% de triquitas de carburo de silicio, en ocasiones con la adición de *óxido de zirconio* (ZrO_2). Por lo común, las triquitas tienen una longitud de 5 a 100 μm y un diámetro de 0.1 a 1 μm. La alta reactividad del carburo de silicio con los metales ferrosos hace que las herramientas reforzadas con SiC sean inadecuadas para maquinar hierros y aceros.

22.11 Costos y reacondicionamiento de las herramientas

Los *costos de las herramientas* varían ampliamente, dependiendo del material, el tamaño, la forma, los rompevirutas y la calidad. El costo de un *inserto* común de 0.5 pulgada (12.5 mm) es de alrededor de *(a)* $2 a $10 dólares para carburos sin recubrir; *(b)* $6 a $10 para carburos recubiertos; *(c)* $8 a $12 para cerámicos, *(d)* $50 a $60 para carburos recubiertos con diamante; *(e)* $60 a $90 para nitruro de boro cúbico, y *(f)* $90 a $100 para insertos con punta de diamante.

Después de revisar los costos comprendidos en el maquinado y considerando todos los aspectos implícitos en la operación total, se puede ver que el costo de un inserto indi-

vidual es insignificante. Se estima que los costos de herramental en el maquinado son de 2% a 4% de los costos de manufactura. Esta pequeña cantidad obedece al hecho de que una sola herramienta de corte puede retirar mucho material antes de ser indexada y finalmente reciclada. En la sección 21.5 se vio que la vida útil esperada de la herramienta puede estar en el intervalo de 30 a 60 minutos. Entonces, si se considera que un inserto cuadrado tiene ocho filos de corte, esto indica que la herramienta puede durar mucho tiempo antes de que se le retire de la máquina y se le reemplace.

Las herramientas de corte se pueden **reacondicionar** afilándolas mediante rectificadoras de herramientas y cortadores en un taller que tenga monturas especiales. Esta operación puede efectuarse en forma manual o en rectificadoras de herramientas y cortadores controlados por computadora. También se usan métodos avanzados de maquinado, como se indica en el capítulo 27. El reacondicionamiento de las herramientas recubiertas también se realiza recubriéndolas, por lo general en instalaciones especiales para estos propósitos. Es importante que las herramientas reacondicionadas tengan las mismas características geométricas que las originales. Con frecuencia tiene que decidirse si resulta económico reacondicionar una o dos veces las herramientas, sobre todo cuando los costos de los insertos comunes no constituyen un elemento básico en la operación total. El reciclamiento de las herramientas es un factor que siempre debe considerarse, en especial si contienen materiales costosos y estratégicamente importantes, como el tungsteno y el cobalto.

22.12 Fluidos de corte

Los *fluidos de corte* se utilizan ampliamente en las operaciones de maquinado para obtener los siguientes resultados:

- Reducir la fricción y el desgaste, mejorando así la vida útil de la herramienta y el acabado superficial de la pieza de trabajo.
- Enfriar la zona de corte, mejorando así la vida útil de la herramienta y reduciendo la temperatura y la distorsión térmica de la pieza de trabajo.
- Reducir las fuerzas y el consumo de energía.
- Retirar las virutas de la zona de corte, evitando que interfieran en el proceso de corte, en particular en operaciones como el taladrado y el machueleado.
- Proteger la superficie maquinada de la corrosión ambiental.

Según el tipo de maquinado, el fluido de corte necesario puede ser un **refrigerante**, un **lubricante** o **ambos**. La efectividad de los fluidos de corte depende de factores como el tipo de operación de maquinado, los materiales de la herramienta y de la pieza de trabajo, la velocidad de corte y el método de aplicación. El agua es un excelente refrigerante y puede reducir de manera eficaz las altas temperaturas desarrolladas en la zona de corte; sin embargo, no es un lubricante efectivo, ya que no reduce la fricción. Además, provoca la oxidación de las piezas de trabajo y de los componentes de la máquina herramienta. Como hemos visto, la lubricación eficaz es un factor importante en las operaciones de maquinado.

La necesidad de un fluido de corte depende de la *severidad* de la operación de maquinado en particular, que puede definirse como el nivel de temperaturas y fuerzas encontradas, la tendencia a la formación de un filo acumulado, la facilidad con que las virutas producidas pueden retirarse de la zona de corte y cuán efectivamente se pueden aplicar los fluidos a la región apropiada de la interfaz herramienta-viruta. La severidad relativa de los procesos de maquinado se manifiesta así, en orden ascendente: aserrado, torneado, fresado, taladrado, corte de engranes, corte de roscas, machueleado y brochado interno.

Sin embargo, existen operaciones en las que la acción de enfriamiento de los fluidos de corte puede ser dañina: se ha demostrado que pueden hacer que la viruta se vuelva *más rizada*, concentrando entonces el calor cerca de la punta de la herramienta, lo que reduce la vida útil de ésta. Y aun más importante, en las operaciones de corte interrumpido, como el fresado con cortadores de dientes múltiples, el enfriamiento de la zona de

corte provoca ciclos térmicos en los dientes del cortador, lo que originaría *grietas térmicas* debidas a fatiga térmica o a impacto térmico.

Sin embargo, desde mediados de la década de 1990 ha habido una tendencia importante hacia el **maquinado casi en seco**, lo que significa un uso mínimo de fluidos de corte, así como el *maquinado en seco*; en la sección 22.12.1 se analizan estas tendencias.

Acción del fluido de corte. En la sección 33.6 se discuten con mayor detalle los mecanismos básicos de lubricación en las operaciones de trabajado de los metales. En este punto describiremos brevemente los mecanismos por los que los fluidos de corte afectan las operaciones de maquinado. No se comprende de inmediato cómo un fluido de corte puede penetrar la importante cara de ataque de la herramienta y afectar el proceso de corte. Los estudios han demostrado que dicho fluido gana el acceso a la interfaz herramienta-viruta deslizándose por los costados de la viruta mediante la *acción de capilaridad* de la red de asperezas de la superficie, que se engarzan una con otra en la interfaz. Debido al pequeño tamaño de esta red de capilaridad, el fluido de corte debe tener un tamaño molecular pequeño y poseer características humectantes apropiadas (tensión superficial). En consecuencia, por ejemplo, la grasa no puede ser un lubricante eficaz en el maquinado, pero los aceites de bajo peso molecular suspendidos en agua (emulsiones) son muy efectivos.

EJEMPLO 22.2 Efectos de los fluidos de corte en el maquinado

Se está realizando una operación de maquinado con un fluido de corte que es un lubricante eficaz. ¿Qué cambiaría en la mecánica de la operación de corte si se retirara el fluido?

Solución Como el fluido de corte es un buen lubricante, al retirarlo se produciría la siguiente cadena de eventos:

a. Aumenta la fricción en la interfaz herramienta-viruta.
b. Disminuye el ángulo del plano cortante, de acuerdo con la ecuación 21.3.
c. Aumenta la deformación cortante, como se ve en la ecuación 21.2.
d. La viruta se vuelve más gruesa.
e. Es posible que se forme un borde acumulado.

Como consecuencia de estos cambios, ocurrirán los siguientes eventos:

a. Aumentará la energía de cizallamiento o de cortante en la zona primaria.
b. Aumentará la energía de fricción en la zona secundaria.
c. Aumentará la energía total.
d. Aumentará la temperatura en la zona de corte, provocando un mayor desgaste de la herramienta.
e. Comenzará a deteriorarse el acabado superficial y será difícil mantener las tolerancias dimensionales debido al incremento de temperatura y a la expansión térmica de la pieza de trabajo durante el maquinado.

Tipos de fluidos de corte. En la sección 33.7 se describen las características y aplicaciones de los fluidos para el trabajo de los metales. Como un adelanto, a continuación se presentan los cuatro tipos de fluidos de corte que suelen utilizarse en las operaciones de maquinado:

1. **Aceites** (también llamados *aceites simples*), incluyendo aceites minerales, animales, vegetales, compuestos y sintéticos, que por lo general se utilizan en operaciones de baja velocidad donde el incremento de la temperatura no es significativo.

2. **Emulsiones** (también llamadas *aceites solubles*), que son una mezcla de aceite, agua y aditivos, se utilizan por lo regular en operaciones de alta velocidad porque el incremento de temperatura es significativo. La presencia del agua hace que las emulsiones sean refrigerantes muy eficaces.
3. Los **semisintéticos** son emulsiones químicas que contienen un poco de aceite mineral diluido en agua y aditivos que reducen el tamaño de las partículas de aceite, haciéndolas más eficaces.
4. Los **sintéticos** son productos químicos con aditivos, diluidos en agua y sin aceite.

Debido a la compleja interacción del fluido de corte, los materiales de la pieza de trabajo, la temperatura, el tiempo y las variables del proceso de corte, no se puede generalizar la aplicación de fluidos. En los capítulos 23 y 24 se dan recomendaciones sobre fluidos de corte para operaciones específicas de maquinado, recomendaciones que también hacen muchos proveedores de fluidos para el trabajo de los metales.

Métodos de aplicación de los fluidos de corte. Existen cuatro métodos básicos para aplicar los fluidos de corte en el maquinado:

1. **Inundación o enfriamiento por inundación.** Éste es el método más común (se muestra en la fig. 22.12), en el cual se indican buenas y malas prácticas de inundación. Los gastos comúnmente varían de 10 L/min (3 gal/min) para herramientas de un solo punto a 225 L/min (60 gal/min) para cortadores con dientes múltiples, como en el fresado. En algunas operaciones, como el taladrado y el fresado, se utilizan presiones del fluido de 700 a 14,000 kPa (100 a 2000 psi) a fin de retirar las virutas producidas para evitar que interfieran en la operación.
2. **Niebla o enfriamiento por niebla.** Este tipo de enfriamiento suministra fluido a las áreas inaccesibles, de modo semejante al uso de una lata de aerosol, y proporciona una mejor visibilidad de la pieza de trabajo que se está maquinando (si se compara con el enfriamiento por inundación). Es eficaz con fluidos con base de agua a presiones de aire de 70 a 600 kPa (10 a 80 psi). Sin embargo, tiene una capacidad de

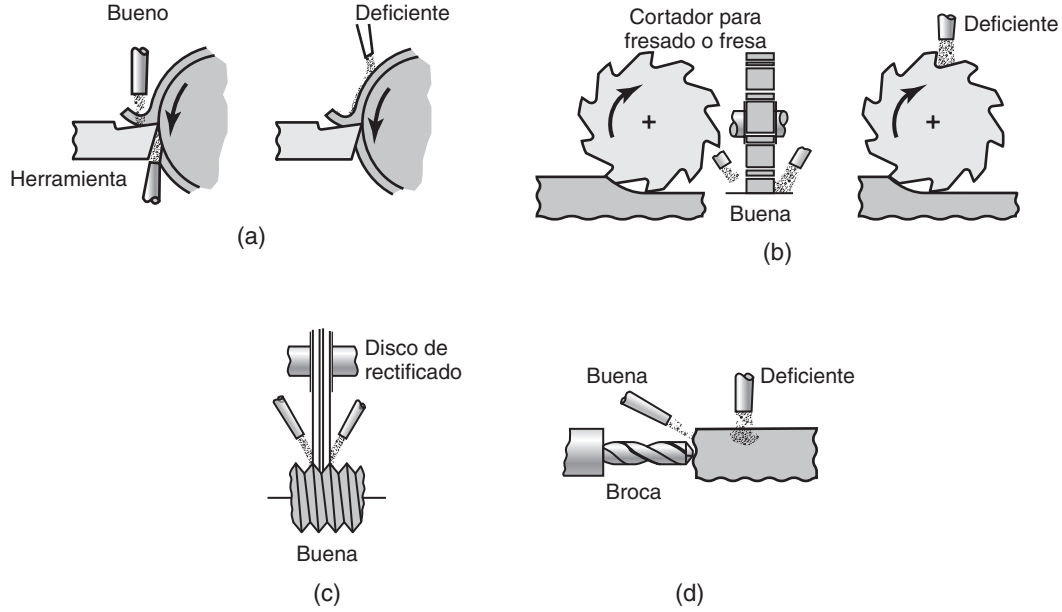


FIGURA 22.12 Esquema de métodos apropiados para la aplicación de fluidos de corte (inundación) en diversas operaciones de maquinado: *(a)* torneado; *(b)* fresado; *(c)* rectificado de roscas, y *(d)* taladrado.

enfriamiento limitada. La aplicación de la niebla requiere ventilación para evitar que el operador y otras personas cercanas inhalen partículas presentes en el fluido.

3. **Sistemas de alta presión.** Con la velocidad y potencia crecientes de las modernas máquinas herramienta controladas por computadora, la generación de calor se ha convertido en un factor importante. Es muy efectivo el uso de sistemas de enfriamiento refrigerados a alta presión para aumentar la velocidad de disipación de calor de la zona de corte. También se usan presiones elevadas para entregar el fluido de corte mediante boquillas especialmente diseñadas que dirigen un poderoso chorro de fluido a la zona, en particular dentro de la cara de relevo o de claro de la herramienta (ver fig. 21.3). Las presiones empleadas, que por lo general se encuentran en el intervalo de 5.5. a 35 MPa (800 a 5000 psi), actúan como rompevirutas en situaciones en las que las virutas producidas podrían ser largas y continuas, interfiriendo en la operación de corte. Para evitar daños a la superficie de la pieza de trabajo por el impacto de cualquier partícula presente en el chorro de alta presión, el tamaño de los contaminantes en el refrigerante no debe exceder las 20 μm (800 μpulg). El filtrado apropiado y continuo del fluido también es fundamental para mantener la calidad.
4. **Mediante el sistema de la herramienta de corte.** Se ha puntualizado la severidad de diversas operaciones de maquinado respecto de las dificultades de suministrar fluidos dentro de la zona de corte y retirando las virutas. Para una aplicación más eficaz, se pueden producir estrechos pasajes tanto en las herramientas de corte como en los portaherramientas para aplicar los fluidos de corte a alta presión. Hemos mostrado dos versiones de este método: *(a)* el taladrado de cañones, mostrado en la figura 23.24, con un pequeño orificio largo a través del cuerpo de la propia broca, y *(b)* barras de mandrinado, mostradas en la figura 23.17a, donde existe un largo orificio a través del zanco (portaherramientas) en el que se sujeta el inserto. Se han desarrollado diseños similares para herramientas de corte e insertos y para suministrar fluidos de corte a través del husillo de la máquina herramienta.

Efectos de los fluidos de corte. La selección de un fluido de corte también debe incluir factores como sus efectos sobre:

- El material de la pieza de trabajo y las máquinas herramienta.
- Consideraciones biológicas.
- El medio ambiente.

Al seleccionar un fluido de corte, se debe considerar si el componente maquinado se someterá a esfuerzos y a efectos adversos, lo que tal vez produzca agrietamiento por esfuerzo-corrosión. Esto es importante, en particular para los fluidos de corte con aditivos de azufre y cloro. Por ejemplo, *(a)* no deben utilizarse fluidos que contengan azufre con las aleaciones de base níquel, y *(b)* no deben usarse fluidos que tengan cloro con el titanio. Los fluidos de corte también pueden afectar de manera adversa los componentes de la máquina herramienta, por lo que debe considerarse su compatibilidad con diversos materiales metálicos y no metálicos en la máquina herramienta. Las partes maquinadas tienen que limpiarse y lavarse para retirar cualquier residuo del fluido de corte, como se indica en la sección 34.16. Esta operación puede ser significativa en tiempo y costo. Por consiguiente, la tendencia es emplear fluidos de baja viscosidad, con base de agua, para facilitar la limpieza y el filtrado.

Es común que el operador de la máquina herramienta esté muy cerca de los fluidos de corte, por lo que los efectos de este contacto sobre su salud deben ser una preocupación primaria. La niebla, las emanaciones, el humo y los olores provenientes de los fluidos pueden provocar severas reacciones en la piel y problemas respiratorios, en particular si se usan fluidos con constituyentes químicos, como azufre, cloro, fósforo, hidrocarburos, biocidas y diversos aditivos. Se han obtenido grandes avances para asegurar que los flui-

dos de corte se utilicen con seguridad en las plantas manufactureras, teniendo en mente la reducción o eliminación de su uso mediante la adopción de las tendencias más recientes en las técnicas de maquinado en seco, o casi en seco (ver sección 21.12.1).

Los fluidos de corte (y otros fluidos para el trabajo de los metales que se utilizan en las operaciones de manufactura) pueden sufrir cambios químicos cuando se emplean repetidamente a lo largo del tiempo. Es posible que estos cambios se deban a los efectos ambientales o a la contaminación de diversas fuentes, incluyendo las virutas metálicas y las partículas finas producidas durante el maquinado, así como a las trampas de aceite (provenientes de fugas en los sistemas hidráulicos, aceites de los miembros deslizantes de las máquinas y sistemas lubricantes de las máquinas herramienta). Estos cambios comprenden el crecimiento de microbios (bacterias, moho y levadura), sobre todo en presencia de agua, convirtiéndose en un riesgo ambiental y afectando de manera adversa las características y la eficacia de los fluidos de corte.

Existen varias técnicas para clarificar los fluidos de corte utilizados, como el asentado, desnatado, centrifugado y filtrado. El reciclamiento comprende el tratamiento de los fluidos con diversos aditivos, agentes, biocidas y desodorizantes, así como el tratamiento de agua (para los fluidos con base de agua). Las prácticas de disposición de estos fluidos deben cumplir las leyes y reglamentos federales, estatales y locales.

22.12.1 Maquinado casi seco y en seco

Por razones económicas y ambientales, desde mediados de la década de 1990 hay una tendencia mundial a minimizar o eliminar el uso de los fluidos para el trabajo de los metales, tendencia que ha llevado a la práctica del *maquinado casi seco* (NDM, por sus siglas en inglés), con beneficios importantes como:

- Alivio del impacto ambiental causado por el uso de fluidos de corte, mejorando la calidad del aire en las plantas de manufactura y reduciendo los riesgos para la salud.
- Reducción del costo de las operaciones de maquinado, incluyendo el costo de mantenimiento, reciclado y disposición de los fluidos de corte.
- Mejoría adicional de la calidad superficial.

La importancia de este enfoque se evidente al observar que, sólo en Estados Unidos, cada año se consumen millones de galones de fluidos para el trabajo de los metales. Además, se estima que dichos fluidos constituyen de 7% a 17% de los costos totales de maquinado.

El principio detrás del corte casi seco es la aplicación de una fina niebla de una mezcla de aire y fluido que contiene una cantidad muy pequeña de fluido de corte, incluyendo aceite vegetal. La mezcla se suministra a la zona de corte a través del husillo de la máquina herramienta, comúnmente por una boquilla de 1 mm de diámetro y a una presión de 600 kPa (85 psi). Se utiliza a un promedio de 1 a 100 cc/hr, que es (cuando mucho) un diezmilésimo de los utilizados en el enfriamiento por inundación. En consecuencia, al proceso también se le conoce como *lubricación con cantidad mínima* (MQL, por sus siglas en inglés).

El *maquinado en seco* también es una alternativa viable. Con importantes avances en las herramientas de corte, se ha demostrado que es eficaz en diversas operaciones de maquinado (particularmente torneado, fresado y corte de engranes) en aceros, aceros aleados y hierros fundidos, aunque no para las aleaciones de aluminio.

Una de las funciones del lubricante en el corte de metales consiste en retirar las virutas de la zona de corte. Esto parece ser problemático en el maquinado en seco. Sin embargo, se han creado diseños de herramientas que permiten aplicar aire presurizado, con frecuencia a través del zanco de la herramienta. El aire comprimido no cumple ningún propósito de lubricación, sólo provee un enfriamiento limitado, pero es muy eficaz para retirar las virutas de la interfaz de corte.

Maquinado criogénico. Los más recientes desarrollos en el maquinado incluyen el uso de gases criogénicos, como *nitrógeno* y *bióxido de carbono*, como refrigerantes en el maquinado. Con boquillas de diámetro pequeño y a una temperatura de −200 °C (−320 °F), el nitrógeno líquido se inyecta en la zona de corte. Debido a la reducción de temperatura, se mantiene la dureza de la herramienta y se refuerza su vida útil, permitiendo así mayores velocidades de corte. Asimismo, las virutas son más frágiles, de ahí que se aumente la maquinabilidad, y el nitrógeno simplemente se evapora, por lo que no existe impacto ambiental adverso.

RESUMEN

- A lo largo del último siglo se ha desarrollado una amplia variedad de materiales para herramientas de corte, y los más utilizados han sido los aceros de alta velocidad, los carburos, los cerámicos, el nitruro de boro cúbico y el diamante. Los materiales para herramientas tienen una vasta gama de propiedades mecánicas y físicas, como dureza en caliente, tenacidad, estabilidad química, neutralidad y resistencia al astillado y el desgaste.
- Se han desarrollado diversos recubrimientos para herramientas con mejoras importantes en la vida útil de las mismas, el acabado superficial y la economía de las operaciones de maquinado. Los materiales de recubrimiento comunes son el nitruro de titanio, el carburo de titanio, el carbonitruro de titanio y el óxido de aluminio; los recubrimientos de diamante también han ganado aceptación. Se tiende hacia los recubrimientos de fases múltiples para mejorar aún más el desempeño.
- La selección de los materiales apropiados para las herramientas depende no sólo del material a maquinar, sino también de los parámetros del proceso y de las características de la máquina herramienta.
- Los fluidos de corte son importantes en las operaciones de maquinado porque reducen la fricción, el desgaste, las fuerzas de corte y los requerimientos de potencia. En general, las operaciones de corte más lentas y las que se realizan con altas presiones de la herramienta de corte requieren un fluido con buenas características de lubricación. En las operaciones de alta velocidad, donde la elevación de la temperatura puede ser significativa, se necesitan fluidos con buena capacidad de enfriamiento y alguna lubricidad. En la selección de los fluidos de corte deben considerarse sus posibles efectos adversos sobre las partes maquinadas, las máquinas herramientas y sus componentes, el personal y el ambiente.

TÉRMINOS CLAVE

Aceros de alta velocidad
Aleaciones de cobalto fundido
Carburo de titanio
Carburo de tungsteno
Carburos
Carburos micrograno
Carburos no recubiertos
Cerámicos
Cerámicos con base de alúmina
Cerámicos con base de nitruro de silicio
Cermets
Cortes de acabado
Cortes de desbaste
Costos de herramientas
Diamante policristalino
Estabilidad química
Estelita
Fluidos de corte
Herramientas de diamante
Herramientas recubiertas
Herramientas reforzadas con triquitas
Insertos
Inundación
Lubricantes
Maquinado casi seco
Maquinado criogénico
Maquinado en seco
Nanocristalino
Niebla
Nitruro de boro cúbico
Nitruro de boro cúbico policristalino
Nitruro de titanio
Reacondicionamiento de herramientas
Recubrimientos de diamante
Recubrimientos de fases múltiples
Refrigerantes
Resistencia al desgaste
Rompevirutas
Sialón
Tenacidad

BIBLIOGRAFÍA

ASM Handbook, Vol. 16: *Machining*, ASM International, 1989.
ASM Handbook, Vol. 3: *Properties and Selection: Stainless Steels, Tool Materials and Special Purpose Metals*, ASM International, 1980.
ASM Specialty Handbook: Tool Materials, ASM International, 1995.
Byers, J. P. (ed.), *Metalworking Fluids*, Marcel Dekker, 1994.
Kalpakjian, S. (ed.), *Tool and Die Failures: Source Book*, ASM International, 1982.
Komanduri, R., *Tool Materials,* en *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 4a. ed., Vol. 24, 1997.
Machinery's Handbook, Industrial Press, revisado periódicamente.
Machining Data Handbook, 3a. ed., 2 vols., Machinability Data Center, 1980.
Nachtman, E. S. y Kalpakjian, S., *Lubricants and Lubrication in Metalworking Operations*, Marcel Dekker, 1985.
Roberts, G. A., Krauss, G. y Kennedy, R., *Tool Steels*, 5a. ed., ASM International, 1997.
Shaw, M. C., *Metal Cutting Principles*, 2a. ed., Oxford, 2005.
Schey, J. A., *Tribology in Metalworking-Friction: Wear and Lubrication*, ASM International, 1983.
Sluhan, C. (ed.), *Cutting and Grinding Fluids: Selection and Application*, Society of Manufacturing Engineers, 1992.
Stephenson, D. A. y Agapiou, J. S., *Metal Cutting Theory and Practice*, Marcel Dekker, 1996.
Trent, E. M. y Wright, P. K., *Metal Cutting*, 4a. ed., Butterworth-Heinemann, 1999.
Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4a. ed., Vol. 1: *Machining*, Society of Manufacturing Engineers, 1983.

PREGUNTAS DE REPASO

22.1 ¿Cuáles son las propiedades importantes requeridas en los materiales para herramientas de corte?
22.2 ¿Cuáles son las diferencias en composición y propiedades entre las herramientas de acero al carbono y de acero de alta velocidad?
22.3 ¿Cuál es la composición de una herramienta característica de carburo?
22.4 ¿Por qué se desarrollaron los insertos para herramientas de corte?
22.5 ¿Por qué se recubren las herramientas? ¿Cuáles son los materiales comunes para recubrimiento? ¿Qué es un recubrimiento de fases múltiples? ¿Cuáles son sus ventajas?
22.6 Explique las aplicaciones y limitaciones de las herramientas a base de cerámicos.
22.7 ¿Cuál es la composición del sialón?
22.8 ¿Cómo se reacondicionan las herramientas de corte?
22.9 Liste las funciones principales de los fluidos de corte.
22.10 Explique cómo penetran los fluidos de corte en la zona de corte.
22.11 Liste los métodos mediante los cuales se aplican los fluidos de corte en las operaciones de maquinado.
22.12 Describa las ventajas y limitaciones de las herramientas de diamante *(a)* monocristalino, y *(b)* policristalino.
22.13 ¿Cuál es el material más duro que se conoce después del diamante?
22.14 ¿Qué es un cermet? ¿Cuáles son sus ventajas?
22.15 Explique la diferencia entre la serie M y la serie T de los aceros de alta velocidad.

PROBLEMAS CUALITATIVOS

22.16 Explique por qué se han desarrollado tantos tipos de materiales para herramientas de corte a lo largo de los años. ¿Por qué aún siguen desarrollándose?
22.17 ¿Qué propiedades de los materiales para herramientas son adecuadas para las operaciones de corte interrumpido? ¿Por qué?
22.18 Indique las razones para recubrir herramientas de corte con múltiples capas de diferentes materiales.
22.19 Liste los elementos de aleación utilizados en los aceros de alta velocidad. Explique por qué son tan eficaces en las herramientas de corte.
22.20 Como se indicó en la sección 22.1, los materiales para herramientas de corte pueden tener propiedades en conflicto con las operaciones de maquinado. Describa sus observaciones respecto de esta materia.
22.21 Comente los propósitos de los chaflanes en los insertos y sus características de diseño.
22.22 Explique el impacto económico de la tendencia mostrada en la figura 22.6.
22.23 ¿Por qué la temperatura tiene un efecto tan importante en la vida útil de las herramientas?

22.24 Las herramientas de corte de cerámicos y cermets tienen ciertas ventajas sobre las herramientas de carburos. Entonces, ¿por qué no las han reemplazado totalmente?
22.25 ¿Pueden tener efectos adversos los fluidos de corte? De ser así, ¿cuáles son?
22.26 Describa las tendencias que observó en la tabla 22.2.
22.27 ¿Por qué son importantes la estabilidad química y la neutralidad en las herramientas de corte?
22.28 ¿Cómo haría para medir la efectividad de los fluidos de corte? Explique cualquier dificultad que pudiera encontrar.
22.29 Los recubrimientos de nitruro de titanio en las herramientas reducen el coeficiente de fricción en la interfaz herramienta-viruta. ¿Qué importancia tiene esto?
22.30 Describa las condiciones necesarias para el uso óptimo de las capacidades de las herramientas de corte de diamante y de nitruro de boro cúbico.
22.31 Liste y comente las ventajas de recubrir las herramientas de acero de alta velocidad.
22.32 Explique los límites de aplicación cuando se comparan las herramientas de corte de carburo de tungsteno con las de carburo de titanio.
22.33 En general, se prefieren los ángulos negativos de ataque para las herramientas a base de cerámicos, de diamante y de nitruro de boro cúbico. ¿Por qué?
22.34 ¿Cree que existe relación entre el costo de una herramienta de corte y su resistencia en caliente? Explique su respuesta.
22.35 Realice una investigación en la bibliografía técnica y dé algunos valores característicos de las velocidades de corte para las herramientas de acero de alta velocidad y para varios materiales de la pieza de trabajo.
22.36 En la tabla 22.1, las últimas dos propiedades listadas pueden ser importantes para la vida útil de la herramienta de corte. ¿Por qué?
22.37 Se ha indicado que los recubrimientos de nitruro de titanio permiten que las velocidades de corte y los avances sean mayores que con herramientas no recubiertas. Investigue en la bibliografía técnica y elabore una tabla que muestre el incremento porcentual de las velocidades y avances que podrían obtenerse al recubrir las herramientas.
22.38 Notará en la figura 22.1 que todos los materiales para herramientas tienen una amplia variedad de durezas para una temperatura particular, especialmente los carburos. Describa los factores que sean responsables de esta gama.
22.39 Liste y explique los factores que deben considerarse en la decisión de reacondicionar, reciclar o desechar una herramienta de corte.
22.40 En relación con la tabla 22.1, establezca qué materiales para herramientas serían adecuados para las operaciones de corte interrumpido. Explique su respuesta.
22.41 ¿Cuál de las propiedades indicadas en la tabla 22.1 es, según su opinión, la menos importante en las herramientas de corte? Explique su respuesta.
22.42 Si el objetivo de una broca es el trabajo en madera, ¿con qué material es más probable que se fabrique? (*Sugerencia:* En el trabajo en madera, es raro que las temperaturas se eleven a 400 °C). ¿Existe alguna razón por la cual una broca como la indicada no pueda utilizarse para taladrar algunos orificios en un metal? Explique su respuesta.
22.43 ¿Cuáles son las consecuencias de un recubrimiento que tenga un coeficiente de dilatación térmica diferente al del sustrato?
22.44 Discuta las ventajas y limitaciones relativas al maquinado casi seco. Considere todos los aspectos técnicos y económicos.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

22.45 Revise el contenido de la tabla 22.1. Grafique varias curvas para mostrar relaciones entre intervalos, si existe alguna, entre parámetros como la dureza, la resistencia a la ruptura transversal y la resistencia al impacto. Comente sus observaciones.
22.46 Obtenga datos sobre las propiedades térmicas de diferentes fluidos de corte. Identifique los que sean refrigerantes eficaces (como los fluidos con base de agua) y los que sean buenos lubricantes (como los aceites).
22.47 En la primera columna de la tabla 22.2 se muestran siete propiedades importantes de las herramientas de corte. Agregue datos numéricos para cada propiedad de cada uno de los materiales indicados en la tabla. Describa sus observaciones, incluyendo cualquier dato que se traslape.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

22.48 Describa con detalle lo que piensa en relación con los factores técnicos y económicos comprendidos en la selección de materiales para herramientas.

22.49 Una de las principales preocupaciones con los refrigerantes es la degradación ocasionada por el ataque biológico de las bacterias. A menudo se les agregan biocidas químicos para prolongar su vida útil, pero estos biocidas complican la disposición de los refrigerantes. Investigue en la bibliografía respecto de los últimos desarrollos sobre el uso de biocidas benignos con el medio ambiente en los fluidos de corte.

22.50 Póngase en contacto con varios proveedores de herramientas de corte, o busque en sus sitios de Internet. Liste los costos de herramientas de corte comunes para diversos tamaños, formas y características.

22.51 Como puede ver, en la actualidad existen varios tipos de materiales para herramientas de corte para las operaciones de maquinado. Sin embargo, aún se realizan muchas investigaciones y desarrollos destinados a estos materiales. Liste las razones por las que piensa que se efectúan dichos estudios. Comente cada una de esas razones, con una aplicación o ejemplo específico.

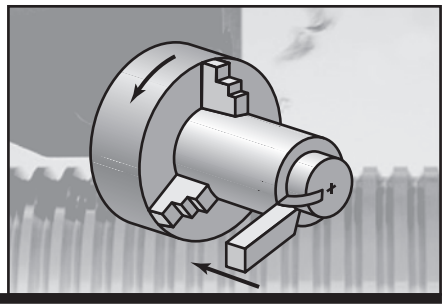
22.52 Suponga que está a cargo de un laboratorio para el desarrollo de fluidos de corte nuevos o mejorados. Con base en los temas presentados en este capítulo y en el anterior, sugiera una lista de temas para que investiguen los miembros de su equipo. Explique por qué eligió esos temas.

22.53 Realice una investigación en la bibliografía técnica y describa las tendencias en los nuevos materiales para herramientas de corte y recubrimientos. ¿Cuáles se están poniendo a disposición de la industria?

CAPÍTULO

23

Procesos de maquinado utilizados para producir formas redondas: torneado y producción de orificios



23.1 Introducción 674
23.2 Proceso de torneado 676
23.3 Tornos y operaciones en el torno 686
23.4 Mandrinado y máquinas para mandrinar 703
23.5 Taladrado, brocas y taladros 704
23.6 Rimado y rimas 714
23.7 Machueleado y machuelos 716

EJEMPLOS:

23.1 Velocidad de remoción de material y fuerza de corte en el torneado 685
23.2 Partes típicas fabricadas en máquinas herramienta de torneado CNC 693
23.3 Maquinado de formas complejas 694
23.4 Velocidad de remoción de material y torque en el taladrado 710

ESTUDIO DE CASO:

23.1 Retenedor de tornillo para huesos 717

Con los dos capítulos anteriores como antecedente, en éste se describen los procesos de maquinado que tienen la capacidad de generar formas redondas, las cuales pueden ser formas u orificios redondos en lo exterior (o simétricos respecto de un eje). Se hace énfasis en:

- Las características de los tornos y las operaciones de torneado.
- Los procesos de remoción externa e interna de material.
- El tipo de herramientas de corte utilizadas en estas operaciones.

Partes comunes fabricadas mediante este método: componentes de máquinas, monobloques y cabezas para motores, partes con formas complejas y tolerancias cerradas, así como partes roscadas externa e internamente.

Procesos alternativos: fundición de precisión, metalurgia de polvos, moldeo por inyección de polvos, maquinado abrasivo y laminación de roscas.

23.1 Introducción

En este capítulo se describen los procesos de maquinado con la capacidad de producir partes que básicamente tienen forma redonda. Los productos comunes fabricados mediante este método pueden ser tan pequeños como los tornillos miniatura para las bisagras de los armazones de anteojos, o tan grandes como las flechas de las turbinas para plantas de energía hidroeléctrica, los rodillos de los molinos de laminación, los cilindros y los barriles para cañones.

Uno de los procesos de maquinado más básicos es el *torneado*, en el cual la parte rota mientras se está maquinando. Por lo común, el material inicial es una pieza de trabajo que se ha fabricado mediante otros procesos, como fundición, forjado, extrusión, estirado o metalurgia de polvos, según se describe en las partes II y III. Los procesos de torneado, que suelen efectuarse en un *torno* o *máquina herramienta* similar, se muestran en la figura 23.1 y en la tabla 23.1. Estas máquinas son muy versátiles y tienen la capacidad de producir una amplia variedad de formas, como se indica a continuación:

- **Torneado**: produce piezas de trabajo rectas, cónicas, curvadas o ranuradas (fig. 23.1a a la d), como ejes o flechas, husillos y pasadores.

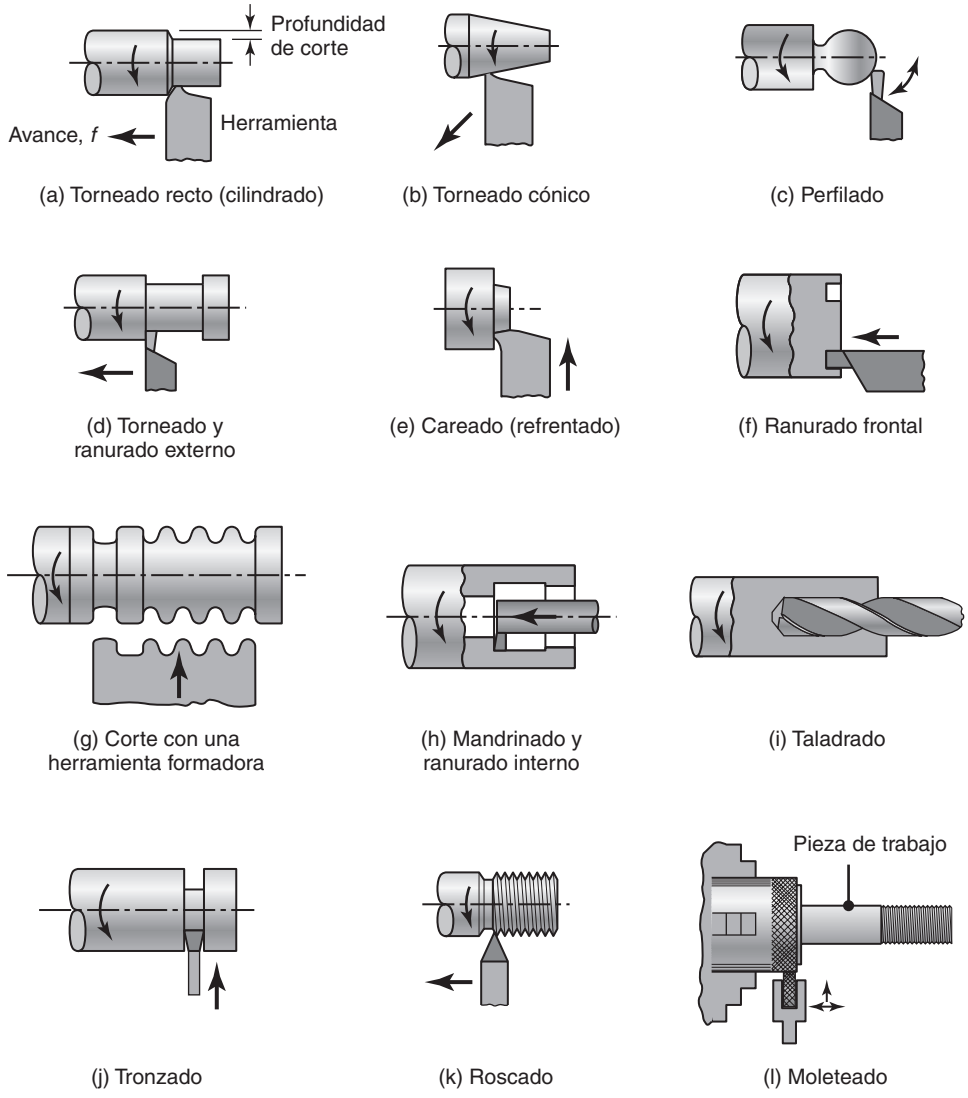


FIGURA 23.1 Diversas operaciones de corte que se pueden realizar en un torno. Obsérvese que todas las partes son circulares, propiedad a la que se conoce como simetría respecto de un eje. Las herramientas utilizadas, su forma y los parámetros de procesamiento, se describen a lo largo de este capítulo.

- **Careado (refrentado)**: produce una superficie plana al final de la parte, perpendicular a su eje (fig. 23.1e), útil para partes que se ensamblan con otros componentes. El *ranurado frontal* crea ranuras para aplicaciones como los asientos para sellos en forma de anillos en O (*O-rings*) (fig. 23.1f).
- **Corte con herramientas de forma o formadora** (fig. 23.1g): produce diversas formas simétricas respecto del eje para efectos funcionales o estéticos.
- **Mandrinado o perforado**: agranda un orificio o cavidad cilíndrica fabricada mediante un proceso previo o produce ranuras circulares internas (fig. 23.1h).
- **Taladrado**: produce un orificio (fig. 23.1i), que después puede mandrinarse para mejorar su precisión dimensional y acabado superficial.

TABLA 23.1

Características generales de los procesos de maquinado y tolerancias dimensionales características

Proceso	Características	Tolerancias dimensionales características, ± mm (pulgadas)
Torneado	Operaciones de torneado y careado (refrentado) en todos los tipos de materiales, utiliza herramientas de una sola punta o de forma, los tornos mecánicos requieren mano de obra experta, baja velocidad de producción (pero velocidad media a alta con tornos de torreta y máquinas automáticas) que requiere mano de obra menos experta.	Fino: 0.025–0.13 (0.001–0.005) Basto: 0.13 (0.005)
Mandrinado	Superficies o perfiles internos con características similares al torneado, es importante la rigidez de la barra para mandrinar para evitar traqueteo.	0.025 (0.001)
Taladrado	Orificios redondos de varios tamaños y profundidades, alta velocidad de producción, la mano de obra calificada se requiere dependiendo de la ubicación de los orificios y la precisión especificada, requiere mandrinado y escariado para mejorar precisión.	0.075 (0.003)
Fresado	Gran variedad de formas que comprenden contornos, superficies planas y ranuras; versátil; velocidad de producción baja a media; requiere mano de obra calificada.	0.13–0.25 (0.005–0.01)
Planeado	Superficies planas grandes y perfiles de contornos rectos en piezas de trabajo largas, producción de bajas cantidades, la mano de obra calificada se requiere dependiendo de la forma de la parte.	0.08–0.13 (0.003–0.005)
Cepillado de mesa fija	Superficies planas y perfiles de contornos rectos en piezas de trabajo relativamente pequeñas, producción de bajas cantidades, la mano de obra calificada se requiere dependiendo de la forma de la parte.	0.05–0.13 (0.002–0.003)
Brochado	Superficies internas y externas, ranuras y contornos; buen acabado superficial; herramientas costosas; alta velocidad de producción; la mano de obra calificada se requiere dependiendo de la forma de la parte.	0.025–0.15
Aserrado	Cortes rectos y de contornos en formas planas o estructurales; no adecuado para materiales duros, a menos que la sierra tenga dientes de carburo o estén recubiertos con diamante, baja velocidad de producción, por lo general se requiere mano de obra poco calificada.	0.8

- **Seccionado**: también conocido como **tronzado**, corta una pieza del extremo de una parte, como se hace en la producción de masas o piezas en bruto para su procesamiento adicional como productos discretos (fig. 23.1j).
- **Roscado**: produce roscas externas o internas (fig. 23.1k).
- **Moleteado**: produce rugosidad con una forma regular sobre las superficies cilíndricas, como en la fabricación de perillas (fig. 23.1l).

Por lo general, las operaciones de corte resumidas se realizan en un **torno** (fig. 23.2), para el que existen varios diseños, tamaños, capacidades y características controladas por computadora (como se ve en la sección 23.3 y el capítulo 25). En las figuras 21.2 y 23.3 se muestra cómo el torneado se efectúa a diversas (1) velocidades de rotación, N, de la pieza de trabajo sujeta en un husillo; (2) profundidades de corte, d, y (3) avances, f, dependiendo de los materiales de dicha pieza y de las herramientas de corte, el acabado superficial y la precisión dimensional requeridas, así como de las características de la máquina herramienta.

En este capítulo se describen los parámetros y las capacidades del proceso, las herramientas de corte y las características de las máquinas herramienta que se utilizan para producir varias partes con formas redondas. Por último, se presentan consideraciones de diseño para mejorar la productividad de cada grupo de procesos.

23.2 Proceso de torneado

La mayoría de las operaciones de torneado comprenden el uso de herramientas de corte de un solo punto de corte, con la geometría de una típica herramienta de corte derecho

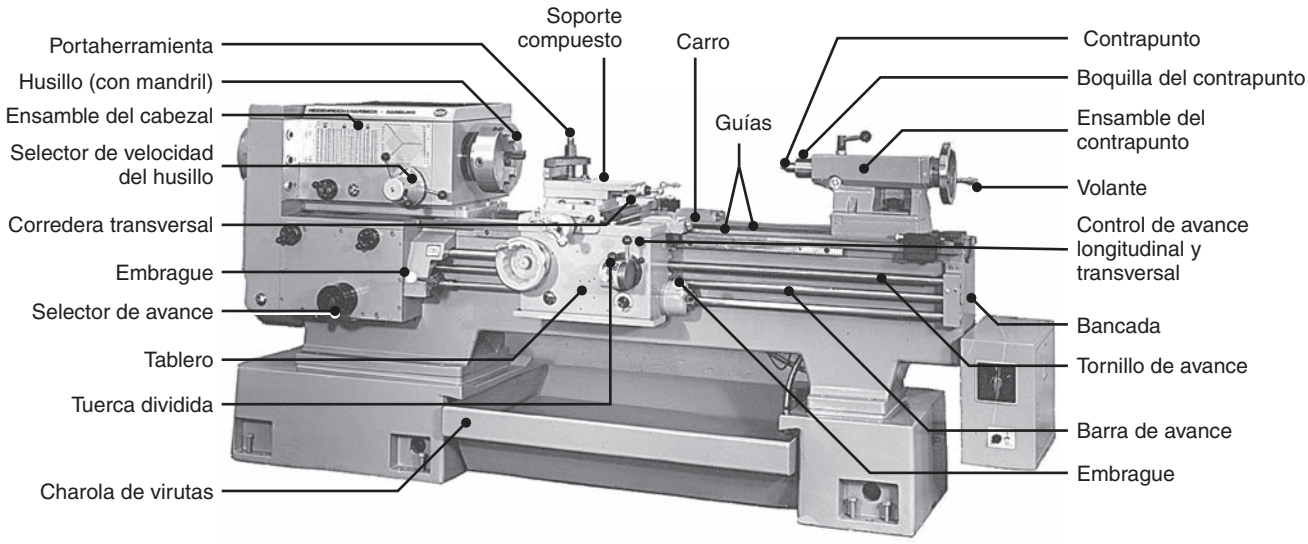


FIGURA 23.2 Vista general de un torno común que muestra varios componentes. *Fuente*: Cortesía de Heidenreich & Harbeck.

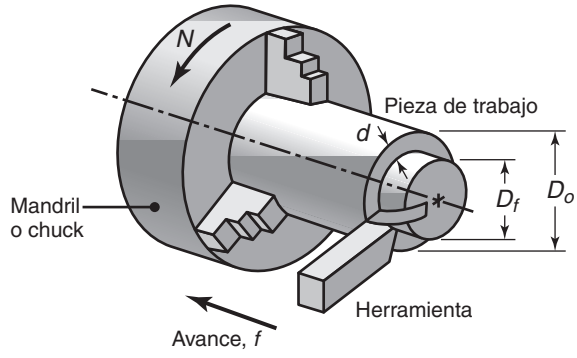


FIGURA 23.3 Esquema de la operación básica de torneado, que muestra la profundidad de corte (*d*), el avance (*f*) y la velocidad rotacional del husillo (*N*) en rev/min. La velocidad de corte es la velocidad superficial de la pieza de trabajo en la punta de la herramienta.

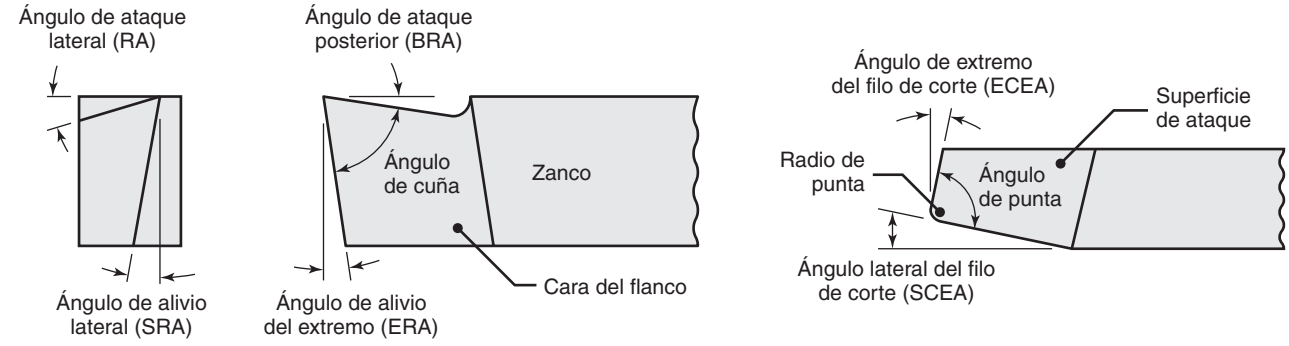


FIGURA 23.4 Designaciones de herramienta de corte derecho. El término *derecho* se refiere al avance de las herramientas de derecha a izquierda, como se muestra en la figura 23.3.

como se muestra en las figuras 21.10 y 23.4. Dichas herramientas se describen mediante una nomenclatura estandarizada. Cada grupo de materiales de la pieza de trabajo tiene un grupo óptimo de ángulos de herramienta, que se han desarrollado en gran medida a través de la experiencia (tabla 23.2).

TABLA 23.2

Recomendaciones generales de ángulos de herramientas en torneado

	Acero de alta velocidad					Insertos de carburo				
Material	Ataque posterior	Ataque lateral	Alivio del extremo	Alivio lateral	Filo de corte lateral y de extremo	Ataque posterior	Ataque lateral	Alivio del extremo	Alivio lateral	Filo de corte lateral y de extremo
Aleaciones de aluminio y magnesio	20	15	12	10	5	0	5	5	5	15
Aleaciones de cobre	5	10	8	8	5	0	5	5	5	15
Aceros	10	12	5	5	15	−5	−5	5	5	15
Aceros inoxidables	5	8–10	5	5	15	−5–0	−5–5	5	5	15
Aleaciones para alta temperatura	0	10	5	5	15	5	0	5	5	45
Aleaciones refractarias	0	20	5	5	5	0	0	5	5	15
Aleaciones de titanio	0	5	5	5	15	−5	−5	5	5	5
Hierros fundidos	5	10	5	5	15	−5	−5	5	5	15
Termoplásticos	0	0	20–30	15–20	10	0	0	20–30	15–20	10
Termofijos	0	0	20–30	15–20	10	0	15	5	5	15

En el capítulo 21 se describieron los parámetros básicos de proceso que influyen en forma directa sobre los procesos de maquinado y la importancia de controlarlos para optimizar la productividad. En esta sección se indican los parámetros del proceso de torneado, como la geometría de las herramientas y la velocidad de remoción de material, y se informa sobre las prácticas recomendadas de corte, incluyendo los materiales de las herramientas de corte, el avance, la profundidad y la velocidad de corte, así como el uso de fluidos de corte.

Geometría de las herramientas. Los diversos ángulos en una herramienta de un solo punto de corte tienen funciones importantes en las operaciones de maquinado. Se miden en un sistema de coordenadas que consta de los tres ejes principales del zanco de la herramienta, como se puede ver en la figura 23.4. Sin embargo, obsérvese que estos ángulos pueden ser diferentes, respecto de la pieza de trabajo, después de instalar la herramienta en el portaherramientas.

- El **ángulo de ataque** es importante para controlar la dirección del flujo de las virutas y la resistencia de la punta de la herramienta. Los ángulos de ataque positivos mejoran la operación de corte, reduciendo las fuerzas y temperaturas; sin embargo, también producen un ángulo pequeño comprendido en la punta de la herramienta (como en las figs. 21.3 y 23.4) que puede hacer que ésta se astille y falle de manera prematura, dependiendo de la tenacidad de su material.
- El **ángulo de ataque lateral** es más importante que el **ángulo de ataque posterior**, aunque generalmente este último controla la dirección del flujo de las virutas. Para maquinar metales y utilizar insertos de carburo, por lo común estos ángulos van de −5° a 5°.
- El **ángulo de filo de corte** afecta la formación de virutas, la resistencia de la herramienta y las fuerzas de corte en varios grados. Por lo general, son de alrededor de 15°.
- El **ángulo de alivio** controla la interferencia y fricción en la interfaz de la herramienta y la pieza de trabajo. Si es demasiado grande, la punta de la herramienta se puede astillar; si es demasiado pequeño, el desgaste del flanco puede ser excesivo. Por lo general, los ángulos de alivio son de 5°.
- El **radio de punta** afecta el acabado superficial y la resistencia de la punta de la herramienta. Cuanto más pequeño sea este radio (herramienta filosa), el acabado superficial de la pieza de trabajo será más rugoso y la resistencia de la herramienta será inferior. Sin embargo, los radios de punta grandes pueden hacer que la herramienta *traquetee*, como se describe en la sección 25.4.

Velocidad de remoción de material. La *velocidad de remoción de material* (MRR, por sus siglas en inglés) en torneado es el volumen de material removido por unidad de tiempo, con unidades de mm^3/min o $pulg^3/min$. Respecto de las figuras 21.2 y 23.3, obsérvese que por cada revolución de la pieza de trabajo se remueve una capa de material en forma de anillo, que tiene un área transversal equivalente al producto de la distancia que la herramienta recorre en una revolución (avance, f) y la profundidad de corte, d. El volumen de este anillo es producto del área transversal $(f)(d)$ y la circunferencia promedio del anillo, πD_{prom}, en la que:

$$D_{\text{prom}} = \frac{D_o + D_f}{2}$$

En el caso de cortes ligeros en piezas de trabajo de diámetro grande, el diámetro promedio se puede reemplazar con D_o.

La velocidad de rotación de la pieza de trabajo es N y la velocidad de remoción de material por revolución es $(\pi)(D_{\text{prom}})(d)(f)$. Puesto que existen N revoluciones por minuto, la velocidad de remoción es:

$$\text{MRR} = \pi D_{\text{prom}} d f N \tag{23.1a}$$

La precisión dimensional de esta ecuación se puede verificar sustituyendo las dimensiones en el lado derecho. Por ejemplo, (mm)(mm)(mm/rev)(rev/min) = mm^3/min, que indica que la remoción de material es volumétrica. Nótese que la ecuación 23.1a también se puede escribir como:

$$\text{MRR} = d f V \tag{23.1b}$$

donde V es la velocidad de corte y MRR tiene la misma unidad de mm^3/min.

El tiempo de corte, t, para una pieza de trabajo de longitud l se puede calcular considerando que la herramienta avanza a una velocidad de fN = (mm/rev)(rev/min) = mm/min. Como la distancia avanzada es l milímetros, el tiempo de corte es:

$$t = \frac{l}{fN} \tag{23.2}$$

El tiempo de corte no incluye el tiempo requerido para la *aproximación* y *retracción de la herramienta*. Dado que el tiempo invertido en los ciclos sin corte de una operación de maquinado es improductivo y perjudica la economía general, el tiempo empleado en aproximar y retirar las herramientas de la pieza de trabajo es un factor que debe considerarse. Las máquinas herramienta están diseñadas y construidas para minimizar este tiempo. Un método para lograrlo consiste en hacer avanzar con rapidez las herramientas durante los ciclos sin corte, seguidos de un movimiento más lento conforme la herramienta se adentra en la pieza de trabajo.

En la tabla 23.3 se resumen las ecuaciones anteriores y la terminología utilizada.

Fuerzas en torneado. En la figura 23.5 se muestran las tres fuerzas principales que actúan sobre una herramienta de corte, por lo cual es importante considerarlas tanto en el diseño de las máquinas herramienta como en la deflexión de las herramientas y las piezas de trabajo para las operaciones de maquinado de precisión. La máquina herramienta y sus componentes deben tener la capacidad de soportar estas fuerzas sin provocar deflexiones, vibraciones ni traqueteos significativos en toda la operación.

La **fuerza de corte** (F_c) actúa hacia abajo sobre la punta de la herramienta y, por lo tanto, tiende a desviar ésta hacia abajo y la pieza de trabajo hacia arriba. La fuerza de corte suministra la energía requerida para la operación de corte y se puede calcular mediante la información proporcionada en la tabla 21.2, a partir de la energía por unidad de volumen que se describe en la sección 21.3. El producto de la fuerza de corte y su radio desde el centro de la pieza de trabajo determina el *torque* en el husillo. El producto del torque y la velocidad del husillo determina la *potencia* requerida en la operación de torneado.

TABLA 23.3

Resumen de parámetros y fórmulas de torneado

N = Velocidad de giro de la pieza de trabajo, rpm
f = Avance, mm/rev o pulg/rev
v = Velocidad de avance, o velocidad lineal de la herramienta a lo largo de la pieza de trabajo, mm/min o pulg/min
$= fN$
V = Velocidad superficial (tangencial) de la pieza de trabajo, m/min o pies/min
$= \pi D_o N$ (para velocidad máxima)
$= \pi D_{prom} N$ (para velocidad promedio)
l = Longitud de corte, mm o pulgadas
D_o = Diámetro original de la pieza de trabajo, mm o pulgadas
D_f = Diámetro final de la pieza de trabajo, mm o pulgadas
D_{prom} = Diámetro promedio de la pieza de trabajo, mm o pulgadas
$= (D_o + D_f)/2$
d = Profundidad de corte, mm o pulgadas
$= (D_o + D_f)/2$
t = Tiempo de corte, s o min
$= l/fN$
MRR = mm^3/min o $pulg^3$/min
$= \pi D_{prom} dfN$
Torque = N • m o libras • pie
$= F_c D_{prom}/2$
Potencia = kW o hp
= (Torque)(ω), en la que $\omega = 2\pi N$rad/min

Nota: Las unidades provistas son las que se utilizan generalmente; sin embargo, en las fórmulas, deben usarse y verificarse las unidades apropiadas.

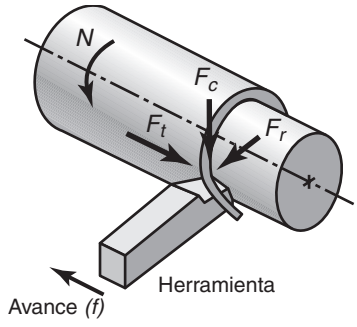


FIGURA 23.5 Fuerzas que actúan sobre una herramienta de corte en el torneado. F_c es la fuerza de corte, F_t es la fuerza de empuje o de avance (en la dirección del avance), y F_r es la fuerza radial que tiende a apartar la herramienta de la pieza de trabajo que se está maquinando.

La **fuerza de empuje** (F_t) actúa en la dirección longitudinal. También se le conoce como **fuerza de avance**, porque ocurre en la dirección de avance de la herramienta; esta fuerza tiende a empujar la herramienta hacia la derecha y a alejarla del plato. La **fuerza radial** (F_r) actúa en la dirección radial y tiende a alejar la herramienta de la pieza de trabajo. Debido a los muchos factores comprendidos en el proceso de corte, es difícil calcular las fuerzas F_t y F_r de manera directa; por lo general, si se desea, se determinan de manera experimental.

Cortes de desbaste y operaciones de acabado. El procedimiento usual en el maquinado consiste primero en efectuar uno o más *cortes de desbaste* a altas velocidades de avance y grandes profundidades de corte (y, por lo tanto, a altas velocidades de remoción de material), pero con poca consideración de la tolerancia dimensional y rugosidad de la superficie. Estos cortes van seguidos de *operaciones de acabado*, a un avance y profundidad de corte más bajos para producir un buen acabado superficial.

Materiales, avances y velocidades de corte de las herramientas. En el capítulo 22 se describieron las características generales de los materiales para las herramientas de corte. En la figura 23.6 se proporciona una amplia variedad de velocidades de corte y avances aplicables a dichos materiales, como guía general de las operaciones de torneado. En la tabla 23.4 se hacen recomendaciones específicas en cuanto a los parámetros del proceso de torneado para diversos materiales de piezas de trabajo y herramientas de corte.

Fluidos de corte. Muchos materiales metálicos y no metálicos se pueden maquinar sin fluidos de corte, pero en la mayoría de los casos la aplicación de un fluido mejora la operación de manera significativa. En la tabla 23.5 se dan recomendaciones generales sobre fluidos de corte apropiados para diversos materiales de piezas de trabajo. Sin embargo, existe una tendencia importante hacia el **maquinado casi seco** o **seco** con importantes beneficios, como se describe en la sección 22.12.1.

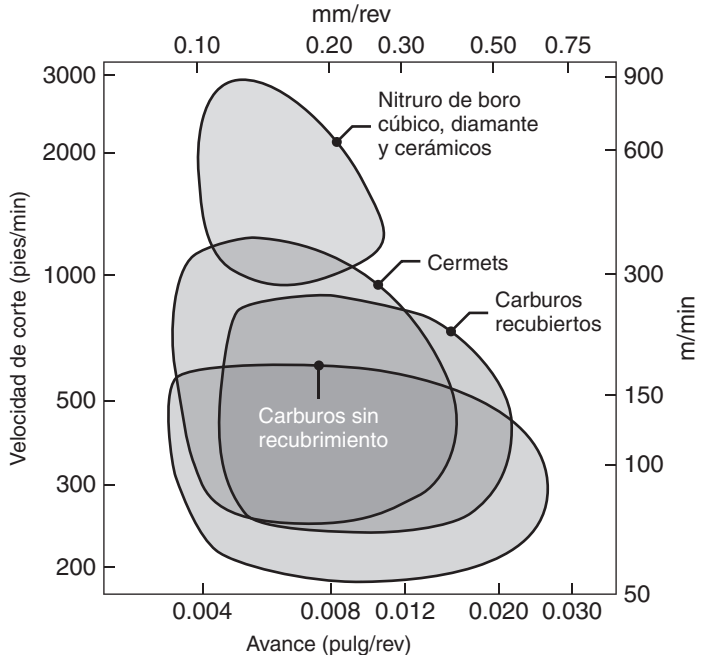


FIGURA 23.6 Velocidades y avances de corte aplicables a una variedad de materiales para herramientas.

TABLA 23.4

Recomendaciones generales para operaciones de torneado

Material de la pieza de trabajo	Herramienta de corte	Condiciones iniciales de propósito general: Profundidad de corte, mm (pulg)	Avance, mm/rev (pulgadas/rev)	Velocidad de corte, m/min (pies/min)	Intervalo para rectificado y acabado: Profundidad de corte, mm (pulg)	Avance, mm/rev (pulgadas/rev)	Velocidad de corte, m/min (pies/min)
Aceros de bajo carbono y de libre maquinado	Carburo sin recubrimiento	1.5–6.3 (0.06–0.25)	0.35 (0.014)	90 (300)	0.5–7.6 (0.02–0.30)	0.15–1.1 (0.006–0.045)	60–135 (200–450)
	Carburo con recubrimiento de cerámico	"	"	245–275 (800–900)	"	"	120–425 (400–1400)
	Carburo con triple recubrimiento	"	"	185–200 (600–650)	"	"	90–245 (300–800)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	105–150 (350–500)	"	"	60–230 (200–750)
	Cerámico de Al_2O_3	"	0.25 (0.010)	395–440 (1300–1450)	"	"	365–550 (1200–1800)
	Cermet	"	0.30 (0.012)	215–290 (700–950)	"	"	105–455 (350–1500)
Aceros de medio y alto carbono	Carburo sin recubrimiento	1.2–4.0 (0.05–0.20)	0.30 (0.012)	75 (250)	2.5–7.6 (0.10–0.30)	0.15–0.75 (0.006–0.03)	45–120 (150–400)
	Carburo con recubrimiento de cerámico	"	"	185–230 (600–750)	"	"	120–410 (400–1350)
	Carburo con triple recubrimiento	"	"	120–150 (400–500)	"	"	75–215 (250–700)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	90–200 (300–650)	"	"	45–215 (150–700)
	Cerámico de Al_2O_3	"	0.25 (0.010)	335 (1100)	"	"	245–455 (800–1500)
	Cermet	"	0.25 (0.010)	170–245 (550–800)	"	"	105–305 (350–1000)
Fundición de hierro gris	Carburo sin recubrimiento	1.25–6.3 (0.05–0.25)	0.32 (0.013)	90 (300)	0.4–12.7 (0.015–0.5)	0.1–0.75 (0.004–0.03)	75–185 (250–600)
	Carburo con recubrimiento de cerámico	"	"	200 (650)	"	"	120–365 (400–1200)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	90–135 (300–450)	"	"	60–215 (200–700)
	Cerámico de Al_2O_3	"	0.25 (0.010)	455–490 (1500–1600)	"	"	365–855 (1200–2800)
	Cerámico de SiN	"	0.32 (0.013)	730 (2400)	"	"	200–990 (650–3250)

Acero inoxidable, austenítico	Carburo con triple recubrimiento	1.5–4.4 (0.06–0.175)	0.35 (0.014)	150 (500)	0.5–12.7 (0.02–0.5)	0.08–0.75 (0.003–0.03)	75–230 (250–750)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	85–160 (275–525)	"	"	55–200 (175–650)
	Cermet	"	0.30 (0.012)	185–215 (600–700)	"	"	105–290 (350–950)
Aleaciones para alta temperatura, base níquel	Carburo sin recubrimiento	2.5 (0.10)	0.15 (0.006)	25–45 (75–150)	0.25–6.3 (0.01–0.25)	0.1–0.3 (0.004–0.012)	15–30 (50–100)
	Carburo con recubrimiento de cerámico	"	"	45 (150)	"	"	20–60 (65–200)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	30–55 (95–175)	"	"	20–85 (60–275)
	Cerámico de Al_2O_3	"	"	260 (850)	"	"	185–395 (600–1300)
	Cerámico de SiN	"	"	215 (700)	"	"	90–215 (300–700)
	cBN policristalino	"	"	150 (500)	"	"	120–185 (400–600)
Aleaciones de titanio	Carburo sin recubrimiento	1.0–3.8 (0.04–0.15)	0.15 (0.006)	35–60 (120–200)	0.25–6.3 (0.01–0.25)	0.1–0.4 (0.004–0.015)	10–75 (30–250)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	30–60 (100–200)	"	"	10–100 (30–325)
Aleaciones de aluminio							
Libre maquinado	Carburo sin recubrimiento	1.5–5.0 (0.06–0.20)	0.45 (0.018)	490 (1600)	0.25–8.8 (0.01–0.35)	0.08–0.62 (0.003–0.025)	200–670 (650–2000)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	550 (1800)	"	"	60–915 (200–3000)
	Cermet	"	"	490 (1600)	"	"	215–795 (700–2600)
	Diamante policristalino	"	"	760 (2500)	"	"	305–3050 (1000–10,000)
Alto silicio	Diamante policristalino	"	"	530 (1700)	"	"	365–915 (1200–3000)

(*Continúa*)

TABLA 23.4 *(Continuación)*

Recomendaciones generales para operaciones de torneado

		Condiciones iniciales de propósito general			Intervalo para rectificado y acabado		
Material de la pieza de trabajo	Herramienta de corte	Profundidad de corte, mm (pulgadas)	Avance, mm/rev (pulg/rev)	Velocidad de corte, m/min (pies/min)	Profundidad de corte, mm (pulg)	Avance, mm/rev (pulg/rev)	Velocidad de corte, m/min (pies/min)
Aleaciones de cobre	Carburo sin recubrimiento	1.5–5.0 (0.06–0.20)	0.25 (0.010)	260 (850)	0.4–7.51 (0.015–0.3)	0.15–0.75 (0.006–0.03)	105–535 (350–1750)
	Carburo con recubrimiento de cerámico	"	"	365 (1200)	"	"	215–670 (700–2200)
	Carburo con triple recubrimiento	"	"	215 (700)	"	"	90–305 (300–1000)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	90–275 (300–900)	"	"	45–455 (150–1500)
	Cermet	"	"	245–425 (800–1400)	"	"	200–610 (650–2000)
	Diamante policristalino	"	"	520 (1700)	"	"	275–915 (900–3000)
Aleaciones de tungsteno	Carburo sin recubrimiento	2.5 (0.10)	0.2 (0.008)	75 (250)	0.25–5.0 (0.01–0.2)	0.12–0.45 (0.005–0.018)	55–120 (175–400)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	85 (275)	"	"	60–150 (200–500)
Termoplásticos y termofijos	Carburo con recubrimiento de TiN	1.2 (0.05)	0.12 (0.005)	170 (550)	0.12–5.0 (0.005–0.20)	0.08–0.35 (0.003–0.015)	90–230 (300–750)
	Diamante policristalino	"	"	395 (1300)	"	"	150–730 (500–2400)
Compósitos, grafito reforzado	Carburo con recubrimiento de TiN	1.9 (0.075)	0.2 (0.008)	200 (650)	0.12–6.3 (0.005–0.25)	0.12–1.5 (0.005–0.06)	105–290 (350–950)
	Diamante policristalino	"	"	760 (2500)	"	"	550–1310 (1800–4300)

Fuente: Con base en datos de Kennametal, Inc.

Nota: Las velocidades de corte para herramientas de acero de alta velocidad son aproximadamente la mitad de las de los carburos sin recubrimiento.

TABLA 23.5

Recomendaciones generales de fluidos de corte para maquinado (ver también capítulo 33)

Material	Tipo de fluido
Aluminio	D, MO, E, MO + FO, CSN
Berilio	MC, E, CSN
Cobre	D, E, CSN, MO + FO
Magnesio	D, MO, MO + FO
Níquel	MC, E, CSN
Metales refractarios	MC, E, EP
Aceros	
al carbono y baja	D, MO, E, CSN, EP
aleación inoxidables	D, MO, E, CSN
Titanio	CSN, EP, MO
Zinc	C, MC, E, CSN
Zirconio	D, E, CSN

Nota: CSN = químicos y sintéticos; D = seco; E = emulsión; EP = presión extrema; FO = aceite grasoso y MO = aceite mineral.

EJEMPLO 23.1 Velocidad de remoción de material y fuerza de corte en el torneado

Una barra de acero inoxidable 304 de 6 pulgadas de largo y 0.5 pulgada de diámetro se está reduciendo a 0.480 pulgada de diámetro mediante torneado en un torno. El husillo gira a $N = 400$ rpm y la herramienta avanza a una velocidad axial o de avance de 8 pulg/min. Calcule la velocidad de corte, la velocidad de remoción de material, la potencia disipada y la fuerza de corte.

Solución La velocidad de corte es la velocidad tangencial de la pieza de trabajo. La velocidad máxima de corte se localiza en el diámetro exterior (D_o) y se obtiene a partir de la expresión

$$V = \pi D_o N$$

Por lo que

$$V = (\pi)(0.500)(400) = 628 \text{ pulg/min} = 52 \text{ pies/min}$$

La velocidad de corte en el diámetro maquinado es

$$V = (\pi)(0.480)(400) = 603 \text{ pulg/min} = 50 \text{ pies/min}$$

A partir de la información proporcionada, obsérvese que la profundidad de corte es

$$d = \frac{0.500 - 0.480}{2} = 0.010 \text{ pulgadas}$$

y la velocidad es

$$f = \frac{8}{400} = 0.02 \text{ pulg/rev}$$

Así que de acuerdo con la ecuación 23.1a, la velocidad de remoción de material es

$$MRR = (\pi)(0.490)(0.010)(0.02)(400) = 0.12 \text{ pulg}^3/\text{min}$$

También se puede utilizar la ecuación 23.1b, por medio de la cual encontramos que MRR = (0.01)(0.02)(52)(12) = 0.12 pulg^3/min. El tiempo real de corte, de acuerdo con la ecuación 23.2, es

$$t = \frac{6}{(0.02)(400)} = 0.75 \text{ min}$$

La potencia requerida se puede calcular de acuerdo con la tabla 21.2 y tomando un valor promedio para acero inoxidable de 4 W · s/mm^3 = 4/2.73 = 1.47 hp · min/pulg^3. Por lo tanto, la potencia disipada es

$$\text{Potencia} = (1.47)\,(0.123) = 0.181 \text{ hp}$$

Puesto que 1 hp = 396,000 pulgadas-libras/min, la potencia disipada es 71,700 pulgadas-libras/min.

La fuerza de corte (F_c) es la fuerza tangencial ejercida por la herramienta. La potencia es el producto del torque (T) y la velocidad de rotación en radianes por unidad de tiempo; por lo que,

$$T = \frac{(71{,}700)}{(2\pi)(400)} = 29 \text{ libras} - \text{pulgadas}$$

Puesto que $T = F_c D_{\text{prom}}/2$,

$$F_c = \frac{29}{0.490/2} = 118 \text{ lb}$$

23.3 Tornos y operaciones en el torno

Por lo general, se considera que los *tornos* son las máquinas herramienta más antiguas. Aunque los tornos para trabajos en madera se desarrollaron originalmente durante el periodo de 1001 a 1000 a.C., los tornos para trabajos en metales con tornillos reguladores no se construyeron sino hasta finales del siglo XVIII. El más común se conocía como *torno mecánico*, porque se accionaba mediante poleas aéreas y bandas desde los motores circundantes en el piso de la fábrica. En la actualidad, todos estos tornos están equipados con motores eléctricos individuales.

La velocidad máxima del husillo de los tornos es por lo regular de unos 4000 rpm, pero en el caso de tornos grandes puede ser de sólo 200 rpm. En aplicaciones especiales, las velocidades pueden llegar hasta 10,000 rpm, 40,000 rpm o más, para maquinado de muy alta velocidad. El costo de los tornos va de alrededor de $2000 dólares para los de tipo banco, hasta de unos $100,000 dólares para las unidades grandes.

Aunque simple y versátil, un torno mecánico requiere un maquinista experto, porque todos los controles se manipulan en forma manual. Por lo tanto, es poco eficaz en operaciones repetitivas y líneas de producción grandes. El resto de esta sección describe los diversos tipos de automatización que por lo general se adicionan para mejorar la eficacia.

23.3.1 Componentes del torno

Los tornos están equipados con varios componentes y accesorios, como se muestra en la figura 23.2. Sus características y funciones se describen a continuación.

Bancada. La bancada soporta los componentes principales del torno. Las bancadas tienen una masa grande y se construyen de manera rígida, por lo común de hierro gris o hierro fundido nodular. (Ver también la sección 25.3 sobre materiales nuevos para estructuras de máquinas herramienta). La parte superior de la bancada tiene dos **guías** o **correderas** con diversas secciones transversales que se endurecen y maquinan para mejorar la resistencia al desgaste y la precisión dimensional durante el torneado. En los *tornos de bancada dividida* se puede extraer una sección de la bancada frente al cabezal, a fin de acomodar piezas de trabajo de diámetro más grande.

Carro. El carro o ensamble del carro se desliza a lo largo de las guías y consta de un ensamble de la *corredera transversal*, *portaherramientas* y *tablero*. La herramienta de corte se monta en el *portaherramientas*, por lo general con un *apoyo compuesto* que gira para colocar y ajustar la herramienta. La *corredera transversal* se mueve radialmente adentro y afuera, controlando la posición radial de la herramienta de corte en operaciones como el careado (refrentado) (fig. 23.1e). El *tablero* está equipado con mecanismos para movimiento manual y mecanizado del carro y la corredera transversal por medio del *tornillo de avance*.

Cabezal. El cabezal se fija a la bancada y está equipado con motores, poleas y bandas en V que suministran energía a un *husillo* a diversas velocidades de rotación o de giro. Éstas se pueden ajustar mediante selectores de control manual o controles eléctricos. La mayoría de los cabezales están equipados con un juego de engranes y algunos tienen varios accionamientos que proporcionan al husillo una gama de velocidades continuamente variables. Poseen además un *husillo hueco* en el que se montan dispositivos de sujeción del trabajo (como los *mandriles* y las *boquillas*, ver sección 23.3.2); a través de estos husillos se pueden alimentar barras o tubos largos para diversas operaciones de torneado. La precisión del husillo es importante para la precisión del torneado, sobre todo en el maquinado de alta velocidad; los rodamientos de bolas o cónicos precargados suelen utilizarse para soportar de manera rígida el husillo.

Carro de contrapunto. El carro de contrapunto, que puede deslizarse a lo largo de las guías y sujetarse en cualquier posición, soporta el otro extremo de la pieza de trabajo. Está equipado con un centro que puede fijarse (*contrapunto fijo*) o quedar libre para rotar con la pieza de trabajo (*contrapunto vivo*). En el *manguito o boquilla del contrapunto* (parte cilíndrica hueca con orificio cónico) del carro de contrapunto se pueden montar brocas o escariadores (rimas) para taladrar orificios axiales en la pieza de trabajo.

Barra de avance y tornillo guía. La barra de avance se acciona mediante un juego de engranes a través del cabezal. La barra gira durante la operación del torno y proporciona movimiento al carro y a la corredera transversal por medio de engranes, un embrague de fricción y un cuñero de posicionamiento a lo largo de la barra. Al cerrar una *tuerca dividida* alrededor del tornillo de avance, ésta se acopla con el carro; también se utiliza para cortar roscas con precisión.

Especificaciones de los tornos. En general, un torno se especifica por:

- Su *volteo*, diámetro máximo de la pieza de trabajo que se puede maquinar (tabla 23.6).
- La distancia máxima entre el cabezal y el contrapunto (distancia entre puntos).
- La longitud de la bancada.

Por ejemplo, un torno puede tener las siguientes dimensiones: 360 mm (14 pulgadas) de volteo, que es el diámetro máximo admisible, por 760 mm (30 pulgadas) entre los centros, por 1830 mm (6 pies) de longitud de bancada. Como se describe a continuación, existen tornos de numerosos estilos y tipos de construcción y potencia. Los diámetros máximos de la pieza de trabajo pueden ser hasta de 2 m (78 pulgadas).

23.3.2 Dispositivos de sujeción del trabajo y accesorios

Los dispositivos de sujeción del trabajo son importantes, sobre todo en las máquinas herramienta y en operaciones de maquinado, ya que deben sujetar la pieza de trabajo con seguridad. Como se muestra en la figura 23.3, un extremo de la pieza se sujeta al husillo del torno mediante un mandril o "chuck", boquilla o plato de arrastre (ver fig. 23.7d).

Por lo general, un **mandril** está equipado con tres o cuatro *mordazas*. Los mandriles de *tres mordazas* suelen tener un diseño de desplazamiento engranado que hace que las mordazas se centren por sí mismas. Se utilizan para piezas de trabajo redondas (como material en barra, tubos y tubería), que se pueden centrar hasta una distancia de 0.025 mm

TABLA 23.6

Capacidades típicas y máximas dimensiones de piezas de trabajo para máquinas herramienta

Máquina herramienta	Dimensión máxima (m)	Potencia (kW)	Máximas rpm
Tornos (diámetro máximo admisible/longitud)			
De banco	0.3/1	<1	3000
Mecánico	3/5	70	4000
Torreta o revólver	0.5/1.5	60	3000
Tornillo automático	0.1/0.3	20	10,000
Máquinas de mandrinado (diámetro de trabajo/longitud)			
Husillo vertical	4/3	200	300
Husillo horizontal	1.5/2	70	1000
Taladradoras			
Banco y columna (diámetro de broca)	0.1	10	12,000
Radial (distancia de columna a husillo)	3	—	—
Control numérico (avance de la mesa)	4	—	—

Nota: Existen capacidades mayores para aplicaciones especiales.

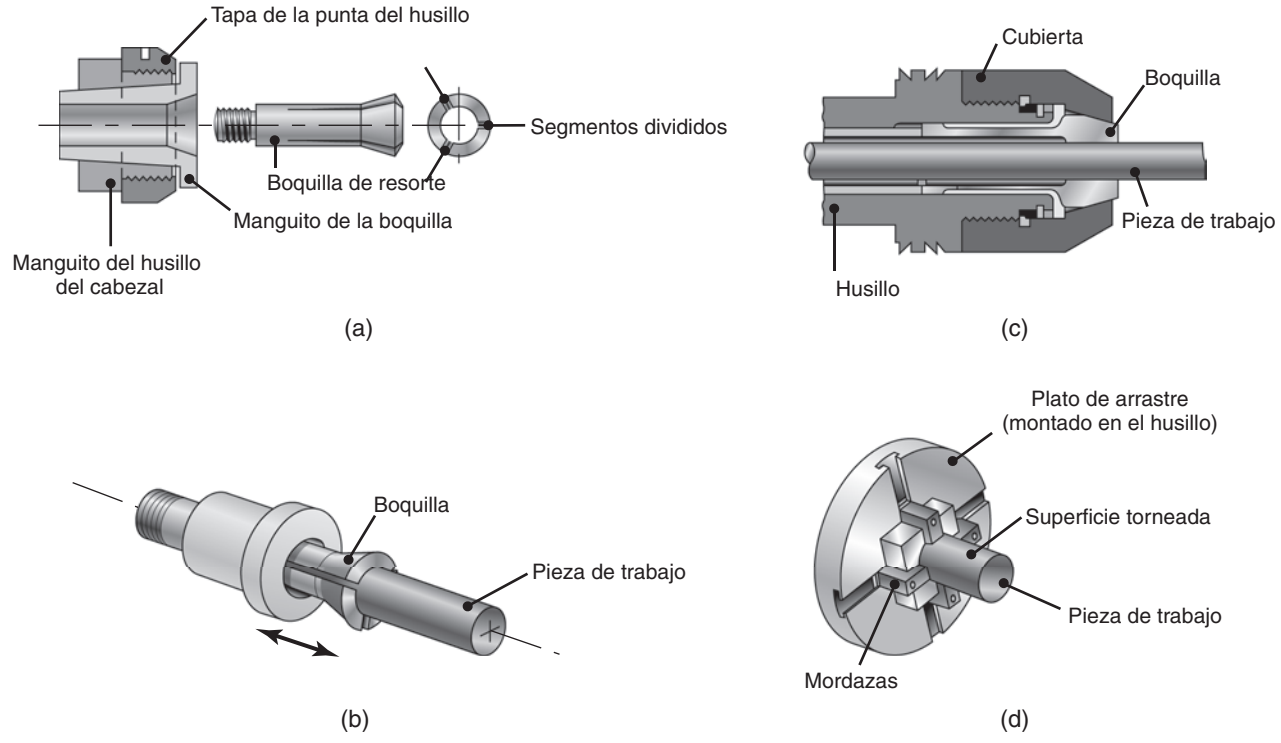


FIGURA 23.7 *(a)* y *(b)* Esquemas de una boquilla tipo inserción. La pieza de trabajo se coloca en el orificio de la boquilla y las superficies cónicas de ésta se fuerzan hacia el interior, jalándola con una barra de inserción dentro del manguito o manga. *(c)* Boquilla de tipo empuje. *(d)* Sujeción de una pieza de trabajo en un plato de arrastre.

(0.001 pulgada). Los mandriles de *cuatro mordazas* (independientes) tienen mordazas que se pueden mover y ajustar de manera independiente entre sí, por lo que se pueden emplear en piezas cuadradas, rectangulares o de formas poco comunes. Como su construcción es más robusta que los mandriles de tres mordazas, se usan en piezas pesadas o para trabajo que requiere múltiples fijaciones en el mandril, en las que la concentricidad es importante.

Las mordazas en algunos tipos de mandriles pueden invertirse para permitir la sujeción de las piezas de trabajo sobre las superficies exteriores o interiores de las piezas de trabajo huecas, como tubos y tubería. También existen mordazas fabricadas de acero de bajo carbono (*mordazas blandas*) que se pueden maquinar para darles las formas deseadas. Debido a su baja resistencia y dureza, las mordazas blandas se adaptan a pequeñas irregularidades en las piezas de trabajo y, por lo tanto, proporcionan una mejor sujeción. Los mandriles se pueden accionar *eléctrica* o *manualmente* mediante una llave de mandril. Dado que requiere más tiempo accionar los mandriles manuales, por lo general se utilizan para líneas de producción limitadas y en cuartos de herramientas.

Existen mandriles en diversos diseños y tamaños. Su selección depende del tipo y la velocidad de operación, el tamaño de la pieza de trabajo, los requisitos de producción y precisión dimensional y las fuerzas requeridas de las mordazas. Al controlar la magnitud de estas fuerzas, un operador puede asegurar que la parte no se deslice en el mandril durante el maquinado. Las altas velocidades del husillo pueden reducir las fuerzas (de sujeción) de las mordazas de manera significativa debido al efecto de las *fuerzas centrífugas*; este efecto es importante sobre todo en el torneado de precisión de tubos. Los mecanismos actuadores modernos de mordazas permiten una mayor fuerza de sujeción para desbaste y menor fuerza en operaciones de acabado.

Para cumplir las crecientes demandas de rigidez, precisión, versatilidad, potencia y altas velocidades de corte en las máquinas herramienta modernas, se han registrado avances importantes en el diseño de los dispositivos de sujeción de trabajos. Los **mandriles** o **chucks de potencia** (también llamados **mandriles de sujeción motorizados**), actuados neumática o hidráulicamente, se utilizan en equipo automatizado para altas velocidades de producción, incluyendo la carga de partes mediante robots industriales. También existen diversos tipos de *chucks* de potencia con mecanismos tipo palanca o cuña para accionar las mordazas; estos mandriles tienen movimientos (golpes) de las mordazas que por lo general se limitan a unos 13 mm (0.5 pulgada).

Una **boquilla** es básicamente un buje cónico dividido de modo longitudinal. La pieza de trabajo (por lo general, con un diámetro máximo de 1 pulgada) se coloca en el interior de la boquilla y ésta se jala (*boquilla de inserción*; fig. 23.7a y b) o se empuja (*boquilla de empuje*; fig. 23.7c) de manera mecánica en el husillo. Las superficies cónicas contraen radialmente los segmentos de la boquilla, sujetando la pieza de trabajo. Las boquillas se utilizan para piezas redondas y de otras formas (por ejemplo, cuadradas o hexagonales) y están disponibles en una amplia variedad de dimensiones progresivas.

Una ventaja de utilizar una boquilla (en vez de un mandril de tres o cuatro mordazas) es que se sujeta a casi toda la circunferencia de la parte, haciendo que se adapte bien, en particular a partes con pequeñas secciones transversales. Dado que el movimiento radial de los segmentos de la boquilla es pequeño, por lo general las piezas de trabajo deben estar dentro del límite de 0.125 mm (0.005 pulgada), que es el tamaño nominal de la boquilla.

Los **platos de arrastre** se utilizan para sujetar piezas de trabajo de forma irregular; son redondos y tienen diversas ranuras y orificios a través de los cuales se atornilla o sujeta la pieza (fig. 23.7d). Los **mandriles de centro** (fig. 23.8) se colocan en el interior de piezas de trabajo huecas o tubulares y se utilizan para sujetar las piezas que requieren maquinado en ambos extremos o en sus superficies cilíndricas. Algunos mandriles de centro se montan entre los puntos del torno.

Accesorios. Diversos dispositivos están disponibles como accesorios y aditamentos para tornos; entre ellos se encuentran los siguientes:

- Topes del carro y de la corredera transversal, con diversos diseños para detener el carro a una distancia predeterminada a lo largo de la bancada.

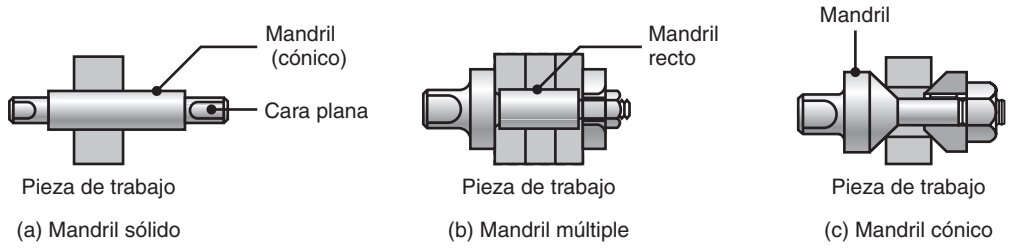


FIGURA 23.8 Diversos tipos de mandriles para sujetar las piezas de trabajo para torneado. Por lo general, estos mandriles se montan entre centros en un torno. Obsérvese que en *(a)* se pueden maquinar las superficies cilíndricas y el extremo de la pieza, en tanto que en *(b)* y *(c)* sólo se pueden maquinar las superficies cilíndricas.

- Dispositivos para tornear partes con diversas conicidades.
- Aditamentos de fresado, aserrado, corte de engranes y rectificado.
- Diversos aditamentos para mandrinado, taladrado y corte de roscas.

23.3.3 Operaciones en el torno

En una operación típica de cilindrado, la pieza de trabajo se sujeta con cualquiera de los dispositivos de sujeción ya descritos. Las partes largas y delgadas deben soportarse con un *apoyo (luneta) fijo* y un *apoyo deslizable,* colocados en la bancada, ya que en caso contrario las fuerzas de corte la curvarían. Estos apoyos están equipados por lo general con tres dedos o rodillos ajustables que soportan la pieza, mientras permiten que gire con libertad. Los apoyos fijos se sujetan directamente sobre las *guías* del torno (como se muestra en la fig. 23.2), en tanto que los *apoyos deslizables* se sujetan sobre el carro y avanzan con éste.

La herramienta de corte se sujeta al portaherramientas, que se acciona con el tornillo de avance y remueve material al avanzar a lo largo de la bancada. Una herramienta *derecha* se mueve hacia el cabezal y una herramienta *izquierda* avanza hacia el contrapunto. Las operaciones de careado (refrentado) se efectúan moviendo la herramienta en forma radial con la corredera transversal sujetando también el carro para mejorar la precisión dimensional.

Las **herramientas de forma o formadoras** se utilizan para producir diversas formas en piezas de trabajo sólidas y redondas (fig. 23.1g), moviendo la herramienta radialmente hacia el interior mientras la parte está girando. El corte de formas no es apropiado para ranuras profundas y angostas o esquinas filosas, porque la vibración y el traqueteo pueden causar un acabado superficial pobre. Como regla: *(a)* la sección de la parte a la que se da forma no debe ser mayor a más o menos 2.5 veces el diámetro mínimo de la parte; *(b)* es necesario ajustar la velocidad de corte de manera adecuada, y *(c)* se deben emplear fluidos de corte. También deben considerarse factores como la rigidez de las máquinas herramienta y los dispositivos de sujeción del trabajo.

El **mandrinado** en un torno es similar al cilindrado. Se realiza dentro de piezas de trabajo huecas o en un orificio previamente producido mediante taladrado u otros medios. Los orificios sin forma se pueden enderezar por mandrinado. La pieza se sujeta en un plato o en algún otro dispositivo adecuado de sujeción de trabajo. En la sección 23.4 se describe el mandrinado de piezas de trabajo grandes.

El **taladrado** (sección 23.5) se puede efectuar en un torno montando la broca en un broquero, en la boquilla del contrapunto. La pieza de trabajo se sujeta en un sujetador en el cabezal y la broca se hace avanzar girando el volante del carro del contrapunto. Es posible que los orificios taladrados así no tengan suficiente concentricidad por la tendencia del taladro a desviarse radialmente. Se puede mejorar la concentricidad del orificio taladrado si después se mandrina; también se puede **escariar** (sección 23.6) en tornos, de manera similar al taladrado, mejorando así las tolerancias dimensionales y el acabado superficial.

A las herramientas para *tronzado (seccionado)*, *ranurado*, *corte de roscas* y muchas otras operaciones se les da forma para cada propósito en particular o se encuentran disponibles como insertos. El *moleteado* se efectúa en un torno con rodillos endurecidos (ver fig. 23.1*l*), en el que la superficie de los rodillos es una réplica del perfil a generar. Los rodillos se prensan radialmente contra la pieza de trabajo giratoria, en tanto que la herramienta se mueve de modo axial a lo largo de la parte.

23.3.4 Tipos de tornos

Existen muchos otros tipos de tornos, cuyas descripciones se presentan a continuación.

Tornos de banco. Como su nombre indica, estos tornos se colocan en un banco de trabajo o en una mesa. Su potencia es baja, por lo general cuentan con avance manual y se utilizan para maquinar pequeñas piezas de trabajo. Los *tornos de los cuartos de herramientas* tienen alta precisión, permitiendo el maquinado de partes a tolerancias dimensionales cerradas.

Tornos de propósito especial. Estos tornos se utilizan en aplicaciones (como ruedas para vías férreas, cañones de armas y rodillos de molinos de laminación) con piezas de trabajo hasta de 1.7 m de diámetro por 8 m de longitud (66 pulgadas a 25 pies) y capacidades de 450 kW (600 hp).

Tornos copiadores. Estos tornos poseen aditamentos especiales que tienen la capacidad de tornear partes con varios contornos. También conocidos como *tornos duplicadores* o *tornos de contorneado*, la herramienta de corte sigue una trayectoria igual a la del contorno de la plantilla, como un lápiz que sigue la forma de un esténcil de plástico. Sin embargo, las operaciones que comúnmente se realizan en los tornos copiadores se han reemplazado en gran medida con los *tornos de control numérico* y los *centros de torneado*, como se describe en la sección 25.2.

Tornos automáticos. Los tornos se han automatizado progresivamente con los años; los controles manuales de las máquinas se han reemplazado con diversos mecanismos que permiten que las operaciones de maquinado sigan cierta secuencia prescrita. En un *torneado totalmente automático*, las partes se hacen avanzar y se retiran de manera automática, mientras que en las máquinas *semiautomáticas* el operador realiza estas funciones. Los tornos automáticos pueden tener un husillo horizontal o vertical y son adecuados para producción de medio a alto volumen.

Los tornos que no tienen carro de contrapunto se conocen como *máquinas de fijación en mandril* o *simplemente "mandriles"*. Se utilizan para maquinar piezas individuales de formas regulares e irregulares y son de tipo husillo simple o husillos múltiples. En otro tipo de torno automático, la barra de material avanza periódicamente en el torno, la parte se maquina y se corta cuando está terminada en el extremo de la barra.

Máquinas automáticas para barras. También conocidas como **máquinas roscadoras automáticas**, estas máquinas herramienta están diseñadas para maquinado de altas velocidades de producción de tornillos y partes roscadas similares. Todas sus operaciones se realizan de manera automática, con las herramientas sujetas a una torreta especial. Después de maquinar cada parte o tornillo con las dimensiones finales, la barra de material avanza automáticamente a través del orificio en el husillo y después se corta. Estas máquinas se pueden equipar con husillos simples o múltiples. Las capacidades de dicha barra van de 3 mm a 150 mm (1/8 a 6 pulgadas) de diámetro. El largo del material es soportado por accesorios especiales conforme entra en el orificio del husillo.

Las **máquinas automáticas de barra de husillo simple** son similares a los tornos de torreta y están equipadas con diversos mecanismos accionados por levas. Existen dos tipos de máquinas de husillo simple. En las *automáticas tipo suizo*, la superficie cilíndrica de la barra sólida de material se maquina con una serie de herramientas que se mueven radialmente y en el mismo plano hacia la pieza de trabajo. La barra se sujeta cerca del husillo del cabezal, lo que minimiza las deflexiones debido a las fuerzas de corte. Estas máquinas herramienta pueden maquinar con alta precisión partes de diámetro pequeño.

La otra máquina de husillo simple (*tipo americana*) es similar a un torno de torreta pequeño, automático. La torreta está en un plano vertical y todos los movimientos de los componentes de la máquina se controlan mediante levas. En la actualidad, las máquinas automáticas para barra están equipadas con controles numéricos por computadora, eliminando el uso de levas y la operación se programa para un producto específico (ver sección 37.3).

Por lo general, las **máquinas automáticas de barra de husillos múltiples** tienen de cuatro a ocho husillos arreglados en círculo en un tambor grande, cada uno portando una pieza de trabajo individual. Las herramientas de corte se arreglan en diversas posiciones en la máquina y se mueven en direcciones axial y radial. Cada parte se maquina por etapas, conforme se mueve de una estación a la siguiente. Puesto que todas las operaciones se realizan de manera simultánea, se reduce el tiempo del ciclo por parte.

Tornos de torreta (revólver). Estas máquinas herramienta tienen la capacidad de efectuar múltiples operaciones de corte, como torneado, mandrinado, corte de roscas y careado (refrentado) (fig. 23.9). Se montan diversas herramientas de corte (hasta seis) en la *torreta principal* hexagonal, que gira después de completar cada operación específica de corte. El torno suele tener una *torreta cuadrada* en la corredera transversal, para montar hasta cuatro herramientas de corte. La pieza de trabajo (por lo común, un material en barra larga y redonda) avanza una distancia predeterminada a través del plato. Después de maquinar la parte, se corta con una herramienta montada en la torreta cuadrada, que se mueve de modo radial sobre la pieza de trabajo. Luego la barra avanza la misma distancia predeterminada y se maquina la siguiente parte.

Los tornos de torreta (revólver), tipo barra o mandril, son versátiles y las operaciones se pueden efectuar manualmente, utilizando el torniquete (rueda revólver o cabestrante) o de modo automático. Una vez ajustadas de manera adecuada, estas máquinas no requieren operadores con mucha experiencia. También existen *tornos de torreta vertical*, que son más adecuados para piezas de trabajo cortas, pesadas, con diámetros tan grandes como 1.2 m (48 pulgadas).

El torno de torreta mostrado en la figura 23.9 se conoce como torno de torreta **tipo ariete** (en el cual un ariete se desliza en una base por separado sobre la silleta). La corta carrera del ariete de la torreta limita esta máquina a piezas de trabajo relativamente cortas y a cortes ligeros para producción de cantidades pequeñas y medianas. En otro estilo (**tipo silleta**), la torreta principal se instala directamente sobre la silleta, que se desliza

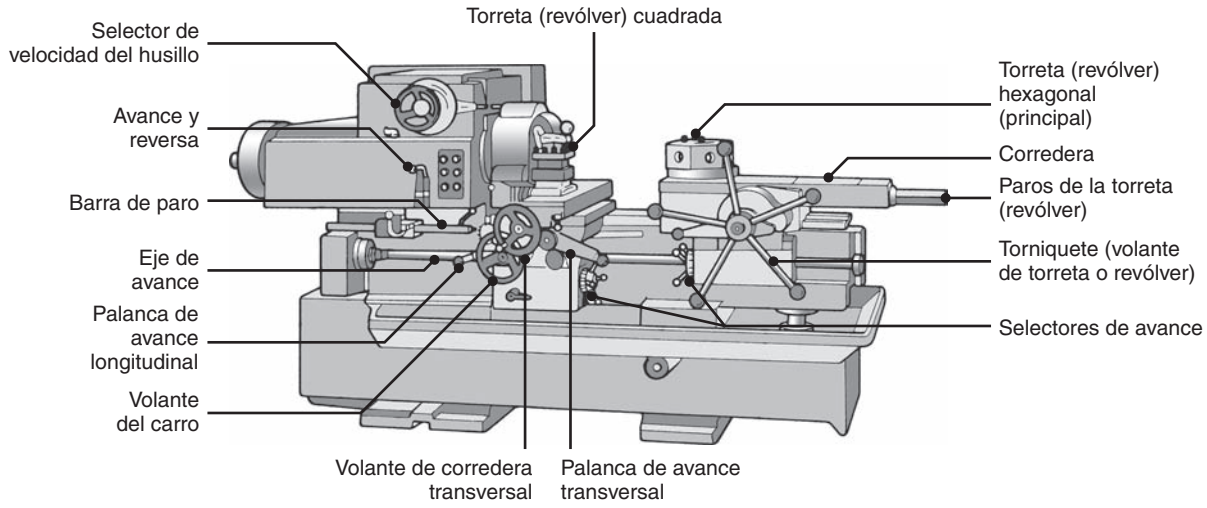


FIGURA 23.9 Esquema de los componentes de un torno de torreta (revólver). Obsérvese las dos torretas (revólveres): cuadrada y hexagonal (principal).

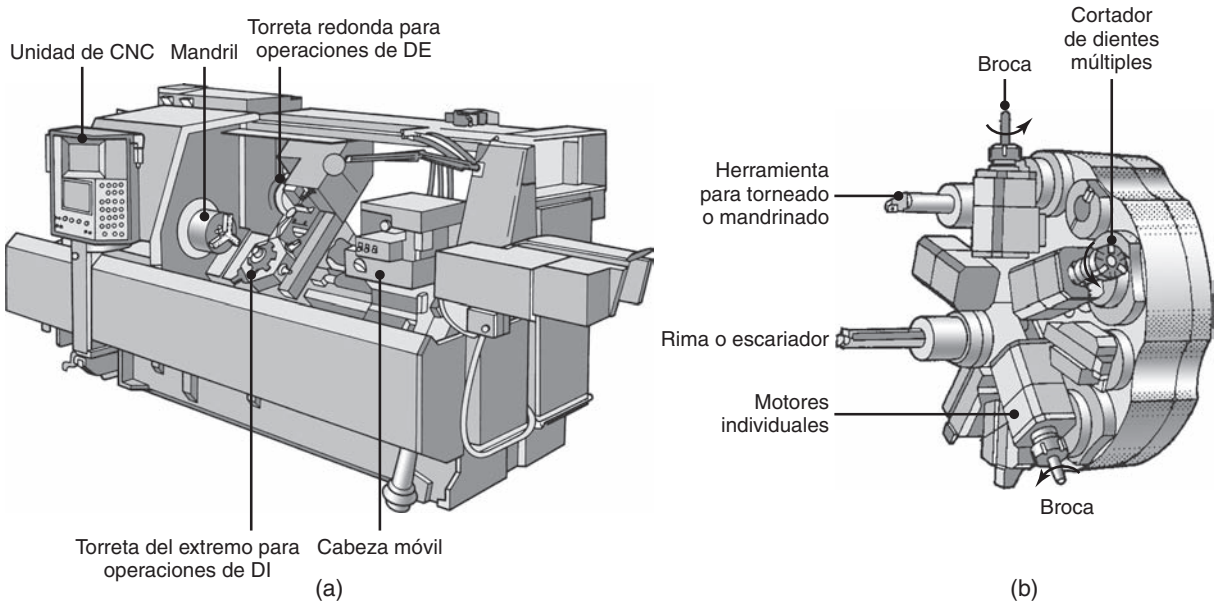


FIGURA 23.10 *(a)* Torno de control numérico por computadora. Obsérvese las dos torretas (revólveres) en esta máquina. Estas máquinas tienen mayor potencia y velocidad de husillo que los otros tornos para aprovechar las nuevas herramientas de corte con propiedades mejoradas. *(b)* Torreta (revólver) común equipada con 10 herramientas, algunas de las cuales son mecánicas.

a lo largo de la bancada. La longitud de la carrera se limita sólo por la longitud de la bancada. La construcción de este tipo de torno es más robusta y se utiliza para maquinar piezas de trabajo grandes. Dado lo pesado de los componentes, las operaciones del torno tipo silleta son más lentas que las de tipo ariete.

Tornos controlados por computadora. En la mayoría de los tornos avanzados, el movimiento y control de la máquina herramienta y sus componentes se logra mediante *controles numéricos computarizados* (CNC). En la figura 23.10a se muestran las características de dichos tornos; por lo general, están equipados con una o más torretas, cada una de las cuales tiene varias herramientas y realiza diversas operaciones en diferentes superficies de la pieza de trabajo (fig. 23.10b). Los diámetros de esta pieza pueden ser hasta de 1 m (36 pulgadas).

Para aprovechar los materiales de las nuevas herramientas de corte, los tornos controlados por computadora han sido diseñados para operar más rápido y tienen mayor potencia disponible en comparación con otros tornos. Están equipados con *cambiadores automáticos de herramientas* (ATC, por sus siglas en inglés). La repetitividad de sus operaciones es confiable, su precisión dimensional es la deseada y requieren mano de obra menos experta (una vez que la máquina se ajusta). Son adecuados para la producción de volumen bajo a medio.

EJEMPLO 23.2 Partes típicas fabricadas en máquinas herramienta de torneado con CNC

En la figura 23.11 se ilustran las capacidades de las máquinas herramienta de torneado con CNC. Se indica el material y la cantidad de herramientas de corte utilizadas, así como los tiempos de manufactura de cada parte. Estas partes también se pueden producir en tornos manuales o de torreta, aunque no de manera tan eficaz o consistente.

Fuente: Cortesía de Monarch Machine Tool Company.

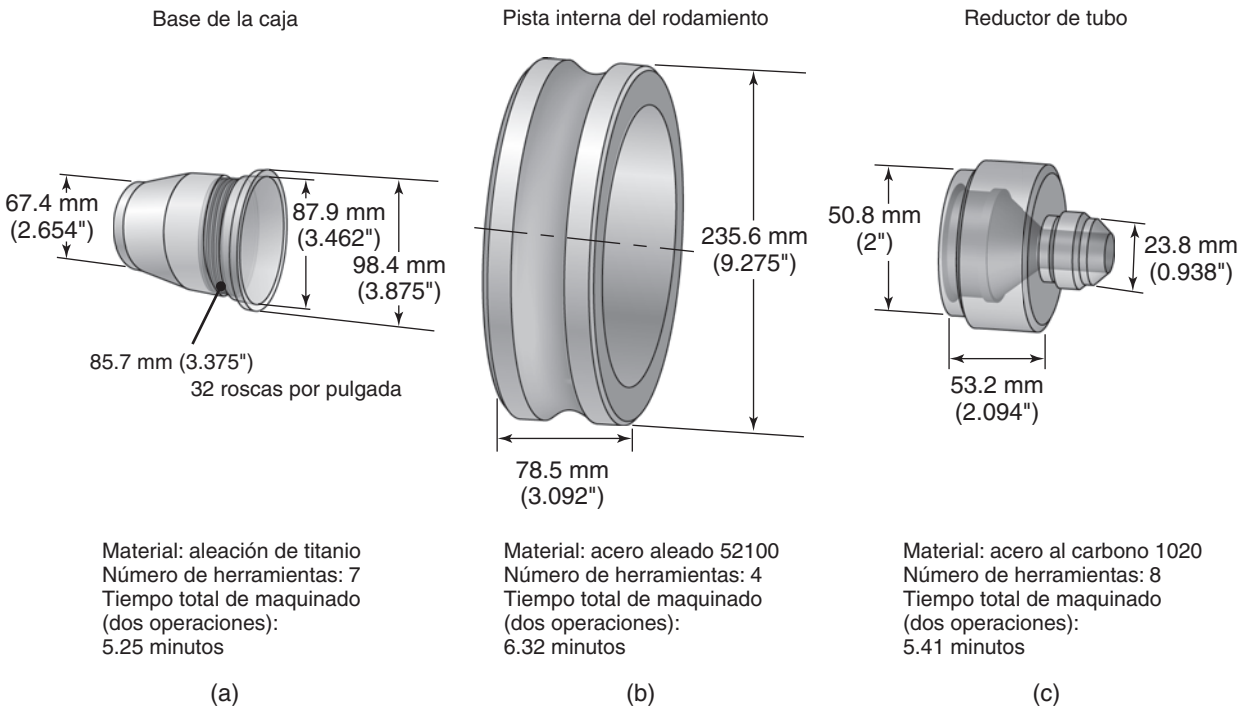


FIGURA 23.11 Partes comunes fabricadas en tornos CNC.

EJEMPLO 23.3 Maquinado de formas complejas

En el ejemplo 23.2 se observa que las partes son simétricas respecto de su eje. Las capacidades del torneado con CNC se pueden ilustrar aun más haciendo referencia a la figura 23.12, que muestra tres partes adicionales de mayor complejidad: una flecha de una bomba, un cigüeñal y una parte tubular con rosca interna redonda. Como en la mayoría de las operaciones, el maquinado de estas partes consta de cortes de desbaste y de acabado.

1. *Flecha de bomba* (fig. 23.12a). Esta parte, así como una amplia variedad de partes similares con características externas e internas, incluyendo árboles de levas, se produjo en un torno CNC con dos torretas, de construcción similar a la de la máquina mostrada en la figura 23.10a. Cada torreta puede sujetar hasta ocho herramientas. Para producir esta forma en particular, la torreta superior se programa de manera que su movimiento radial se sincronice con la rotación de la flecha (fig. 23.12b).

   El ángulo de torneado del husillo se supervisa directamente, ya que un procesador efectúa un cálculo a alta velocidad y el CNC emite un comando a la torreta de leva en términos de dicho ángulo. Recibe retroalimentación de posición absoluta utilizando un sistema de graduación de alta precisión. El CNC compara el valor real con el instruido y realiza una compensación automática mediante una función integrada de aprendizaje. La torreta tiene un diseño de peso ligero para facilitar la operación reduciendo las fuerzas de inercia.

   Esta flecha se puede fabricar con aluminio o acero inoxidable. Los parámetros de maquinado del aluminio se dan en la tabla 23.7 (ver parte *(a)* en la primera columna de la tabla). Estos parámetros se pueden comparar con los datos proporcionados en la tabla 23.4, que sólo tienen una amplia variedad apro-

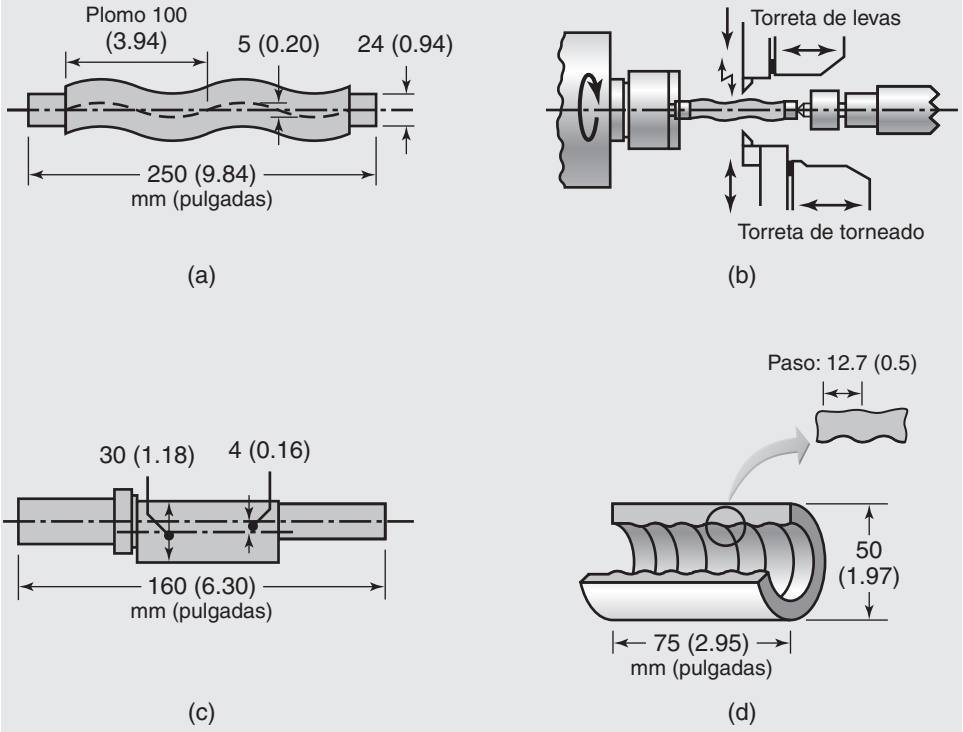


FIGURA 23.12 Ejemplos de formas más complejas que se pueden producir en un torno CNC.

ximada como guía. Los insertos fueron de carburo K10 (C3) sin recubrimiento, con un diamante policristalino compactado (ver fig. 22.10). El maquinado del diámetro exterior en la tabla mostrada se refiere a los dos extremos cilíndricos rectos de la parte. El tiempo total de maquinado de una flecha de aluminio fue de 24 minutos. El del acero inoxidable fue de 55 minutos, porque su velocidad de corte es considerablemente inferior a la del aluminio.

2. *Cigüeñal* (fig. 23.12c). Esta parte se fabrica con hierro fundido dúctil (nodular) y los parámetros de maquinado se muestran en la parte *(b)* de la tabla 23.7. El inserto fue de carburo K10. El tiempo de maquinado fue de 25 minutos, mismo lapso que la parte ya descrita.
3. *Parte tubular con roscas internas redondas* (fig. 23.12d). Esta parte, fabricada con acero inoxidable 304, se maquinó conforme a las condiciones indicadas para la parte *(c)* en la tabla 23.7. La pieza en bruto inicial fue una pieza tubular recta similar a un buje. Las herramientas de corte fueron de cermet y carburo recubierto. La barra de mandrilado se fabricó con carburo de tungsteno para conseguir mayor rigidez y, por lo tanto, mejor precisión dimensional y acabado superficial. Para la parte roscada, la precisión dimensional fue de ± 0.05 mm (0.002 pulgada), con acabado superficial de $R_a = 2.5$ μm (100 μm).

   El tiempo de maquinado de esta parte fue de 1.5 minutos, que es mucho menor que los tiempos de las dos anteriores. La razón es que *(a)* esta parte es más corta; *(b)* se remueve menos material; *(c)* no tiene las características de excentricidad de las primeras dos partes (así que el movimiento radial de la herramienta de corte no es una función de la posición angular de la parte), y *(d)* la velocidad de corte es superior.

Fuente: Con base en la bibliografía técnica proporcionada por Okuma Corp.

TABLA 23.7

Operación	Velocidad en rpm	Velocidad de corte	Profundidad de corte	Avance	Herramienta
Parte a y b: DE					
Desbaste	1150	160 m/min (525 fpm)	3 mm (0.12 pulgada)	0.3 mm/rev (0.012 pulgada/rev)	K10 (C3)
Acabado	1750	250 (820)	0.2 (0.008)	0.15 (0.006)	K10 (C3)
Plomo					
Desbaste	300	45 (148)	3 (0.12)	0.15 (0.006)	K10 (C3)
Acabado	300	45 (148)	0.1 (0.004)	0.15 (0.006)	Compactado de diamante
Parte c: eje excéntrico					
Desbaste	200	5–11 (16–136)	1.5 (0.059)	0.2 (0.008)	K10 (C3)
Acabado	200	5–11 (16–136)	0.1 (0.004)	0.05 (0.0020)	K10 (C3)
Parte d: rosca interna					
Desbaste	800	70 (230)	1.6 (0.063)	0.15 (0.006)	Carburo recubierto
Acabado	800	70 (230)	0.1 (0.004)	0.15 (0.006)	Cermet

23.3.5 Capacidades del proceso de torneado

En la tabla 23.8 se muestran las *capacidades* relativas *de producción* en el torneado (así como en otras operaciones de maquinado que se describen en el resto de este capítulo y en el capítulo 24). Estas capacidades influyen de manera fundamental en las operaciones de maquinado. Obsérvese que existen diferencias importantes en la capacidad de pro-

TABLA 23.8

Velocidades normales de producción para diversas operaciones de maquinado

Operación	Velocidad
Torneado	
Torno mecánico	Muy baja a baja
Torno copiador (trazador)	Baja a media
Torno de torreta (revólver)	Baja a media
Torno controlado por computadora	Baja a media
Mandriles con un solo husillo	Media a alta
Mandriles con múltiples husillos	Alta a muy alta
Mandrinado	Muy baja
Taladrado	Baja a media
Fresado	Baja a media
Planeado	Muy baja
Corte de engranes	Baja a media
Brochado	Media a alta
Aserrado	Muy baja a baja

Nota: Las capacidades de producción indicadas son relativas. *Muy baja* es alrededor de una o más partes por hora; *media* es alrededor de 100 partes por hora, y *muy alta* es 1000 o más partes por hora.

ducción de estos procesos, las cuales se deben no sólo a las características inherentes de los procesos y las máquinas herramienta, sino también a muchos otros factores, como los tiempos de ajuste y los tipos y tamaños de las piezas de trabajo por maquinar.

Los valores dados en la tabla 23.8 son relativos y puede haber variaciones significativas en aplicaciones particulares. Por ejemplo, los rodillos de alto carbono de acero fundido (para molinos de laminación) sometidos a tratamiento térmico se pueden maquinar en tornos especiales mediante herramientas de cermet a velocidades de remoción de material tan altas como 6000 cm^3/min (370 $pulg^3$/min). También conocido como *maquinado de alta velocidad de remoción*, sus requisitos son *(a)* rigidez muy alta de la máquina herramienta para evitar la ruptura de la herramienta debido al traqueteo, y *(b)* alta potencia de hasta 450 kW (600 hp).

El acabado superficial (fig. 23.13) y la precisión dimensional (fig. 23.14) obtenidos en el torneado y en las operaciones relacionadas con él dependen de factores como las características y la condición de la máquina herramienta, su rigidez, vibración y traqueteo, los parámetros del proceso, la geometría y el desgaste de la herramienta, el uso de los fluidos de corte, la maquinabilidad del material de la pieza de trabajo y la experiencia del operador. El resultado (y no es de sorprender) es que puede obtenerse una amplia variedad de acabados superficiales, como se muestra en la figura 23.13. (Ver también fig. 27.4).

23.3.6 Consideraciones de diseño y lineamientos para operaciones de torneado

Es importante considerar diversos factores cuando se diseñen partes a maquinar de manera económica mediante operaciones de torneado. Como el maquinado en general *(a)* requiere tiempo considerable, lo que incrementa el costo de producción; *(b)* desperdicia material, y *(c)* no es tan económico como el formado o moldeado de partes, debe evitarse hasta donde sea posible. Cuando sean necesarias las operaciones de torneado, deben seguirse los siguientes lineamientos generales de diseño:

1. Las partes se deben diseñar de modo que puedan fijarse y sujetarse con facilidad en los dispositivos de sujeción del trabajo. Es difícil soportar de manera apropiada las piezas de trabajo delgadas y esbeltas para que puedan tolerar las fuerzas de sujeción y de corte. (Ver también *fijación flexible*, sección 37.8).
2. La precisión dimensional y el acabado superficial especificados deben ser tan amplios como se permita para que la parte siga funcionando adecuadamente.
3. Se deben evitar esquinas filosas, conicidades, escalones y variaciones dimensionales importantes en la parte.
4. Las piezas en bruto a maquinar se deben aproximar tanto como sea posible (como por formado de forma casi neta), de modo que se reduzca el tiempo del ciclo de producción.
5. Las partes se deben diseñar de manera que las herramientas de corte puedan avanzar a través de la pieza de trabajo sin obstrucciones.
6. Las características de diseño deben facilitar el uso de herramientas estándar de corte, insertos y portaherramientas, disponibles comercialmente.
7. Los materiales de la pieza de trabajo deben seleccionarse en función de su maquinabilidad (sección 21.7) hasta donde sea posible.

Guías para las operaciones de torneado. En la tabla 23.9 se proporciona una guía general de las causas probables de problemas en las operaciones de torneado. Recuérdese que los capítulos 21 y 22 describen los factores que influyen en los parámetros listados.

Además de las diversas recomendaciones en cuanto a herramientas y parámetros de los procesos descritos, un factor importante es la presencia de *vibración* y *traqueteo* (sección 25.4). La vibración durante el corte puede provocar acabado superficial defi-

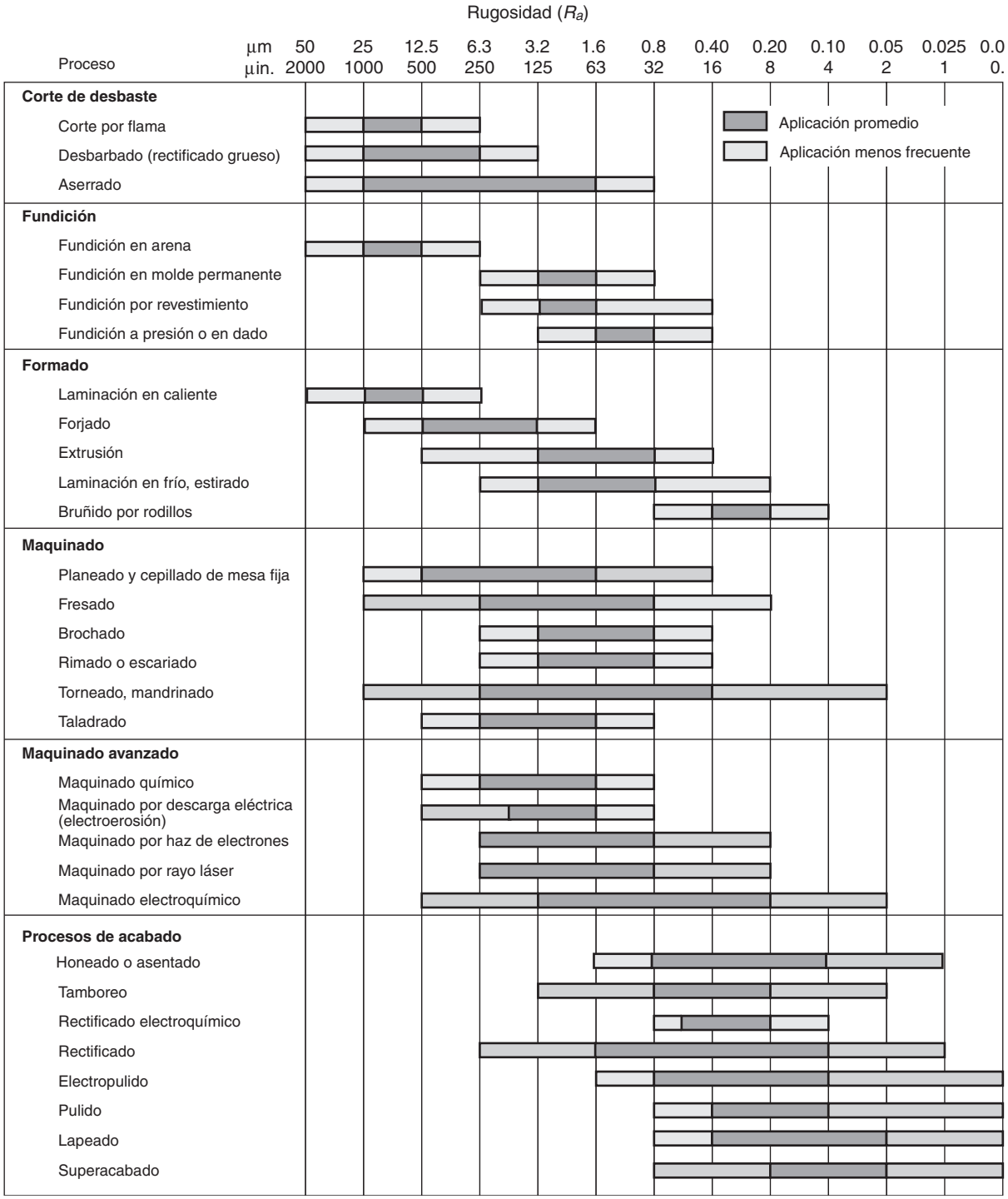


FIGURA 23.13 Rugosidades de superficies obtenidas en diversos procesos. Obsérvese la amplia variedad dentro de cada grupo, sobre todo en torneado y mandrinado.

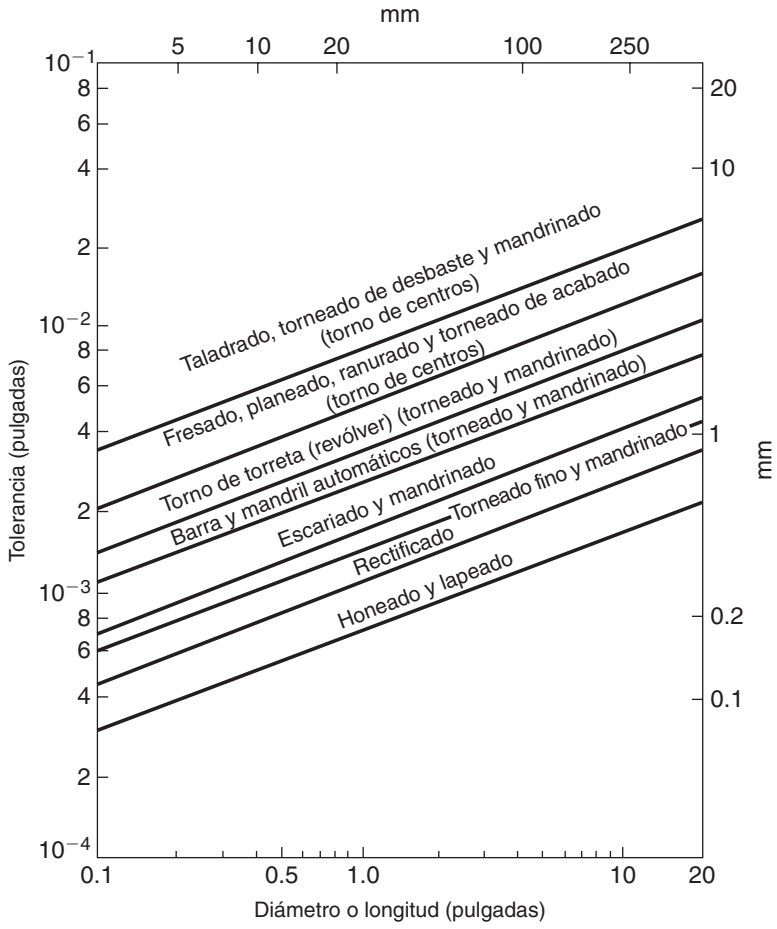


FIGURA 23.14 Intervalo de tolerancias dimensionales obtenidas en diversos procesos de maquinado en función del tamaño de la pieza de trabajo. Obsérvese que existe un orden de magnitud de diferencia entre las piezas de trabajo pequeñas y grandes.

TABLA 23.9

Guía general de resolución de problemas para operaciones de torneado

Problema	Causas probables
Ruptura de la herramienta	El material de la herramienta carece de tenacidad, ángulos inapropiados de la herramienta, la máquina herramienta carece de rigidez, rodamientos y componentes de las máquinas desgastados, parámetros de maquinado demasiado altos.
Desgaste excesivo de la herramienta	Parámetros de maquinado demasiado altos, material inadecuado de la herramienta, fluido de corte ineficaz, ángulos inadecuados de la herramienta.
Acabado superficial rugoso	Borde acumulado o recrecido en la herramienta; avance demasiado alto; herramienta demasiado filosa, astillada o desgastada; vibración y traqueteo.
Variación dimensional	Falta de rigidez de la máquina herramienta y dispositivos de sujeción de trabajo, aumento excesivo de temperatura, desgaste de herramienta.
Traqueteo de la herramienta	Falta de rigidez de la máquina herramienta y los dispositivos de sujeción del trabajo, excesiva proyección de la herramienta, parámetros de maquinado no determinados adecuadamente.

ciente, precisión dimensional pobre, desgaste excesivo de las herramientas y falla prematura de las mismas. La siguiente lista indica algunos lineamientos generalmente aceptados para operaciones de torneado. Sin embargo, debido a la complejidad del problema, varios de ellos tienen que implementarse a base de prueba y error.

1. Minimizar que sobresalga la herramienta.
2. Soportar la pieza rígidamente.
3. Utilizar máquinas herramienta con alta rigidez y alta capacidad de amortiguamiento.
4. Cuando las herramientas empiezan a vibrar y traquetear, debe modificarse uno o más de los parámetros del proceso, como la geometría de la herramienta, la velocidad y la profundidad de corte, el avance, o el uso del fluido de corte. (Ver también el *control adaptable*, sección 37.4).

23.3.7 Sistemas de recolección de virutas

Las virutas generadas durante el maquinado se deben recolectar y desechar de manera adecuada. Su volumen puede ser muy alto, sobre todo en las operaciones de maquinado de ultra alta velocidad y maquinado de alta velocidad de remoción. Por ejemplo, en una operación de taladrado en acero, durante el cual sólo se remueve 1 pulg^3 de metal, el volumen suelto de las virutas puede ser de 40 a 800 pulg^3, dependiendo del tipo de virutas. De igual manera, el fresado de acero de 1 pulg^3 produce de 30 a 45 pulg^3 de virutas, en tanto que el hierro fundido genera de 7 a 15 pulg^3 de virutas.

También conocida como **manejo de virutas**, la operación comprende la recolección eficaz de virutas de su fuente en la máquina herramienta y su remoción del área de trabajo. Las virutas largas y fibrosas son más difíciles de recolectar que las cortas, que se producen mediante herramientas con rompevirutas (ver figs. 21.7 y 22.2). Por lo tanto, el tipo de viruta generada (*control de virutas*) es un aspecto integral de este sistema de recolección.

Las virutas se pueden recolectar mediante cualquiera de los siguientes métodos:

- Dejando que la gravedad las haga caer en una banda transportadora de acero.
- Arrastrando las virutas de un tanque de sedimentación.
- Usando barrenas con tornillos de avance (similares a los molinos de carne).
- Utilizando transportadores magnéticos (para virutas ferrosas).
- Empleando métodos de vacío para remoción de virutas.

Las máquinas herramienta modernas están diseñadas con características de manejo automatizado de virutas. Cabe mencionar que puede haber fluido de corte mezclado y adherido a las virutas, por lo que son importantes la filtración y el drenado adecuados. El fluido de corte y el lodo se pueden separar mediante *escurridores de virutas* (centrífugos). Por lo general, los sistemas de procesamiento de virutas requieren considerable espacio de piso y pueden costar desde $60,000 dólares, para los talleres pequeños, hasta alrededor de $1 millón de dólares, para las plantas grandes.

Las virutas recolectadas se pueden reciclar si es económico hacerlo. Antes de su remoción de una planta de manufactura, las virutas se pueden reducir hasta una quinta parte del volumen suelto mediante *compactación* (trituración) en briquetas o por *fragmentación*. Las virutas secas son más valiosas para el reciclaje por la reducción de contaminación ambiental. El método elegido para la disposición de las virutas depende de la economía y del cumplimiento de las normas locales, estatales y federales. La tendencia es reciclar todas las virutas, así como los fluidos de corte y el lodo utilizados.

23.3.8 Corte de cuerdas (roscas) para tornillos

Las cuerdas o roscas para tornillo son muy comunes. Una *cuerda para tornillo* se puede definir como una cresta de sección transversal uniforme que sigue una trayectoria helicoidal o espiral en la parte exterior o interior de una superficie cilíndrica (*rosca recta*) o cónica (*rosca cónica*). Los tornillos y tuercas de las máquinas tienen roscas rectas, como

las barras roscadas para aplicaciones y como el tornillo de avance en los tornos y en diversos componentes de maquinaria (fig. 23.2). Las roscas o cuerdas pueden ser *derechas* o *izquierdas*. Las roscas cónicas se utilizan comúnmente para tubos de agua y gas y para accesorios de plomería, que requieren una conexión resistente al agua o al aire.

Tradicionalmente las cuerdas se maquinan, pero cada vez con mayor frecuencia se forman mediante **laminación de cuerdas** (que se describe en la sección 13.5). En la actualidad, las cuerdas laminadas constituyen la cantidad más grande de partes roscadas producidas. También se puede fundir partes roscadas, pero existen limitaciones a la precisión dimensional, el acabado superficial y las dimensiones mínimas. Las velocidades de producción no son tan altas como las obtenidas en otros procesos.

Las cuerdas se pueden maquinar de manera externa o interna con una herramienta de corte por un proceso llamado *corte de roscas* o *roscado*. Las roscas o cuerdas internas también pueden producirse con una herramienta especial roscada conocida como *machuelo*, y el proceso recibe el nombre de *machueleado* (sección 23.7). Asimismo, es posible cortar roscas externas con una *matriz* o por medio de fresado. Aunque se suma considerablemente al costo, las roscas pueden rectificarse después para alta precisión dimensional y acabado superficial, en aplicaciones como el accionamiento de tornillos en las máquinas.

Corte de cuerdas o roscas de tornillos en un torno. En la figura 23.15a se muestra una operación común de corte de cuerdas o roscas en un torno. La herramienta de corte, cuya forma depende del tipo de rosca a cortar, se monta en un sujetador y se

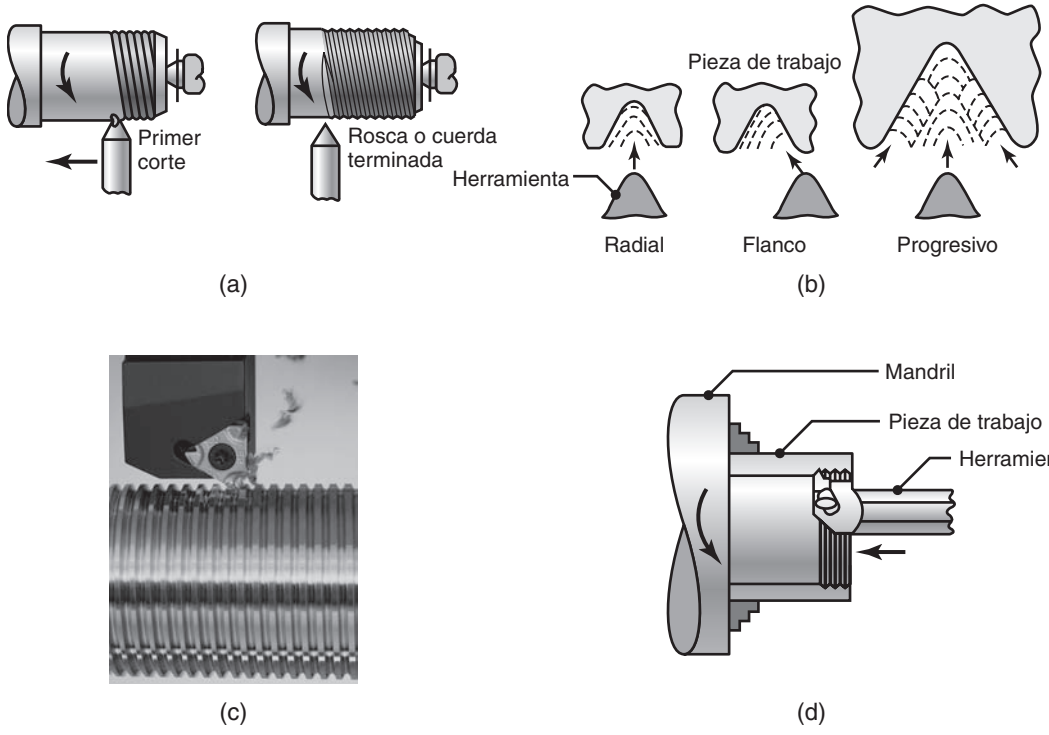


FIGURA 23.15 *(a)* La generación de cuerdas o roscas en un torno con herramienta de corte de una sola punta. *(b)* Roscado con herramienta de una sola punta en varios pases, que normalmente se utiliza para roscas o cuerdas grandes. Las flechas pequeñas en las figuras muestran la dirección de avance, y las líneas punteadas, la posición del buril conforme avanza el tiempo. Nótese que en el *corte radial*, la herramienta se hace avanzar directamente dentro de la pieza; en el *corte de flancos*, la herramienta avanza sobre la pieza a lo largo de la cara derecha de la rosca; en el *corte progresivo*, la herramienta primero avanza directamente sobre la pieza en el centro de la rosca, después a sus lados y por último en la raíz. *(c)* Inserto común con recubrimiento de carburo en el proceso de roscado en un eje redondo. *(d)* Generación de roscas con un inserto de carburo. *Fuente*: *(c)*: Cortesía de Iscar Metals Inc.

mueve a lo largo de la pieza de trabajo con el *tornillo de avance* en el torno. Este movimiento se logra mediante el acoplamiento de una *tuerca dividida* (también conocida como *media tuerca*) en el interior del tablero del torno (ver fig. 23.2).

El movimiento axial de la herramienta respecto de la rotación de la pieza de trabajo determina el *avance* de la rosca del tornillo (es decir, la distancia axial recorrida en una revolución completa del tornillo). Para una velocidad fija del husillo, cuanto más lento es el movimiento de la herramienta, más fina será la rosca. En el corte de roscas, la herramienta de corte se puede alimentar radialmente sobre la pieza cortando ambos lados de la rosca al mismo tiempo, como en el corte de formas ya descrito. Sin embargo, este método suele producir un acabado superficial deficiente.

Por lo general, se requiere cierto número de pases en la secuencia mostrada en la figura 23.15b para producir roscas con buena precisión dimensional y buen acabado superficial. La figura 23.15c presenta un inserto de carburo para el corte de roscas de tornillo (*inserto de roscas*) maquinando roscas en un eje redondo, y la figura 23.15d muestra un proceso interno de corte de roscas de tornillo. El corte de roscas en un torno es un método antiguo y versátil, pero es lento y requiere un operador con experiencia considerable. En consecuencia, excepto por las líneas pequeñas de producción, el proceso se ha reemplazado en gran medida con otros métodos, como la laminación de roscas o cuerdas, el maquinado automático de tornillos y el uso de tornos CNC.

La velocidad de producción en el corte de cuerdas de tornillos puede aumentar con herramientas conocidas como *almohadillas o peines para roscar* (fig. 23.16a y b). Por lo general, estas herramientas tienen cuatro cortadores con múltiples dientes y se pueden ajustar radialmente. Después de cortar las roscas, los cortadores se abren de modo automático (de ahí el nombre alternativo de *dados de autoapertura*) girándolos alrededor de su eje para retirar la parte. También existen *dados sólidos de roscado* (fig. 23.16c) para cortar cuerdas de tornillo rectas o cónicas. Estos dados o matrices se utilizan sobre todo para roscar o hacer cuerdas en los extremos de tubos y tubería y no son adecuados para el trabajo de producción.

Consideraciones de diseño. Las consideraciones de diseño que se deben tener en cuenta para producir cuerdas o roscas de tornillo de alta calidad y económicas son las siguientes:

- El diseño debe permitir la terminación de las roscas antes de que lleguen a un hombro. Las roscas internas en los orificios ciegos deben tener un tramo sin roscar en la parte inferior. El término *orificio ciego* se refiere a un orificio que no pasa a través de todo el espesor de la pieza de trabajo. (Por ejemplo, ver fig. 23.1i).
- Se deben eliminar los orificios cónicos ciegos para machuelear.
- Deben especificarse biseles en los extremos de las secciones roscadas para minimizar las roscas con forma de aleta con rebabas.
- No se deben interrumpir secciones roscadas con ranuras, orificios u otras discontinuidades.

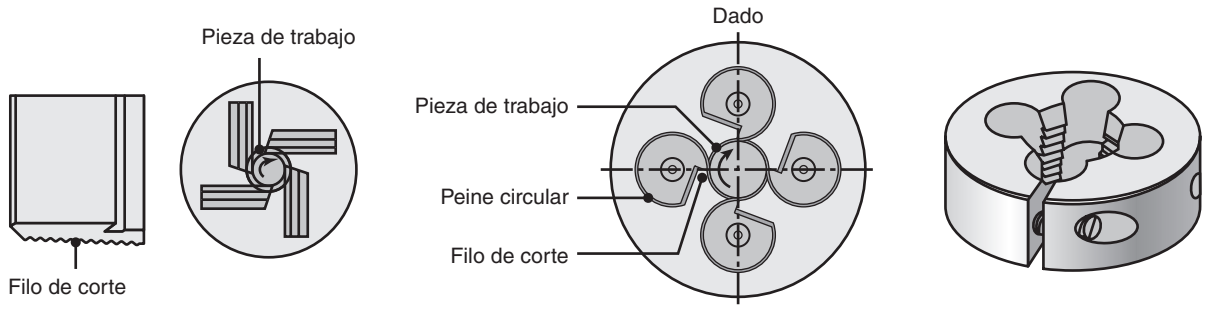


FIGURA 23.16 *(a)* Peines rectos para cortar roscas en un torno. *(b)* Peines circulares. *(c)* Una terraja.

- Siempre que sea posible, deben utilizarse herramientas e insertos estándar de roscado.
- Las partes de pared delgada deben tener suficiente espesor y resistencia para resistir las fuerzas de sujeción y corte. Una regla práctica común es que la longitud mínima de contacto de un sujetador debe ser 1.5 veces el diámetro.
- Las partes deben diseñarse de manera que todas las operaciones de corte se puedan completar en un solo montaje.

23.4 Mandrinado y máquinas para mandrinar

El *mandrinado* se efectúa para agrandar un orificio producido antes por medio de otro proceso o para producir perfiles circulares internos en piezas de trabajo huecas (fig. 23.1h). Las herramientas de corte son similares a las utilizadas en torneado y se montan en una *barra de mandrinado* (fig. 23.17a) para que cubran toda la longitud del orificio o barreno. Dicha barra debe ser suficientemente rígida para minimizar la deflexión de la herramienta, mantener así la precisión dimensional y evitar vibración y traqueteo. Sería deseable un material con alto módulo elástico (como el carburo de tungsteno). Se han diseñado y construido barras de mandrinado con capacidad para amortiguar la vibración (fig. 23.17b).

Las operaciones de mandrinado en piezas de trabajo un tanto pequeñas se pueden efectuar en un torno; las piezas se maquinan en **mandrinadoras**. Estas máquinas herramienta son horizontales o verticales y tienen la capacidad de realizar diversas operaciones, como torneado, careado (refrentado), ranurado y biselado. En las **mandrinadoras horizontales,** la pieza de trabajo se monta en una mesa que se puede mover horizontalmente en direcciones axial y radial. La herramienta de corte se monta en un husillo que gira en el cabezal y tiene la capacidad de hacer movimientos verticales y longitudinales. También se pueden montar brocas, escariadores, machuelos y fresas en el husillo de la máquina. Una **mandrinadora vertical** (fig. 23.18) es similar a un torno, tiene un eje vertical de rotación de la pieza de trabajo y puede aceptar piezas con diámetros hasta de 2.5 m (98 pulgadas).

Por lo general, la herramienta de corte es de una sola punta, fabricada con acero de alta velocidad M2 y M3, o carburo P10 (C7) y P01 (C8). Se monta en la cabeza de la herramienta, que puede moverse de manera vertical (para mandrinado y torneado) y radial (para careado [refrentado]) guiado por la corredera transversal. El cabezal puede girar a fin de producir orificios cónicos (ahusados). Las velocidades y los avances de corte son similares a los de torneado. (Para capacidades de operaciones de mandrinado, ver tabla 23.8).

Existen máquinas de mandrinado con varias características. Las capacidades de las máquinas son hasta de 150 kW (200 hp) y cuentan con controles numéricos por compu-

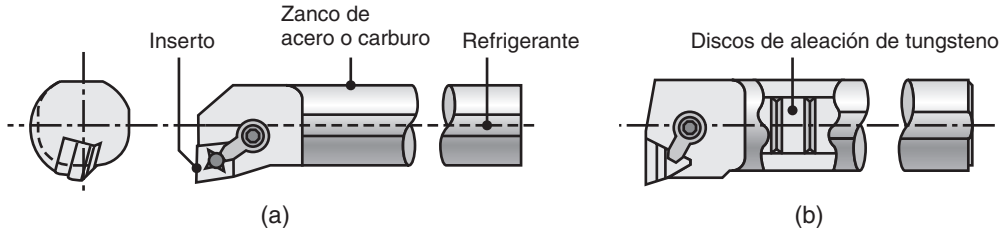


FIGURA 23.17 *(a)* Esquema de una barra para mandrinar de acero con un inserto de carburo. Nótese el orificio pasado en la barra para la aplicación de fluido de corte. *(b)* Esquema de una barra para mandrinar con "discos de inercia" de aleación de tungsteno sellados en la barra para contrarrestar la vibración y el traqueteo durante el mandrinado. Este sistema es eficaz para relaciones de longitud a diámetro hasta de 6 en barras para mandrinar.

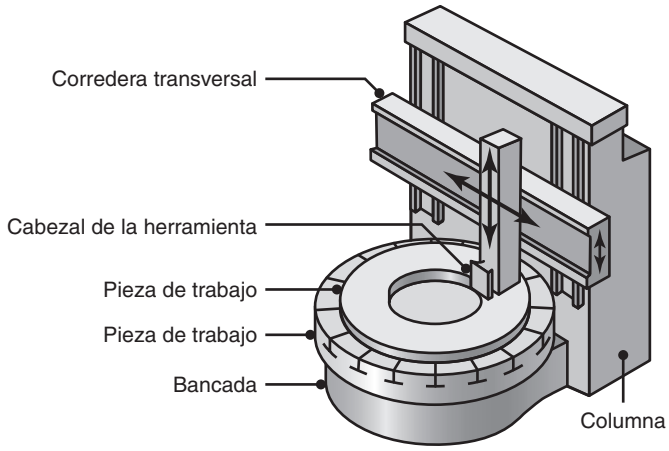


FIGURA 23.18 Esquema de una fresadora de mandrinado vertical o de columna. Dicha máquina puede manejar piezas de trabajo con tamaños hasta de 2.5 m (98 pulgadas) de diámetro.

tadora, que permiten programar todos los movimientos de la máquina. Se requiere poca participación del operador y se mejora la consistencia y productividad.

Los **mandrinadores de plantilla** o máquinas perforadoras verticales son máquinas verticales de mandrinado con rodamientos de alta precisión. Aunque existen diversos tamaños y se utilizan en cuartos de herramientas para hacer plantillas y aditamentos, en la actualidad están siendo reemplazados por máquinas de control numérico más versátiles.

Consideraciones de diseño para mandrinado. Los lineamientos para operaciones de mandrinado eficaces y económicas son similares a los de torneado. Además, se deben considerar los siguientes factores:

- Cada que sea posible, se deben especificar orificios pasados en lugar de orificios ciegos. Recuérdese que el término *orificio ciego* se refiere a un orificio que no pasa a través de todo el espesor de la pieza de trabajo.
- Cuanto mayor es la relación de longitud a diámetro del orificio, más difícil será mantener las dimensiones, por las deflexiones de la barra de mandrinado debidas a las fuerzas de corte, así como por la mayor tendencia a la vibración y el traqueteo.
- Se deben evitar superficies internas interrumpidas, como ranuras internas u orificios radiales que atraviesen el espesor de la parte.

23.5 Taladrado, brocas y taladros

Al inspeccionar varios productos grandes o pequeños, obsérvese que la vasta mayoría tiene diversos orificios. Por ejemplo, nótese *(a)* el número de remaches en las alas y el fuselaje de un avión; *(b)* los pernos en monobloques y cabezas de motores, y *(c)* diversos productos de consumo e industriales. Por lo general, los orificios se utilizan para ensamble con sujetadores (como pernos, tornillos y remaches, cada uno de los cuales requiere un orificio) o para propósitos de diseño (como reducción de peso, ventilación, acceso al interior de las partes, por apariencia).

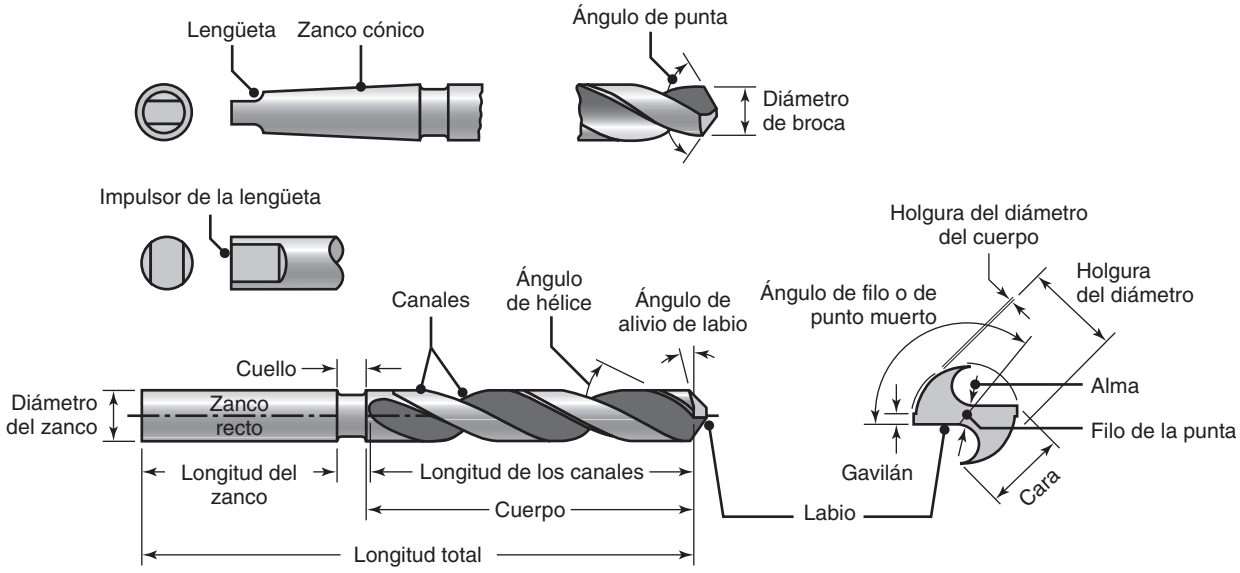
La **producción de orificios** es una de las operaciones más importantes de manufactura y el **taladrado** es un proceso básico y común de producción de orificios. Otras operaciones para producir orificios son el troquelado (como se describe en la sección 16.2) y

diversos procesos de maquinado avanzado (capítulo 27). El costo de la producción de orificios se encuentra entre los más elevados de maquinado en la producción de motores automotrices.

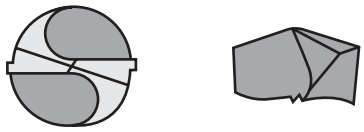
23.5.1 Brocas

En general, las *brocas* poseen altas relaciones de longitud a diámetro (fig. 23.19), por lo que tienen la capacidad de producir orificios relativamente profundos. Sin embargo, son de alguna manera flexibles y se deben utilizar con cuidado para taladrar orificios con precisión y evitar su ruptura. Además, las virutas que se producen dentro del orificio se mueven en dirección opuesta al movimiento de avance de la broca. Por lo tanto, la disposición de las virutas y la eficacia de los fluidos de corte pueden ocasionar serias dificultades en el taladrado.

Por lo general, las brocas dejan una *rebaba* en la superficie inferior tras la penetración, lo que hace necesarias operaciones de rebabeo (sección 26.8). Además, debido a su movimiento giratorio, el taladrado produce orificios con paredes que tienen marcas circunferenciales. En contraste, los orificios troquelados tienen marcas longitudinales (ver fig. 16.5a). Esta diferencia es significativa en términos de las propiedades de fatiga del orificio, como se describe en la sección 33.2.



(a) Broca con punta cónica



(b) Broca con punta de cigüeñal

FIGURA 23.19 Dos tipos comunes de brocas: *(a)* Broca con punta cónica. La función del par de gavilanes es proporcionar una superficie de soporte para la broca contra las paredes del orificio conforme penetra en la pieza de trabajo. Existen brocas con cuatro gavilanes (*margen doble*) para su mejor guía y precisión. También existen brocas con características de rompevirutas. *(b)* Broca con punta de cigüeñal. Estas brocas tienen buena capacidad de centrado y, dado que las brocas tienden a romperse con facilidad, son adecuadas para producir orificios profundos.

El diámetro de un orificio producido por taladrado es ligeramente más grande que el diámetro de la broca (*sobredimensión*), como puede notarse al observar que una broca se retira con facilidad del orificio que acaba de producir. La medida de la sobredimensión depende de la calidad de la broca y del equipo utilizado, así como de las prácticas empleadas para el maquinado. Además, dependiendo de sus propiedades térmicas, algunos materiales metálicos o no metálicos se dilatan en forma considerable debido al calor que produce el taladrado, por lo que el diámetro final del orificio puede ser más pequeño que el diámetro de la broca. Para mejorar el acabado superficial y la precisión dimensional, los orificios taladrados se pueden someter a operaciones posteriores, como *escariado* y *honeado*. En la tabla 23.10 se muestran las capacidades de las operaciones de taladrado y mandrinado.

Broca helicoidal. La broca más común es la *broca helicoidal de punta estándar* (fig. 23.19a). La geometría de su punta es tal que el ángulo normal de ataque y la velocidad del filo de corte varían con la distancia a partir del centro de la broca. Las características principales de esta broca son (con los intervalos típicos de ángulos entre paréntesis): *(a) ángulo de la punta* (118° a 135°); *(b) ángulo de alivio del labio* (7° a 15°); *(c) ángulo de filo o borde biselado* (125° a 135°), y *(d) ángulo de la hélice* (15° a 30°).

Dos canales (*estrías*) espirales recorren la longitud de la broca, por donde se guían hacia arriba las virutas generadas. Los canales también sirven como pasajes que permiten que el fluido de corte llegue a los filos o bordes de corte. Algunas brocas tienen orificios longitudinales (por ejemplo, ver la broca mostrada en la fig. 23.22a) a través de los cuales se fuerzan fluidos, mejorando la lubricación y el enfriamiento, así como la eliminación de las virutas. Existen brocas con **rompevirutas** rectificados a lo largo de los filos de corte. Esta característica es importante en el taladrado con maquinaria automatizada, donde resulta fundamental la remoción continua de virutas largas sin ayuda del operador.

Con base en la experiencia, se han desarrollado diversos ángulos en una broca; están diseñados para producir orificios precisos, minimizar las fuerzas de taladrado y torque y optimizar la vida de la broca. Los cambios pequeños en la geometría de la broca pueden tener un efecto significativo en su desempeño, sobre todo en la región de filo o borde biselado, que representa alrededor de 50% de la fuerza de empuje en el taladrado. Por ejemplo, un ángulo de alivio del labio demasiado pequeño (fig. 23.19a) incrementa la fuerza de empuje, genera calor excesivo y aumenta el desgaste. Por el contrario, un ángulo demasiado grande puede causar astillado o ruptura de la arista de corte. Además de las brocas de punta convencional, se han desarrollado muchas otras geometrías de puntas de brocas con el fin de mejorar su desempeño y aumentar la velocidad de penetración. Para producir estas geometrías se utilizan técnicas y equipo especiales de rectificado.

Otros tipos de brocas. En la figura 23.20 se muestran diversos tipos de brocas. Una *broca escalonada* produce orificios con dos o más diámetros diferentes. Se utiliza una *broca de núcleo o sondeo* para agrandar un orificio existente. Las *brocas de abocardar* y *avellanar* producen depresiones en la superficie para acomodar las cabezas de tornillos y

TABLA 23.10

Capacidades generales de las operaciones de taladrado y mandrinado

Tipo de herramienta de corte	Intervalo de diámetros (mm)	Profundidad/Diámetro del orificio	
		Típico	Máximo
Helicoidal	0.5–150	8	50
Paleta	25–150	30	100
Cañones	2–50	100	300
Trepanado	40–250	10	100
Mandrinado	3–1200	5	8

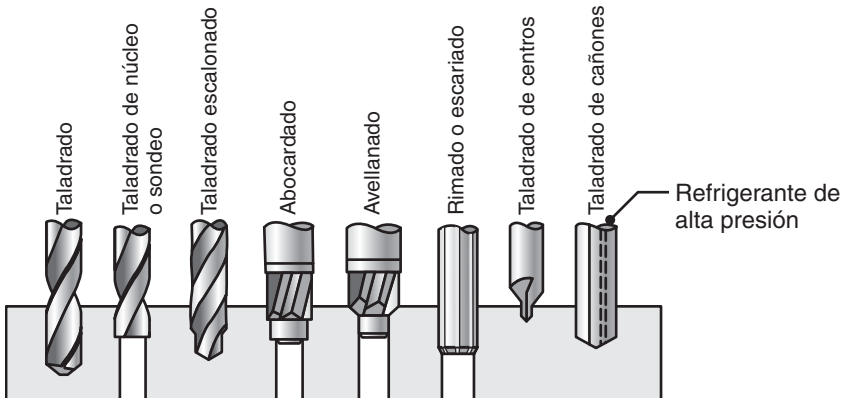


FIGURA 23.20 Diversos tipos de brocas y operaciones de taladrado y escariado.

pernos bajo el nivel de la superficie de la pieza de trabajo. Una *broca de centros* es corta y se utiliza para producir un orificio en el extremo final de una pieza de material, de manera que se pueda montar entre los centros del cabezal y el cabezal móvil o contrapunto de un torno (fig. 23.2). Se emplea una *broca de punto o piloto* para marcar (iniciar) un orificio en la ubicación deseada de una superficie.

Las *brocas de paleta o tipo espada* (fig. 23.21a) poseen puntas o barrenas removibles y producen orificios profundos de diámetro grande. Tienen las ventajas de mayor rigidez (debido a la ausencia de estrías en el cuerpo de la broca), facilidad de rectificar los filos de corte y menor costo. Una broca similar es la *broca de estrías rectas* (fig. 23.21b).

Existen brocas de carburo sólido y con punta de carburo (fig. 23.21c y d) para taladrar materiales duros (como hierros fundidos), metales de alta temperatura, materiales abrasivos (como concreto y ladrillo; *brocas para mampostería*) y materiales compósitos con refuerzos de fibras abrasivas (como vidrio y grafito).

Taladrado de cañones. Desarrollado originalmente para taladrar cañones de armas, el *taladrado de cañones* se utiliza para taladrar orificios profundos y requiere una broca

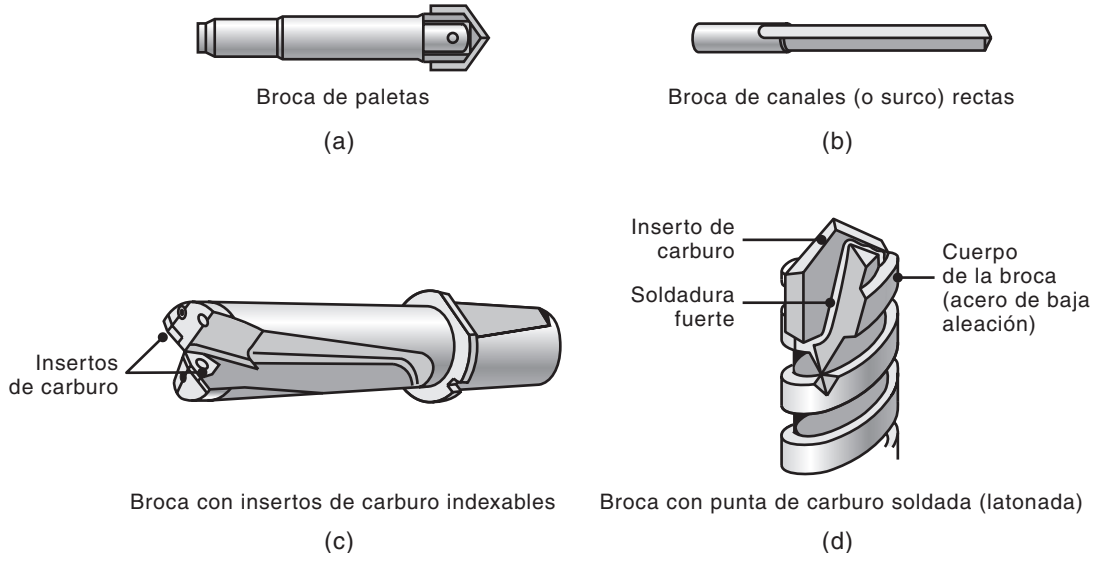


FIGURA 23.21 Diversos tipos de brocas.

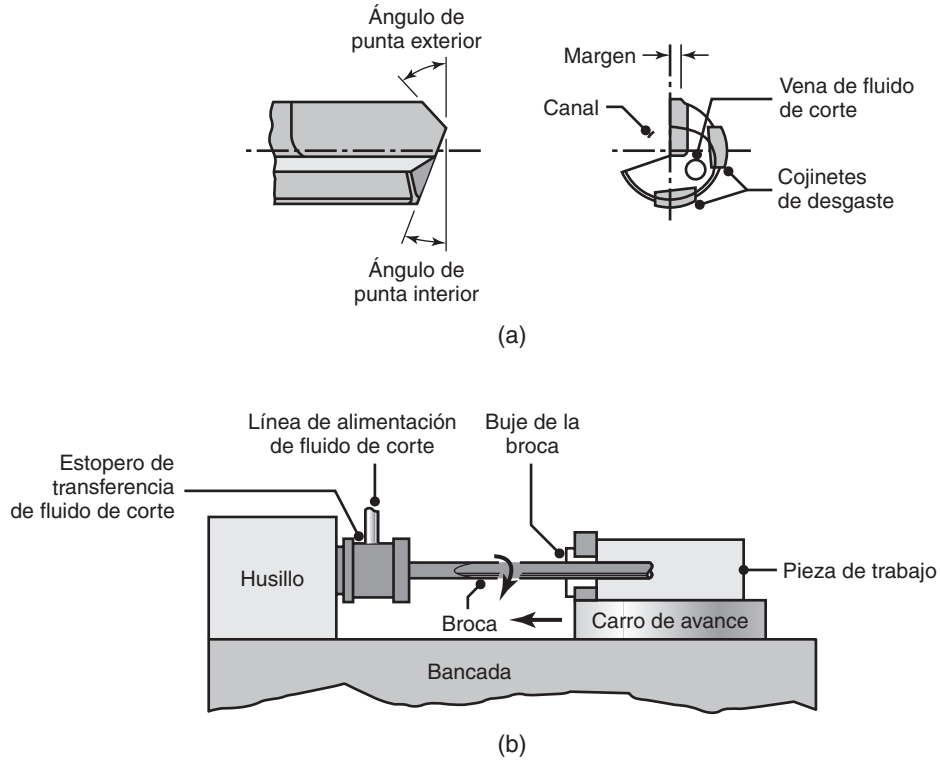


FIGURA 23.22 *(a)* Broca de cañón que muestra varias características. *(b)* Esquema de la operación de taladrado de cañón.

especial (fig. 23.22). La relación de profundidad a diámetro de los orificios producidos puede ser de 300:1 o incluso más. La fuerza de empuje (la fuerza radial que tiende a oprimir las guías laterales de la broca) se equilibra mediante placas de soporte en la broca que se desliza a lo largo de la superficie interna del orificio. Por lo tanto, la broca de cañón se centra por sí misma, característica importante al taladrar orificios rectos y profundos. Una variación de este proceso es el **trepanado de cañones** (ver la siguiente subsección), que utiliza una herramienta de corte similar a la broca de cañón, excepto porque la herramienta tiene un orificio central.

Por lo general, las velocidades de corte en el taladrado de cañones son altas, y los avances, bajos. Las tolerancias son de alrededor de 0.025 mm (0.001 pulgada). El fluido de corte se fuerza a alta presión a través de un orificio (pasaje) longitudinal en el cuerpo de la broca (fig. 23.22a). Además de su función de lubricar y enfriar la pieza de trabajo, el fluido drena las virutas con la operación de taladrado. La herramienta no tiene que retraerse para eliminar las virutas, como generalmente se hace con las brocas helicoidales.

Trepanado. En el *trepanado*, la herramienta de corte (fig. 23.23a) produce un orificio removiendo una pieza con forma de disco (*núcleo*), generalmente de placas planas. Por lo tanto, se produce un orificio sin reducir a virutas todo el material retirado, como es el caso en el taladrado. El proceso se basa en el término griego *trypanon*, que significa "perforar un orificio". El proceso de trepanado se puede utilizar para hacer discos hasta de 250 mm (10 pulgadas) de diámetro a partir de láminas planas, placas o miembros estructurales como vigas I. También puede emplearse para realizar ranuras circulares en las que se van a colocar anillos tipo O (de manera similar a la fig. 23.1f). Es posible efectuar el trepanado en tornos, taladradoras de columnas, u otras máquinas herramienta que usen herramientas de una sola punta o de puntas múltiples, como se muestra en la figura 23.23b.

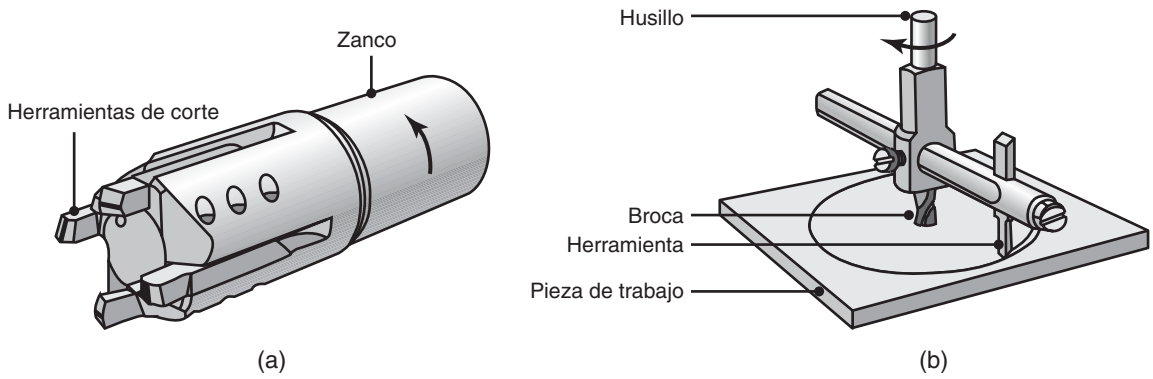


FIGURA 23.23 *(a)* Herramienta de trepanado. *(b)* Trepanado con un cortador simple montado en una broca.

23.5.2 Velocidad de remoción de material en el taladrado

La *velocidad de remoción de material* (MRR, por sus siglas en inglés) en el taladrado es el volumen de material removido por unidad de tiempo. Para una broca con un diámetro D, el área transversal del orificio taladrado es $\pi D^2/4$. La velocidad de la broca, perpendicular a la pieza de trabajo, es el producto del avance, f (la distancia que la broca penetra por cada revolución), y la velocidad de rotación, N, en la que $N = V/\pi D$. Por lo que,

$$\text{MRR} = \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) fN \tag{23.3}$$

Se puede verificar la precisión dimensional de esta ecuación, como se hizo para la ecuación 23.1, considerando que MRR = $(\text{mm}^2)(\text{mm/rev})(\text{rev/min}) = \text{mm}^3/\text{min}$, que es la unidad correcta para el volumen removido por unidad de tiempo.

23.5.3 Fuerza de empuje y torque

La *fuerza de empuje* en el taladrado actúa perpendicular al eje del orificio; si esta fuerza es excesiva, puede provocar que la broca se doble o se rompa; también puede distorsionar la pieza de trabajo, en particular si no tiene suficiente rigidez (por ejemplo, estructuras delgadas de lámina metálica), o hacer que la pieza se deslice dentro del aditamento de sujeción del trabajo.

La fuerza de empuje depende de factores como *(a)* la resistencia del material de la pieza de trabajo; *(b)* el avance; *(c)* la velocidad de rotación; *(d)* el diámetro de la broca; *(e)* la geometría de la broca, y *(f)* los fluidos de corte. Es difícil calcular con precisión las fuerzas de empuje en la broca; por lo general, van de unos cuantos newtons, para brocas pequeñas, hasta 100 kN (23.5 klb) para taladrar materiales de alta resistencia con brocas grandes. Existen datos experimentales disponibles como ayuda en el diseño y uso de brocas y equipo de taladrado.

Torque. En el taladrado, resulta fundamental conocer la magnitud del *torque* para estimar el requerimiento de potencia; sin embargo, es difícil de calcular debido a los muchos factores implicados. El torque se puede estimar a partir de los datos proporcionados en la tabla 21.2, considerando que la potencia disipada durante el taladrado es el producto del torque y la velocidad de rotación y que primero tenemos que calcular la velocidad de remoción de material. El torque en el taladrado puede ser hasta de 4000 N · m (3000 lb-pie).

EJEMPLO 23.4 Velocidad de remoción de material y torque en el taladrado

Se está taladrando un orificio en un bloque de aleación de magnesio con una broca de 10 mm, con un avance de 0.2 mm/rev y con el husillo funcionando a $N = 800$ rpm. Calcule la velocidad de remoción de material y el torque en la broca.

Solución Primero se calcula la velocidad de remoción de material a partir de la ecuación 23.3:

$$\text{MRR} = \left[\frac{(\pi)(10)^2}{4}\right](0.2)(800) = 12{,}570 \text{ mm}^3/\text{min} = 210 \text{ mm}^3/\text{s}$$

Según la tabla 21.2, tomemos una unidad promedio de potencia de 0.5 W · s/mm^3 para aleaciones de magnesio. Así que la potencia requerida es

$$\text{Potencia} = (210)(0.5) = 105 \text{ W}$$

La potencia es producto del torque en el taladro y la velocidad de rotación, que en este caso es $(800)(2\pi)/60 = 83.8$ radianes por segundo. Considerando que W = J/s y J = N · m, encontramos que

$$T = \frac{105}{83.8} = 1.25 \text{ N} \cdot \text{m}$$

23.5.4 Materiales y dimensiones de las brocas

Por lo regular, las brocas se producen con aceros de alta velocidad (M1, M7 y M10) y carburos sólidos o con puntas de carburo (generalmente fabricadas con carburo K20 [C2]), como las que se muestran en la figura 23.21c y d. En la actualidad, es común recubrir las brocas con nitruro de titanio o carbonitruro de titanio para aumentar su resistencia al desgaste (sección 22.5). Las brocas recubiertas con diamante policristalino se utilizan para producir orificios para sujeción en plásticos reforzados con fibras. Debido a su alta resistencia al desgaste, se pueden taladrar varios miles de orificios con poco daño al material.

Aunque se encuentran en desarrollo continuo, los tamaños estándar de las brocas helicoidales se dan básicamente en las siguientes series:

Numérica: Del No. 97 (0.0059 pulgada) al No. 1 (0.228 pulgada).
Letra: De la A (0.234 pulgada) a la Z (0.413 pulgada).
Fraccional: Zanco recto de $\frac{1}{64}$ a $1\frac{1}{4}$ pulgadas (en incrementos de $\frac{1}{64}$ de pulgada) a $1\frac{1}{2}$ pulgadas (en incrementos de $\frac{1}{32}$ de pulgada) y brocas más grandes en incrementos más grandes. Zanco cónico de $\frac{1}{8}$ a $1\frac{3}{4}$ pulgadas (en incrementos de $\frac{1}{64}$ de pulgada) a 3.5 pulgadas (en incrementos de $\frac{1}{16}$ de pulgada).
Milímétricas: De 0.05 mm (0.002 pulgada) en incrementos de 0.01 mm.

23.5.5 Prácticas de taladrado

Por lo general, las brocas y herramientas similares para la producción de orificios se sujetan mediante los *portabrocas o broqueros*, que se pueden sujetar con o sin chavetas. Existen diversos mandriles y boquillas especiales con varias características de cambio rápido que no requieren detener el husillo para su uso en maquinaria de producción.

Como no tienen una acción de centrado, las brocas tienden a "caminar" sobre la superficie de la pieza de trabajo al inicio de la operación. Este problema es particularmente severo con brocas largas de diámetro pequeño y puede producir fallas. Para iniciar un orificio de manera apropiada, se debe guiar la broca mediante aditamentos (como un buje) a fin de evitar que se curve de modo lateral. Se puede hacer un orificio inicial pequeño

con una *broca de centro* (por lo general con un ángulo de punto de 60°), o rectificar en forma de *S* (*punta helicoidal* o *espiral*) la punta de la broca. Esta forma tiene una característica de autocentrado, eliminando la necesidad de efectuar el taladrado de centros, y produce orificios precisos y con mejor vida de la broca. Estos factores son muy importantes en la producción automatizada con máquinas de CNC, en las que la práctica usual es utilizar una broca de punto o piloto. Para mantener la broca más centrada, se hacen coincidir los ángulos de la punta de la broca de punto y de la broca. Otras opciones para minimizar el desplazamiento de la broca consisten en usar un punzón de centrado para producir una impresión inicial en la que comienza el taladrado, o incluso para incorporar hoyuelos u otras características en la pieza en bruto fundida o forjada.

Recomendaciones de taladrado. En la tabla 23.11 se dan los intervalos recomendados para velocidades y avances de taladrado. La velocidad es la velocidad superficial de la broca en su periferia. Por lo tanto, una broca de 0.5 pulgada (12.7 mm) que gira a 300 rpm tiene una velocidad superficial de $\left(\frac{0.5}{2}\text{pulgada}\right)$ (300 rev/min)(2π rad/rev) ($\frac{1}{12}$ de pie/pulgada) = 39 pies/min = 12 m/min. Cuando los orificios de taladrado son menores a 1 mm (0.040 pulgada) de diámetro, las velocidades de rotación pueden ser hasta de 30,000 rpm, dependiendo del material de la pieza de trabajo.

El *avance* en taladrado es la distancia que la broca avanza por revolución dentro de la pieza de trabajo. Por ejemplo, en la tabla 23.11 se recomienda que para la mayoría de los materiales, una broca de 1.5 mm (0.060 pulgada) de diámetro debe avanzar a 0.025 mm/rev. Si la columna de velocidad en la tabla indica que la broca tiene que rotar a, por decirlo así, 2000 rpm, entonces debe avanzar en la pieza de trabajo a una velocidad lineal de (0.025 mm/rev)(2000 rev/min) = 50 mm/min = 2 pulgadas/min.

La *remoción de virutas* durante el taladrado puede ser difícil, en especial para orificios profundos en materiales blandos y dúctiles de piezas de trabajo. La broca debe retraerse (*dentelleo*) periódicamente para retirar las virutas que se acumulen a lo largo de los canales. De lo contrario, puede romperse debido al toque excesivo, o "caminar" fuera de la ubicación y producir un orificio malformado. En la tabla 23.12 se da una guía general de las posibles causas de problemas en las operaciones de taladrado.

Reacondicionamiento de brocas. Las brocas se reacondicionan rectificándolas manualmente o utilizando aditamentos especiales. Es importante su reacondicionamiento adecuado, en particular si se usan para manufactura automatizada en máquinas de

TABLA 23.11

Recomendaciones generales de velocidades y avances en taladrado

Material de la pieza de trabajo	Velocidad superficial		Avance, mm/rev (pulgadas/rev)		rpm	
			Diámetro de la broca			
	m/min	pies/min	1.5 mm (0.060 pulgada)	12.5 mm (0.5 pulgada)	1.5 mm	12.5 mm
Aleaciones de aluminio	30–120	100–400	0.025 (0.001)	0.30 (0.012)	6400–25,000	800–3000
Aleaciones de magnesio	45–120	150–400	0.025 (0.001)	0.30 (0.012)	9600–25,000	1100–3000
Aleaciones de cobre	15–60	50–200	0.025 (0.001)	0.25 (0.010)	3200–12,000	400–1500
Aceros	20–30	60–100	0.025 (0.001)	0.30 (0.012)	4300–6400	500–800
Aceros inoxidables	10–20	40–60	0.025 (0.001)	0.18 (0.007)	2100–4300	250–500
Aleaciones de titanio	6–20	20–60	0.010 (0.0004)	0.15 (0.006)	1300–4300	150–500
Hierros fundidos	20–60	60–200	0.025 (0.001)	0.30 (0.012)	4300–12,000	500–1500
Termoplásticos	30–60	100–200	0.025 (0.001)	0.13 (0.005)	6400–12,000	800–1500
Termofijos	20–60	60–200	0.025 (0.001)	0.10 (0.004)	4300–12,000	500–1500

Nota: Conforme aumenta la profundidad del orificio, se deben reducir las velocidades y avances. La selección de velocidades y avances también depende del acabado superficial específico requerido.

TABLA 23.12

Guía general de resolución de problemas para operaciones de taladrado

Problema	Causas probables
Ruptura de la broca	Broca desafilada, agarrotamiento de la broca en el orificio por atascamiento de virutas en los canales, avance demasiado alto, ángulo de alivio demasiado pequeño.
Desgaste excesivo de la broca	Velocidad de corte demasiado alta, fluido de corte ineficaz, ángulo de ataque demasiado alto, broca quemada y disminución de la resistencia al afilarse.
Orificio ahusado	Broca mal alineada o doblada, ángulos de los gavilanes desiguales, alma descentrada.
Orificio sobredimensionado	Igual que la anterior, husillo de la máquina flojo, filo del cortador descentrado, fuerza lateral en la pieza de trabajo.
Mal acabado de la superficie del orificio	Broca desafilada, fluido de corte ineficaz, soldadura del material de la pieza de trabajo en el margen de la broca, broca rectificada inadecuadamente, alineación incorrecta.

control numérico por computadora. El rectificado manual es difícil y requiere experiencia considerable para producir filos o aristas de corte simétricos. El rectificado en aditamentos es preciso y se efectúa en rectificadoras especiales controladas por computadora. Las brocas cubiertas se pueden recubrir.

Medición de la vida de una broca. La vida de una broca, como la vida de un machuelo, se mide generalmente por el número de orificios taladrados antes de desafilarse. El procedimiento de prueba consiste en sujetar un bloque de material en un dinamómetro apropiado o transductor de fuerza y taladrar una cantidad de orificios en tanto se registra el torque o la fuerza de empuje durante cada operación sucesiva. Después de haber taladrado cierta cantidad de orificios, el torque y la fuerza empiezan a aumentar debido a que la herramienta se desafila. La *vida de una broca* se define como la cantidad de orificios taladrados hasta que empieza esta transición. También se pueden utilizar otras técnicas, como la supervisión de vibración y de emisiones acústicas (sección 21.5.4), para determinar la vida de la broca.

23.5.6 Taladros

Los taladros se utilizan en operaciones de taladrado de orificios y para machuelear, escariar y perforar diámetros pequeños. El taladro más común es la **taladradora de columna o vertical**, cuyos principales componentes se muestran en la figura 23.24a. La pieza de trabajo se coloca en una mesa ajustable, ya sea sujetándola directamente en las ranuras y orificios del mueble, o utilizando una prensa de banco, que a su vez se sujeta a la mesa. La broca se baja con un volante manual, o mediante un avance accionado de manera mecánica a velocidades preestablecidas. El avance manual requiere cierta experiencia en la determinación de la velocidad adecuada.

Por lo general, las taladradoras de columna se denominan por el diámetro más grande de la pieza de trabajo que se puede acomodar en la mesa y suelen ir de 150 mm a 1250 mm (6 a 50 pulgadas). Para mantener las velocidades de corte adecuadas en los filos de corte de las brocas, la velocidad del husillo en las taladradoras tiene que ser ajustable para poder utilizar diferentes tamaños de brocas. Los ajustes se hacen por medio de poleas, caja de engranes o motores de velocidad variable.

Los tipos de taladradoras van desde simples *taladradoras tipo banco*, utilizadas para taladrar orificios de diámetro pequeño, hasta *taladradoras radiales* grandes (fig. 23.24b), que pueden soportar piezas de trabajo grandes. La distancia entre la columna y el centro del husillo puede ser hasta de 3 m (10 pies). El cabezal de taladrado de las *taladradoras universales* puede girarse para taladrar orificios en ángulo. Los desarrollos en las taladradoras incluyen máquinas de tres ejes con control numérico por computadora, en las que las operaciones se efectúan automáticamente y en la secuencia deseada con el

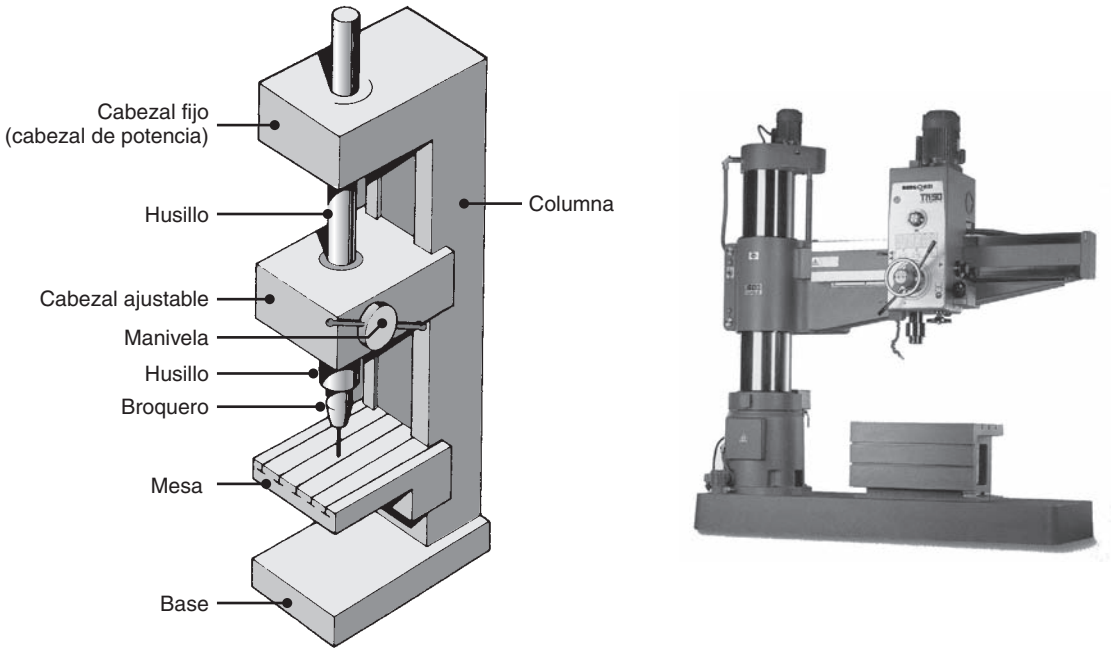


FIGURA 23.24 *(a)* Esquema de los componentes de un taladro de columna vertical. *(b)* Taladro radial. *Fuente*: *(b)* Cortesía de Willis Machinery and Tools.

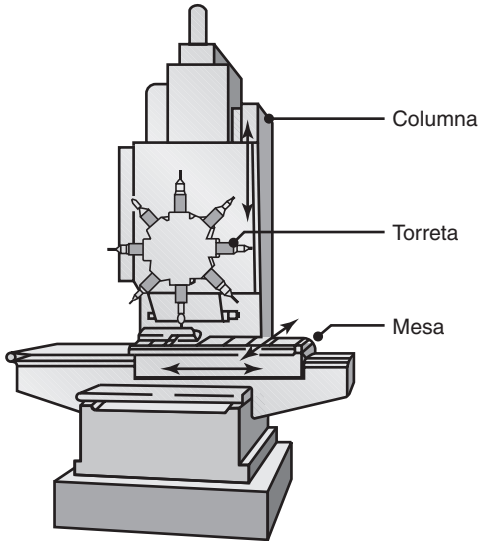


FIGURA 23.25 Taladro de tres ejes con control numérico por computadora. La torreta o carrusel sostiene hasta ocho diferentes herramientas, como brocas, machuelos y rimas.

uso de una torreta (fig. 23.25). Obsérvese que la torreta (revólver) sostiene diferentes herramientas de taladrado.

Las taladradoras con husillos múltiples (**taladradoras múltiples**) se utilizan en operaciones de alta velocidad de producción. Estas máquinas tienen la capacidad de taladrar, en un ciclo, hasta 50 orificios de diversos tamaños, profundidades y ubicaciones. También se pueden usar en operaciones de escariado y abocardado. Sin embargo, con los avances en las máquinas herramienta, en la actualidad las taladradoras múltiples han sido reemplazadas por las *taladradoras de torreta de control numérico*. Las taladradoras especiales, como las empleadas para producir orificios en bisagras continuas (*bisagras para pianos*), utilizan brocas helicoidales de 1 mm (0.040 pulgada) de diámetro. Por lo general, estas máquinas son horizontales y producen orificios en segmentos hasta de 3 m (10 pies) de largo en un ciclo.

Los *dispositivos de sujeción del trabajo* para taladrar son fundamentales para asegurar que la pieza de trabajo se ubique de manera adecuada; también evitan que se deslice o gire durante el taladrado. Existen dispositivos de sujeción del trabajo en varios diseños; las características importantes son *(a)* localización de tres puntos para obtener precisión, y *(b)* la sujeción tridimensional del trabajo, a fin de asegurar su fijación. (Ver también la sección 37.8).

23.5.7 Consideraciones de diseño para taladrado

Los lineamientos básicos de diseño para taladrado son los siguientes:

- Los diseños deben permitir que los orificios se taladren en superficies planas y perpendiculares al movimiento de la broca. De lo contrario, ésta tiende a doblarse y el orificio no se ubica con precisión. Las superficies de salida de la broca también deben ser planas.
- Se deben evitar o minimizar las superficies interrumpidas de orificios para mejorar la precisión dimensional, la vida de la broca e impedir vibraciones.
- Los fondos de los orificios deben coincidir, si es posible, con los ángulos estándar de la punta de la broca; deben evitarse los fondos planos o de formas irregulares.
- Son preferibles los orificios pasados a los ciegos. Si se requieren orificios con diámetros grandes, la pieza de trabajo debe tener un orificio preexistente, de preferencia producido durante la fabricación de la parte (por fundición, metalurgia de polvos o formado). En caso de que no sea práctico hacer orificios, deben producirse hoyuelos para reducir la tendencia a que la broca "camine".
- Las partes deben diseñarse de manera que todo el taladrado se pueda efectuar con un mínimo de fijación y sin tener que reposicionar la pieza de trabajo.
- Los orificios ciegos deben taladrarse con mayor profundidad que los que se obtengan con las operaciones de rimado o machueleado que se puedan realizar posteriormente.

23.6 Rimado y rimas

El *rimado (*escariado) es una operación utilizada para *(a)* hacer que un orificio ya existente sea más preciso dimensionalmente que el obtenido sólo con taladrado, y *(b)* mejorar su acabado superficial. Los orificios más precisos en las piezas de trabajo suelen producirse mediante la siguiente secuencia de operaciones:

1 Centrado
2 Taladrado
3 Mandrinado
4 Rimado

Para obtener precisión y acabado superficial todavía mejores, los orificios se pueden *bruñir* o *rectificar* u *honear* internamente (secciones 26.6 y 26.10).

Una *rima* (fig. 23.26a) es una herramienta con múltiples filos de corte, con bordes rectos o helicoidalmente estriados o acanalados que remueven muy poco material. Por lo

común, en metales blandos, una rima remueve un mínimo de 0.2 mm (0.008 pulgada) en el diámetro de un orificio taladrado y para metales más duros alrededor de 0.13 mm (0.005 pulgada). Los intentos por retirar capas más pequeñas pueden ser perjudiciales, ya que se dañaría la rima o se bruñiría la superficie del orificio (ver también fig. 21.22 como analogía). En este caso, es preferible el honeado. Por lo general, las velocidades de la rima son la mitad de la de la broca del mismo tamaño y tres veces la velocidad de avance.

Las *rimas manuales* son rectas y tienen un extremo cónico en el primer tercio de su longitud. Existen diversas *rimas o escariadores* (también conocidas como *rimas de broquero*, porque se montan en un broquero o mandil y se accionan mediante una máquina) de dos tipos: (1) las *rimas tipo rosa* tienen filos de corte con amplios márgenes y sin alivio o desahogo (fig. 23.26a). Éstas retiran una cantidad considerable de material y nivelan un orificio para el rimado de estrías. (2) Las *rimas estriadas o acanaladas* tienen pequeños márgenes y alivio con un ángulo de ataque de 5°. Por lo general, se utilizan para cortes ligeros de alrededor de 0.1 mm (0.004 pulgada) en el diámetro del orificio.

Las *rimas huecas* (que se montan en un eje) son empleadas por lo general para orificios mayores a 20 mm (0.75 pulgada). Las *rimas de expansión* son ajustables para pequeñas variaciones en el tamaño del orificio y también para compensar por el desgaste de los filos de corte de la rima. Las *rimas ajustables* (fig. 23.26b) se pueden ajustar para diámetros específicos de orificios y, por lo tanto, son versátiles.

Las rimas deben sostenerse con rigidez (en un mandril o *chuck*), o pueden *flotar* en sus aditamentos de sujeción para asegurar la alineación o *pilotearse* en bujes guía colocados arriba y debajo de la pieza de trabajo. Un mayor desarrollo en el rimado consiste en la *broca-rima (rima de ensueño)*, herramienta que combina taladrado y rimado. La punta de la herramienta produce un orificio por taladrado y el resto de la misma efectúa una operación de rimado. Un desarrollo similar comprende taladrado y rimado en una carrera utilizando una sola herramienta.

Por lo general, las rimas se fabrican con aceros de alta velocidad (M1, M2 y M7) o carburos sólidos (K20; C2), o tienen filos de corte de carburo. El mantenimiento y reacondicionamiento de las rimas es importante para dar precisión y acabado superficial al orificio.

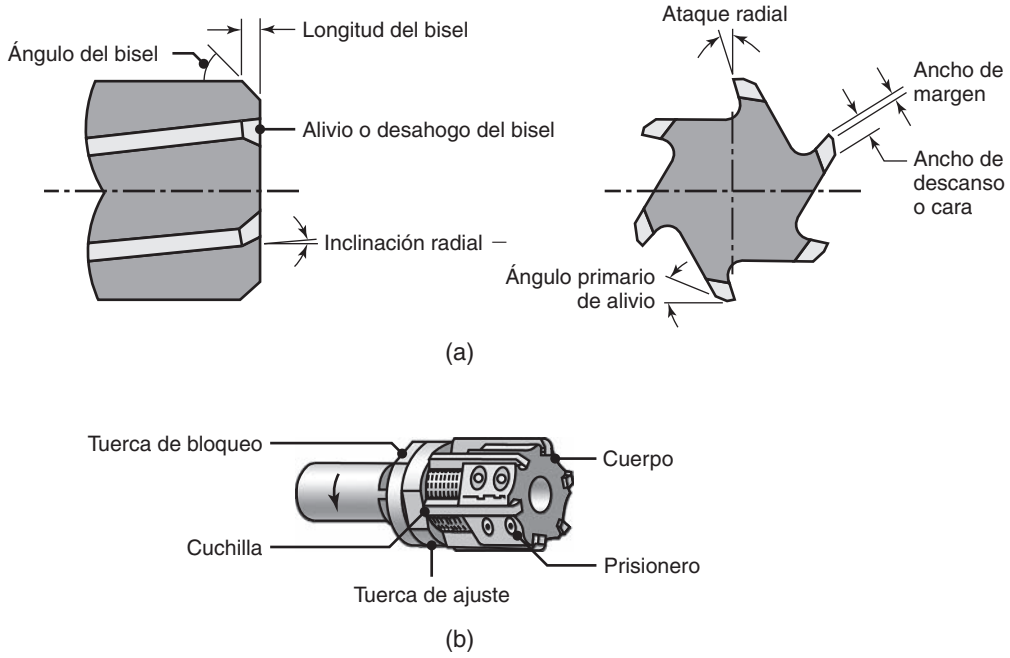


FIGURA 23.26 *(a)* Terminología de una rima helicoidal. *(b)* Rima ajustable de cuchilla insertada.

23.7 Machueleado y machuelos

Las roscas internas en las piezas de trabajo se pueden producir mediante *machueleado*. Un *machuelo* es una herramienta de roscado que produce virutas mediante múltiples dientes de corte (fig. 23.27a). En general, existen machuelos con dos, tres o cuatro canales. El machuelo de producción más común es el de punta espiral de dos canales, que fuerza las virutas hacia el interior del orificio, de manera que es necesario retraer el machuelo sólo al final del corte. Los machuelos de tres canales son más fuertes, debido a que existe más material en el canal. Los tamaños de los machuelos son hasta de 100 mm (4 pulgadas).

Los *machuelos cónicos* están diseñados para reducir el torque requerido para el machueleado de orificios pasados. Los *machuelos de fondo* se emplean en el machueleado de orificios o agujeros ciegos hasta su profundidad total. Los *machuelos colapsables* se utilizan en orificios de diámetro grande; después de completar el machueleado, el machuelo se desmonta mecánicamente y se retira del orificio sin rotación.

La remoción de virutas puede ser un problema significativo durante el machueleado, debido a los pequeños espacios comprendidos. Si las virutas no se retiran de manera adecuada, el torque excesivo que se produce puede romper el machuelo. El uso de un fluido de corte y la inversión y remoción periódica del machuelo del orificio son medios efectivos de remoción de virutas y de mejora de la calidad del orificio machueleado. Para mejorar la productividad del machueleado, se puede combinar con el taladrado en una sola herramienta (*broca-machuelo*); ésta tiene una sección de taladrado en la punta, seguida de una sección de machueleado.

El machueleado se puede efectuar de manera *manual* o con máquinas como *(a)* taladros; *(b)* tornos; *(c)* máquinas roscadoras automáticas, y *(d)* máquinas fresadoras verticales CNC que combinan la rotación correcta relativa y el avance longitudinal. Existen máquinas especiales de machueleado con características para múltiples operaciones de machueleado. Los cabezales con husillos múltiples de machuela se utilizan ampliamente, sobre todo en la industria automotriz, en la que de 30% a 40% de las operaciones de maquinado comprenden el machuelado de orificios. En la figura 23.27b se muestra un sistema para el machueleado automático de tuercas.

Con la lubricación adecuada, la vida de un machuelo puede ser hasta de 10,000 orificios; se puede determinar con la misma técnica utilizada para medir la vida de una broca. Es común fabricar machuelos con aceros de alta velocidad (M1, M2, M7 y M10). La productividad en las operaciones de machueleado se puede mejorar mediante *machueleado de alta velocidad,* con velocidades superficiales hasta de 100 m/min (350 pies/min). También se han mejorado los sistemas de machueleado de *autoinversión* de manera significativa y en la actualidad se usan con máquinas herramienta controladas por computadora. Las velocidades de operación pueden ser tan altas como 5000 rpm, aunque las velocidades de corte reales en la mayoría de las aplicaciones son considerablemente bajas. Los tiempos de los ciclos suelen ser de 1 a 2 segundos.

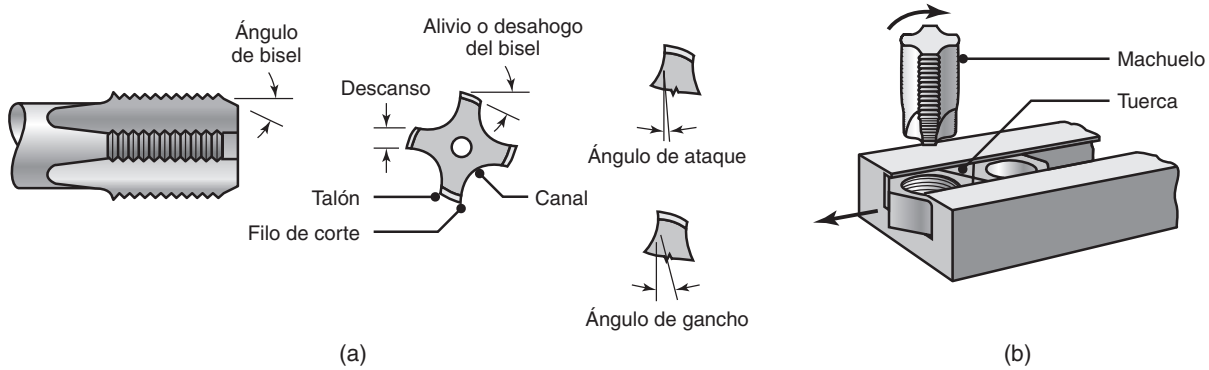


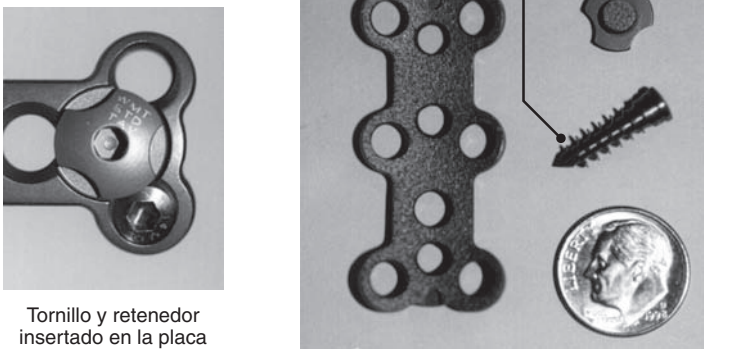
FIGURA 23.27 *(a)* Terminología de un machuelo. *(b)* Machueleado de tuercas de acero en producción.

En la actualidad, algunos sistemas de machueleado pueden dirigir el fluido de corte a una zona de corte a través del husillo y un orificio en el machuelo, que también ayuda a desechar las virutas del orificio que se está machueleando. El **machueleado sin virutas** es un proceso de laminación interna de roscas utilizando un machuelo formador (sección 13.5).

ESTUDIO DE CASO 23.1 Retenedor de tornillo para huesos

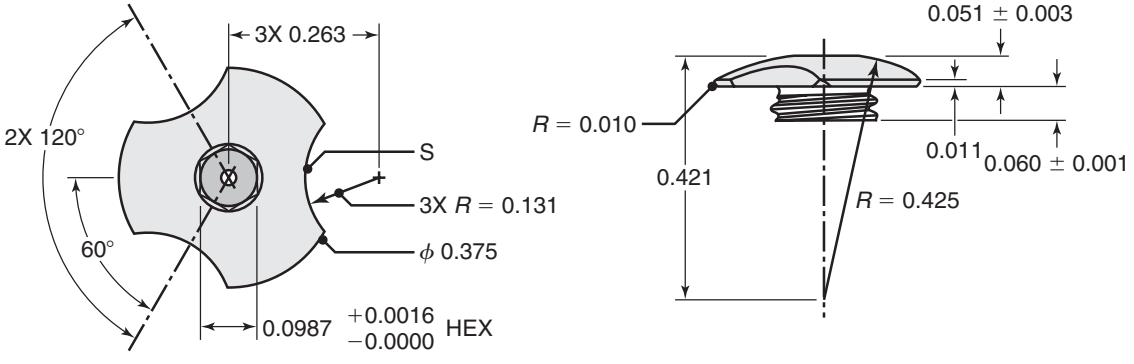
En la figura 23.28a se muestra un implante de espina cervical. En caso de que un paciente requiera una fusión del hueso cervical en uno o más niveles vertebrales, este implante puede actuar como estabilizador interno, limitando la cantidad de movimiento en esta región para ayudar a promover una fusión exitosa. La placa se fija en la parte anterior de la espina con tornillos para hueso, que pasan a través de la placa y dentro del hueso. La superficie inferior de la placa es muy rugosa, lo que ayuda a mantener la placa en su lugar mientras se insertan los tornillos para hueso.

Una inquietud con este tipo de implante es la posibilidad de que los tornillos para hueso se aflojen con el tiempo, debido a la carga normal repetitiva del paciente. En casos extremos esto puede provocar que el tornillo se salga, haciendo que la cabeza del tornillo ya no se alinee con la placa; tal condición es obviamente poco deseable. Este implante utiliza un retén para evitar que el tornillo del hueso se salga de la placa.



Tornillo y retenedor insertado en la placa

(a)



Nota: La rosca debe iniciar en el punto S para asegurar que el retén interfiera con el tornillo para hueso.

(b)

FIGURA 23.28 Implante de espina cervical. Todas las dimensiones en pulgadas.

En la mitad derecha de la figura 23.28b se muestra el dibujo de la parte correspondiente al retén.

El retén tiene varias características de diseño que son fundamentales para su correcto funcionamiento y sin complicar el procedimiento quirúrgico. Para facilitar su uso en cirugía, la placa se suministra con los retenes ya colocados y muescas circulares alineadas con los orificios de los tornillos para hueso. Esto permite al cirujano insertar dichos tornillos sin interferencia del retén. Una vez insertados, el médico gira el retén algunos grados para capturar cada una de las cabezas de los tornillos. Para asegurar la orientación adecuada del retén en la placa, la rosca de su vástago debe iniciar en la misma ubicación axial que el punto S en la figura 23.28b.

En la figura 23.28b se muestran los pasos de manufactura para producir esta parte. Primero se coloca una barra Ti-6Al-4V de 0.5 pulgada de diámetro en un torno CNC y se refrenta; después se tornea el área roscada hasta obtener el diámetro necesario para maquinar las roscas. Se tornea la rosca en el vástago, pero con una longitud mayor que la finalmente requerida, debido a las dificultades para conseguir roscas de alta calidad al inicio del maquinado. Luego se tornea la tapa al diámetro requerido y se maquina el radio de 0.10 pulgada en la parte inferior de la cabeza. La parte se extrae, inspecciona y coloca en otro torno CNC, en el que se refrenta hasta la longitud requerida. Se maquina el radio esférico en la tapa, se taladra el orificio central y se somete a brochado la cabeza hexagonal. Se extrae e inspecciona la tapa. Si no se ha alcanzado la longitud deseada, se lapea (sección 26.7) a la dimensión final.

En este punto, el retén se coloca en una máquina fresadora CNC por medio de un aditamento diseñado en forma especial, que consta básicamente de un orificio cónico, roscado. Una vez que la tapa se coloca en el aditamento, se maquinan las tres muescas circulares conforme al dibujo. Después el retén se rebabea y se tamborea, para remover todas las esquinas filosas, y se limpia el fondo con chorro de granalla, para que coincida con el de la parte superior de la placa. Por último, se anodizan las partes (sección 34.10) y se pasivan para obtener la biocompatibilidad deseada.

Fuente: Cortesía de J. Mankowski y B. Pyszka, Master Metal Engineering Inc., y C. Lyle y M. Handwerker, Wright Medical Technology, Inc.

RESUMEN

- Los procesos de maquinado que comúnmente producen perfiles circulares externos e internos son el torneado, mandrinado, taladrado y machueleado. Debido a la naturaleza tridimensional de estas operaciones, el movimiento de las virutas y su control son factores que deben considerarse. La remoción de virutas puede ser un problema significativo (sobre todo en el taladrado y machueleado) y hacer que se rompa la herramienta.
- La optimización de cada proceso de maquinado requiere la comprensión de las relaciones entre los parámetros de diseño (forma, precisión dimensional y acabado superficial de la parte), los parámetros del proceso (velocidad de corte, avance y profundidad de corte), material y forma de la herramienta, uso de fluidos de corte y secuencia de las operaciones por realizar.
- El maquinado de alta velocidad, el torneado duro y el maquinado de ultraprecisión son desarrollos importantes que han ayudado a reducir los costos de maquinado y a producir partes con acabado superficial y precisión dimensional excepcionales.
- Las partes a maquinar pueden haberse producido por fundición, forjado, extrusión o metalurgia de polvos. Cuanto más aproximada sea la pieza en bruto a maquinar a la forma final deseada (forma casi neta), serán menores el número y la extensión de los procesos de maquinado posteriores.

TÉRMINOS CLAVE

Ángulo de alivio
Ángulo de ataque
Ángulo de ataque lateral
Ángulo de ataque posterior
Ángulo de filo de corte
Bancada
Barra de avance
Boquilla
Broca helicoidal
Cabezal
Careado (refrentado)
Carro
Contrapunto
Corte de régimen dúctil
Cortes de acabado
Cortes de desbaste
Fuerza de avance
Herramientas formadoras
Machueleado
Mandril
Mandril de potencia
Mandrinado
Mandrinador de orificios
Manejo de virutas
Máquina automática para barra
Maquinado casi en seco
Maquinado de alta velocidad
Maquinado de ultraprecisión
Maquinado duro
Maquinado en seco
Moleteado
Plato o perro de arrastre
Producción de orificios
Radio de punta
Reacondicionamiento de brocas
Rima
Rimado (escariado)
Roscado
Roscas de tornillos en torno
Taladrado
Taladradora de cañones
Taladradora de columna
Torneado
Torneado de diamante
Tornillo de avance
Torno de torreta
Torno mecánico
Tornos
Tronzado
Velocidad de remoción de material
Vida de la broca

BIBLIOGRAFÍA

Arnone, M., *High Performance Machining*, Hanser, 1998.

ASM Handbook, Vol. 16: *Machining*, ASM International, 1989.

Boothroyd, G. y Knight, W. A., *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, 2a. ed., Marcel Dekker, 1989.

Brown, J., *Advanced Machining Technology Handbook*, McGraw-Hill, 1998.

Byers, J. P. (ed.), *Metalworking Fluids*, Marcel Dekker, 1994. *Handbook of High-Speed Machining Technology*, Chapman and Hall, 1985.

Hoffman, E. G., *Jigs and Fixture Design*, 4a. ed., Industrial Press, 1996.

Juneja, B. L., *Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools*, Wiley, 1987.

Krar, S. F. y Check, A. F., *Technology of Machine Tools*, 5a. ed., Glencoe Macmillan/McGraw-Hill, 1996.

Machinery's Handbook, Industrial Press, modificado periódicamente.

Machining Data Handbook, 3a. ed., 2 vols. Machinability Data Center, 1980.

Metal Cutting Tool Handbook, 7a. ed., Industrial Press, 1989.

Meyers, A. L. y Slattery, T., *Basic Machining Reference Handbook*, Industrial Press, 1988.

Nachtman, E. S. y Kalpakjian, S., *Lubricants and Lubrication in Metalworking Operations*, Marcel Dekker, 1985.

Rechetov, D. N. y Portman, V. T., *Accuracy of Machine Tools*, ASME International, 1989.

Sluhan, C. (ed.), *Cutting and Grinding Fluids: Selection and Application*, Society of Manufacturing Engineers, 1992.

Stephenson, D. A. y Agapiou, J. S., *Metal Cutting Theory and Practice*, Marcel Dekker, 1996.

Stout, K. J., Davis, E. J. y Sullivan, P. J., *Atlas of Machined Surfaces*, Chapman and Hall, 1990.

Tool and Manufacturing Engineering Handbook, 4a. ed., Vol. 1: *Machining*. Society of Manufacturing Engineers, 1983.

Walsh, R. A., *McGraw-Hill Machining and Metalworking Handbook*, McGraw-Hill, 1994.

Weck, M., *Handbook of Machine Tools*, 4 vols., Wiley, 1984.

PREGUNTAS DE REPASO

23.1 Describa los tipos de operaciones de maquinado que se efectúan en un torno.
23.2 Explique las funciones de los diferentes ángulos en una herramienta de corte de una sola punta.
23.3 ¿Por qué se desarrollaron los mandriles o *chucks* de potencia?
23.4 ¿Por qué *(a)* el mandrinado, y *(b)* el machueleado en un torno pueden ser operaciones difíciles?
23.5 ¿Por qué hay más de una torreta en los tornos de torreta?
23.6 Describa las diferencias entre el mandrinado de una pieza de trabajo en un torno y el mandrinado en una fresadora de mandrinado horizontal.
23.7 ¿Cómo se determina la vida útil de una broca?
23.8 ¿Por qué se realizan operaciones de rimado?
23.9 Describa la diferencia entre un apoyo fijo y un apoyo deslizable. Dé una aplicación para cada uno de ellos.
23.10 Explique las funciones de la silleta en un torno.
23.11 Describa las ventajas relativas de dados *(a)* de autoapertura, y *(b)* sólidos para roscado.
23.12 ¿Cuál es la diferencia entre una fresadora de mandrinado y un torno?
23.13 Explique cómo se cortan las roscas externas en un torno.
23.14 ¿Cuál es la diferencia entre un orificio ciego y un orificio pasado? ¿Cuál es su significado?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

23.15 Explique las razones de los diversos lineamientos de diseño para torneado.
23.16 Observará que se han utilizado los términos "resistencia de la herramienta" y "resistencia del material de la herramienta". ¿Considera que hay alguna diferencia entre ellos? Explique su respuesta.
23.17 Explique por qué la secuencia de taladrado, mandrinado y rimado produce un orificio más preciso que el trabajado sólo por taladrado y rimado.
23.18 Explique por qué las operaciones de maquinado pueden ser necesarias incluso en partes de forma neta o casi neta fabricadas mediante fundición de precisión, formado o metalurgia de polvos.
23.19 ¿Cuáles son las consecuencias del taladrado con una broca que no se afila de manera adecuada?
23.20 Se está torneando una barra redonda irregular y muy oxidada. ¿Recomendaría una profundidad de corte pequeña o grande? Explique sus razones.
23.21 Describa los problemas, en su caso, que pudieran encontrarse en la sujeción de una pieza de trabajo fabricada con un metal blando en un plato de tres mordazas.
23.22 ¿Cambia la fuerza o el torque en el taladrado conforme aumenta la profundidad del orificio? Explique su respuesta.
23.23 Explique las similitudes y diferencias entre los lineamientos de diseño para torneado y para mandrinado.
23.24 ¿Cuáles son las ventajas y aplicaciones de tener un husillo hueco en el cabezal de un torno?
23.25 Explique cómo haría para producir una conicidad en una pieza de trabajo redonda en un torno.
23.26 Suponga que se le pide realizar una operación de mandrinado en una pieza de trabajo hueca de diámetro grande. ¿Utilizaría una fresadora de mandrinado horizontal o vertical? Explique su respuesta.
23.27 Explique las razones de la tendencia principal a producir roscas mediante laminación contra el corte de las mismas. ¿Cuáles serían las diferencias (en su caso) en los tipos de roscas producidos y sus características de desempeño?
23.28 En algunos materiales, el orificio taladrado puede ser más pequeño que el diámetro de la broca. Explique este fenómeno e identifique las propiedades correspondientes del material que podrían influir.
23.29 Describa sus observaciones respecto del contenido de las tablas 23.2 y 23.4 y explique por qué se hacen dichas recomendaciones en particular.
23.30 Se ha visto que la velocidad, el avance y la profundidad de corte son los parámetros principales en una operación de torneado. En términos relativos, ¿en qué valores se deberían establecer estos parámetros para *(a)* una operación de desbaste, y *(b)* una operación de acabado?
23.31 Explique la justificación económica para comprar un torno de torreta o revólver en vez de uno convencional.
23.32 La nota al pie de la tabla 23.11 indica que (en el taladrado) conforme aumenta el diámetro del orificio, se deben reducir las velocidades y los avances. Explique por qué.
23.33 En la manufactura moderna con máquinas herramienta controladas por computadora, ¿qué tipos de virutas metálicas serían poco deseables y por qué?

23.34 Liste y explique los factores que contribuyen a un acabado superficial deficiente en los procesos descritos en este capítulo.
23.35 La severidad operativa para el rimado es mucho menor que la del machueleado, aunque ambos son procesos de remoción interna de material que pueden resultar difíciles. ¿Por qué?
23.36 Revise la figura 23.6 y comente los factores implicados en la determinación de la altura de las zonas (de velocidad de corte) para diversos materiales para herramientas.
23.37 Ya se indicó que algunos mandiles o *chucks* se accionan mediante potencia. Realice un estudio en la bibliografía técnica y describa el diseño básico de dichos mandriles.
23.38 ¿Qué operaciones se pueden efectuar comúnmente en una taladradora de columna, pero no en un torno?
23.39 Explique cómo se mantienen centradas las brocas de cañones durante el taladrado. ¿Por qué existe un canal longitudinal hueco en una broca de cañón?
23.40 Comente la magnitud del ángulo de cuña en la herramienta mostrada en la figura 23.4.
23.41 Si se utilizan insertos en una broca, ¿es importante el material del zanco? Si es así, ¿qué propiedades son básicas? Explique su respuesta.
23.42 En relación con la figura 23.10b (además de las herramientas mostradas), describa otros tipos de herramientas de corte que se puedan colocar en portaherramientas para efectuar otras operaciones de maquinado.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

23.43 Calcule las mismas cantidades que en el ejemplo 23.1 para aleación de titanio de alta resistencia y $N = 800$ rpm.
23.44 Estime el tiempo de maquinado requerido para desbastar en un torno una barra de aleación de cobre recocido de 0.4 m de largo, de entre 55 mm y 60 mm de diámetro, utilizando una herramienta de acero de alta velocidad. (Ver tabla 23.4.) Calcule el tiempo requerido para una herramienta de carburo sin recubrimiento.
23.45 Una barra de hierro fundido de alta resistencia de 5 pulgadas de diámetro se está torneando en un torno a una profundidad de corte $d = 0.050$ pulgada. El torno está equipado con un motor eléctrico de 15 hp y tiene una eficiencia mecánica de 80%. La velocidad del husillo es de 500 rpm. Estime el avance máximo antes de que el torno empiece a atascarse.
23.46 Una broca de 0.4 pulgada de diámetro se utiliza en una taladradora de columna o vertical que opera a 300 rpm. Si el avance es de 0.005 pulgada/rev, ¿cuál es la MRR? ¿Cuál es la MRR si se duplica el diámetro de la broca?
23.47 En el ejemplo 23.4, suponga que el material de la pieza de trabajo es aleación de aluminio de alta resistencia y el husillo está corriendo a $N = 600$ rpm. Estime el torque requerido para esta operación.
23.48 En una operación de taladrado, una broca de 0.5 pulgada se está utilizando en una pieza de trabajo de acero de bajo carbono. El orificio es ciego y se machueleará a una profundidad de 1 pulgada. La operación de taladrado ocurre con un avance de 0.010 pulgada/rev y una velocidad de husillo de 700 rpm. Estime el tiempo requerido para taladrar el orificio antes de machuelearlo.
23.49 Se va a tornear una parte cilíndrica de acero inoxidable de baja resistencia de 3 pulgadas de diámetro en un torno a 600 rpm, con una profundidad de corte de 0.2 pulgada y un avance de 0.025 pulgada/rev. ¿Cuáles deberían ser los caballos de fuerza mínimos del torno?
23.50 Se va a reducir el diámetro de un cilindro de aluminio de 6 pulgadas de diámetro y 10 pulgadas de longitud, a un diámetro de 4.5 pulgadas. Utilizando las condiciones comunes de maquinado provistas en la tabla 23.4, estime el tiempo de maquinado si se usa una herramienta de carburo con recubrimiento de TiN.
23.51 Para los datos en el problema 23.50, calcule la potencia requerida.
23.52 Suponga que es un instructor que cubre los temas descritos en este capítulo y está aplicando un examen sobre los aspectos numéricos para evaluar los conocimientos de los alumnos. Elabore dos problemas cuantitativos y proporcione las respuestas.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

23.53 ¿Consideraría los procesos de maquinado descritos en este capítulo como procesamiento de forma neta (que ya no requiere más procesamiento)? ¿Procesamiento de forma casi neta? Explique con ejemplos adecuados.
23.54 Si un perno se rompe dentro de un orificio de modo que se quede sin cabeza, se retira primero taladrando un orificio en el vástago del perno y después utilizando una herramienta especial para extraerlo. Inspeccione dicha herramienta y explique cómo funciona. ¿Podría pensar en otros medios de extracción del perno roto del orificio? Explique su respuesta.

23.55 Describa la máquina herramienta y las monturas necesarias para maquinar bates de béisbol de material cilíndrico de madera.

23.56 Una tendencia importante en las operaciones de maquinado es el uso creciente de montajes flexibles. Investigue en Internet en relación con los montajes flexibles y comente su diseño y operación.

23.57 Revise la figura 23.7d y explique si sería posible maquinar ejes excéntricos (como el mostrado en la fig. 23.12c) con tal arreglo. ¿Qué pasa si la parte es larga en comparación con su sección transversal?

23.58 Ya se vio que las barras de mandrinado se pueden diseñar con capacidades de amortiguamiento interno para reducir o eliminar la vibración y el traqueteo durante el mandrinado. Consultando la bibliografía técnica y del fabricante, describa los detalles de los diseños para dichas barras de mandrinado.

23.59 ¿Sería difícil utilizar los procesos de maquinado descritos en este capítulo en diversos materiales no metálicos blandos o similares al hule? Explique sus ideas, comentando el papel de las propiedades físicas y mecánicas de dichos materiales en la operación de maquinado y cualquier dificultad en la producción de las formas y precisiones dimensionales deseadas.

23.60 Con los dibujos apropiados, describa los principios de diversos métodos de fijación y dispositivos de sujeción de trabajo que se puedan utilizar para los procesos descritos en este capítulo. Incluya la localización de tres puntos y la sujeción tridimensional del trabajo para las operaciones de taladrado y similares.

23.61 Haga una tabla completa que comprenda las capacidades de los procesos de maquinado descritos en este capítulo. Utilizando varias columnas, describa las máquinas herramienta implicadas, el tipo de herramientas de corte y los materiales de las herramientas utilizadas, las formas de las partes producidas, los tamaños comunes máximo y mínimo, el acabado superficial, las tolerancias dimensionales y las capacidades de producción.

23.62 Revise varios utensilios en una cocina común e identifique los que tengan alguna similitud con los procesos descritos en este capítulo. Comente su principio de operación.

23.63 En la figura 23.14 se mostraron las tolerancias que se pueden obtener por medio del proceso descrito en ella. Dé ejemplos específicos de partes y aplicaciones en las que las precisiones dimensionales ultraelevadas sean fundamentales.

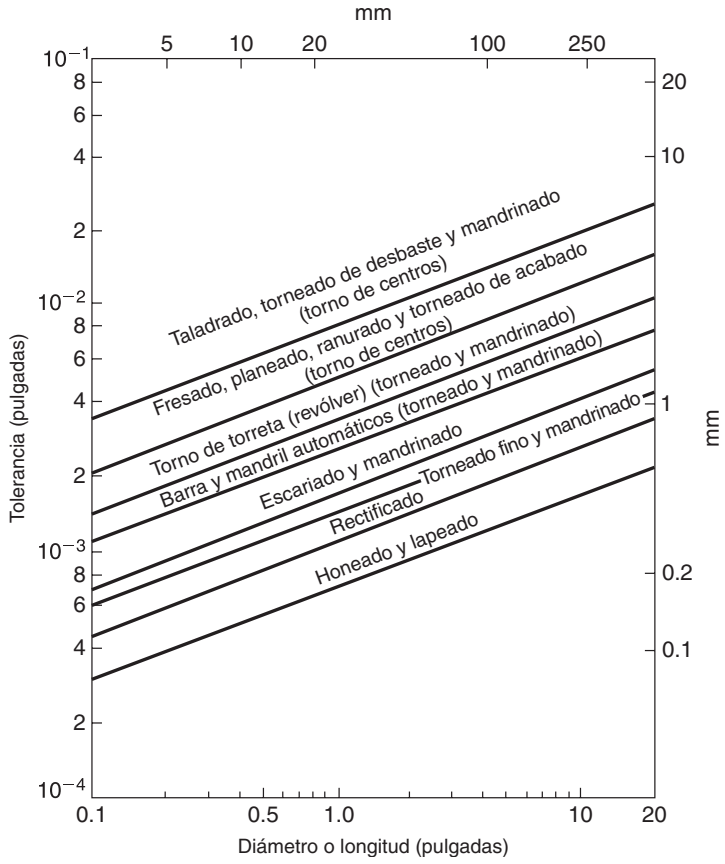
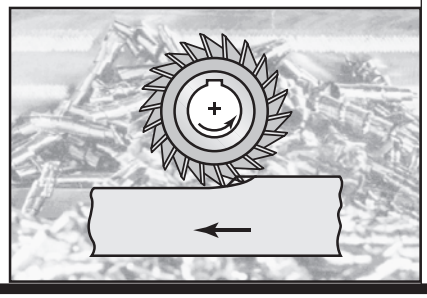


FIGURA P23.63

CAPÍTULO

24

Procesos de maquinado utilizados para producir diferentes formas: fresado, brochado, aserrado y limado; manufactura de engranes



En este capítulo se describen los procesos para producir diversas formas complejas. En especial, se tratan los siguientes temas:

- Operaciones de fresado.
- Maquinado de superficies planas y largas y de perfiles.
- Brochado para producir perfiles externos e internos.
- Operaciones de aserrado y limado.
- Producción de engranes mediante maquinado.

Partes comunes fabricadas: partes con características complejas internas y externas en diversas superficies, estrías y engranes.

Procesos alternativos: fundición a presión en matriz, fundición de precisión, forjado de precisión, metalurgia de polvos y moldeo por inyección de polvos.

24.1 Introducción 723
24.2 Fresado y fresadoras 724
24.3 Cepillado 741
24.4 Brochado y brochadoras 742
24.5 Aserrado 745
24.6 Limado 748
24.7 Manufactura de engranes mediante maquinado 749

EJEMPLOS:

24.1 Velocidad de remoción de material, potencia, torque y tiempo de corte en fresado plano 728
24.2 Velocidad de remoción de material, potencia requerida y tiempo de corte en fresado de careado 732
24.3 Brochado de estrías internas 745

24.1 Introducción

Además de fabricar partes con diversos perfiles externos o internos, las operaciones de maquinado pueden producir muchas partes con formas más complejas (fig. 24.1). En este capítulo se describen distintos procesos de corte y máquinas herramienta que tienen la capacidad de elaborar esas formas mediante herramientas de corte de una sola punta y de dientes múltiples (ver también la tabla 23.1). El capítulo se inicia con uno de los procesos más versátiles, el *fresado*, en el que el cortador rotatorio retira material mientras avanza a lo largo de diversos ejes respecto de la pieza de trabajo.

Más adelante se describen otros procesos de maquinado (como el *cepillado de mesa móvil y de mesa fija* y el *brochado*), en el que la herramienta o la pieza de trabajo avanza a lo largo de una trayectoria recta que produce superficies planas y de diversas formas. Después se estudian los procesos de *aserrado*, que suelen utilizarse para preparar piezas en bruto a partir de barras y placas planas que posteriormente se pueden someter a operacio-

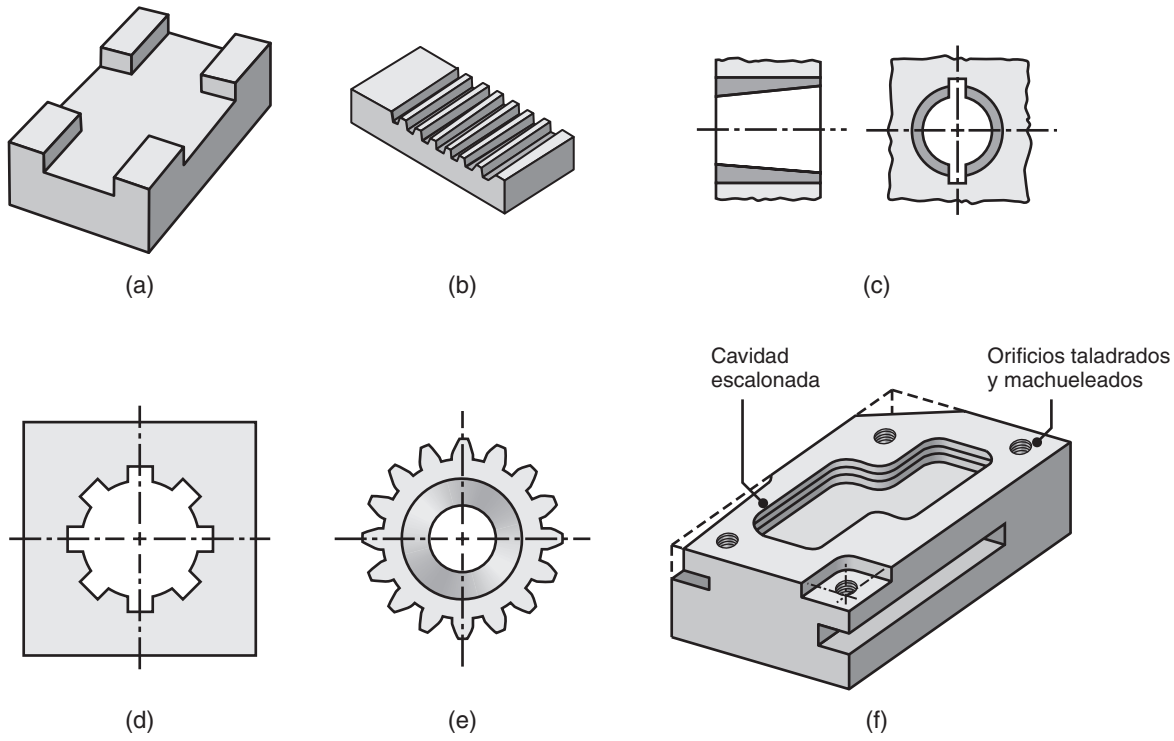


FIGURA 24.1 Partes y formas comunes que se pueden producir mediante los procesos de maquinado descritos en este capítulo.

nes de formado, maquinado y soldadura. También se trata en forma breve el *limado*, que se usa para remover pequeñas cantidades de material, por lo general de bordes y esquinas.

Por último se trata la *manufactura de engranes*, mediante procesos en los que los dientes de los engranes se producen por fundición, metalurgia de polvos y deformación plástica, así como por forjado. En este capítulo se describe la producción de engranes por medio de diversos procesos de maquinado que utilizan cortadores especiales, así como la calidad y las propiedades de los engranes elaborados con estos procesos.

24.2 Fresado y fresadoras

El *fresado* incluye diversas operaciones de maquinado muy versátiles que tienen lugar en varias configuraciones (fig. 24.2) usando una **fresa**, una herramienta multifilo que produce numerosas virutas en una sola revolución.

24.2.1 Fresado periférico

En este proceso (también conocido como *fresado simple*), el eje de rotación del cortador es paralelo a la superficie de trabajo, como se muestra en la figura 24.2a. El cuerpo del cortador, que por lo general se fabrica con acero de alta velocidad, tiene varios dientes a lo largo de su circunferencia; cada diente actúa como una herramienta de corte de una sola punta. Cuando el cortador es más largo que la anchura del corte, el proceso se conoce como *fresado plano*. Los cortadores para fresado periférico pueden tener *dientes rectos* o *helicoidales* (fig. 24.2a), que producen una acción ortogonal u oblicua, respectivamente. Por lo común, son preferibles los dientes helicoidales a los rectos porque el diente ataca en forma parcial la pieza de trabajo conforme va girando. En consecuencia, la fuerza de corte y el torque en el cortador son inferiores, lo que ocasiona una operación más suave y reduce el traqueteo. (Ver también fig. 21.9).

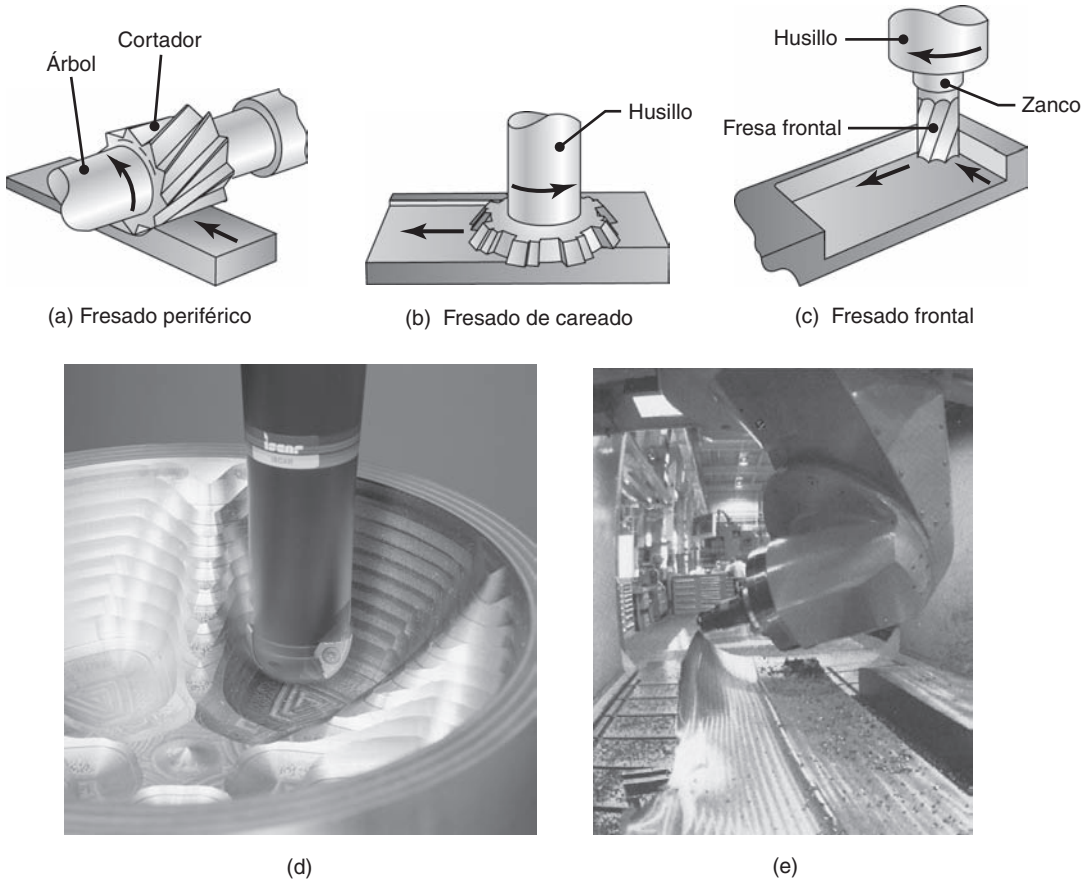


FIGURA 24.2 Algunos tipos básicos de cortadores y operaciones de fresado. *(a)* Fresado periférico. *(b)* Fresado de careado o refrentado. *(c)* Fresado frontal. *(d)* Fresa de punta esférica con insertos indexables con cubierta de carburo maquinando una cavidad en una matriz. *(e)* Fresado de una superficie esculpida con una fresa frontal, utilizando una máquina de control numérico de cinco ejes. *Fuente*: *(d)* Cortesía de Iscar Metals, Inc. *(e)* Cortesía de The Ingersoll Milling Machine Co.

Fresado convencional y fresado concurrente. En la figura 24.3a se observa que el cortador puede rotar en el sentido de las manecillas del reloj o en sentido opuesto; esto es significativo en la operación. En el *fresado convencional* (también conocido como *fresado hacia arriba*), el máximo espesor de las virutas se da al final del corte, cuando el diente abandona la superficie de la pieza de trabajo. Las ventajas del fresado convencional son que *(a)* el ataque del diente no es una función de las características de la superficie de la pieza de trabajo, y *(b)* la contaminación o cascarilla (capa de óxido) en la superficie no afecta de manera adversa la vida de la herramienta. Éste es el método más común de fresado. El proceso de corte es fino, siempre que los dientes del cortador estén bien afilados. De lo contrario, el diente roza contra la superficie antes de empezar a cortar. También puede haber una tendencia a que la herramienta vibre y la pieza de trabajo se jale hacia arriba (debido a la dirección de la rotación del cortador), por lo que es necesaria una sujeción apropiada.

En el *fresado concurrente* (también conocido como *fresado hacia abajo*), el corte empieza en la superficie de la pieza de trabajo donde la viruta es más gruesa. La ventaja es que el componente hacia abajo de la fuerza de corte mantiene la pieza en su lugar, en particular las partes más delgadas. Sin embargo, dadas las fuerzas de impacto que se producen cuando los dientes atacan la pieza, la operación debe mantener rígida la sujeción del trabajo y eliminar el retroceso del engrane en el mecanismo de avance de la mesa. El fresado concurrente no es apropiado para el maquinado de piezas de trabajo que tienen cascarilla en la superficie, como los metales trabajados en caliente, los forjados y las fun-

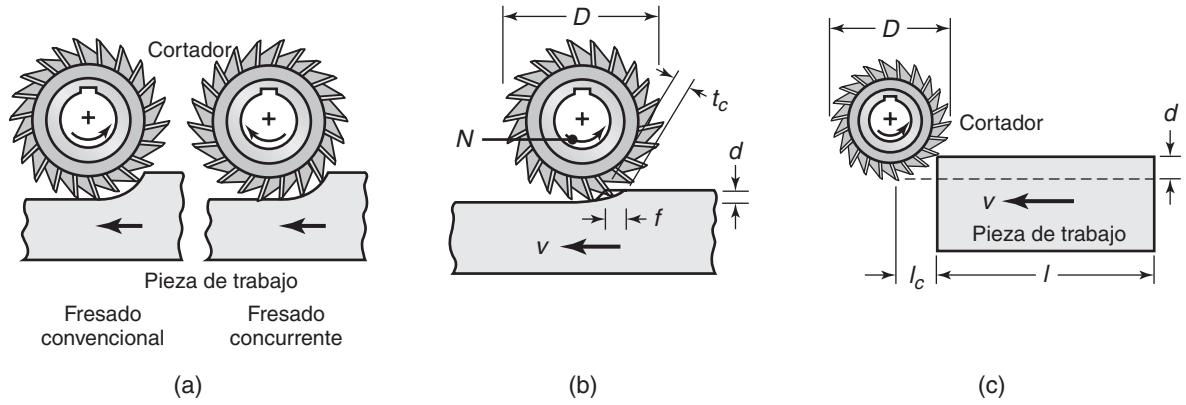


FIGURA 24.3 *(a)* Esquema del fresado convencional y del fresado concurrente. *(b)* Operación de fresado plano que muestra la profundidad de corte, d; avance por diente, f; profundidad de corte de la viruta, t_c, y velocidad de la pieza de trabajo, v. *(c)* Esquema de la distancia de desplazamiento del cortador, l_c, para alcanzar la profundidad de corte total.

diciones. La cascarilla es dura y abrasiva y produce desgaste excesivo, así como daños a los dientes del cortador, lo que acorta la vida de la herramienta.

Parámetros del fresado. La velocidad de corte (V) en el fresado periférico es la velocidad superficial del cortador, o

$$V = \pi DN \tag{24.1}$$

donde D es el diámetro del cortador y N la velocidad rotacional del mismo (fig. 24.4).

Obsérvese que el espesor de la viruta en el fresado plano varía a lo largo de su longitud debido al movimiento longitudinal relativo entre el cortador y la pieza de trabajo. Para un cortador de dientes rectos, el *espesor no deformado de la viruta* (*profundidad de corte de la viruta*) aproximado (t_c) se puede calcular a partir de la ecuación

$$t_c = 2f\sqrt{\frac{d}{D}} \tag{24.2}$$

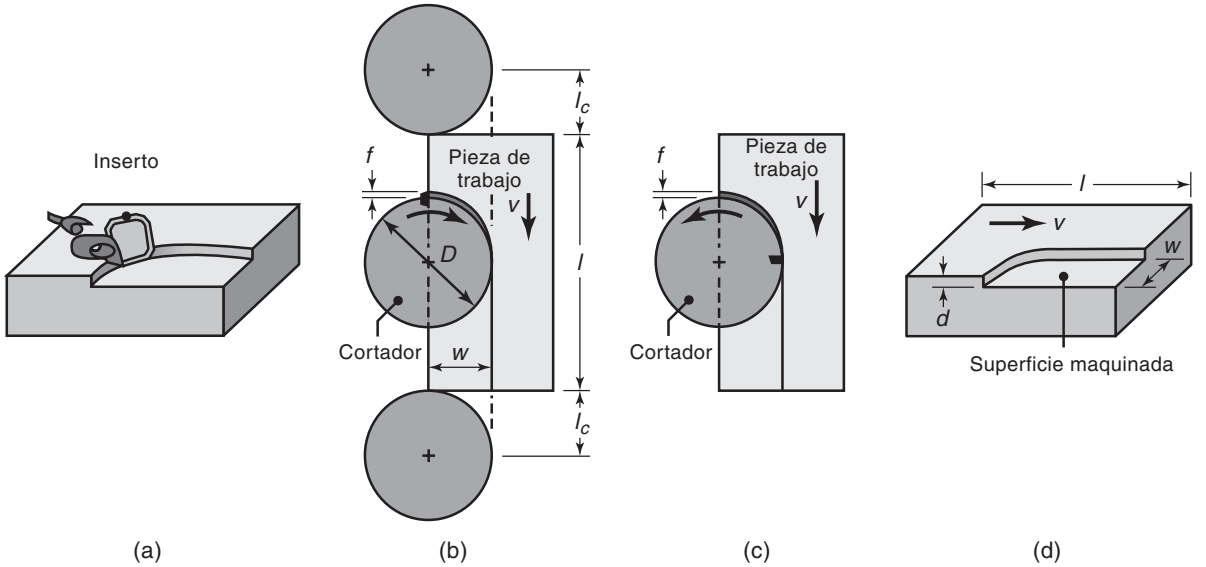


FIGURA 24.4 Operación de fresado de careado que muestra *(a)* la acción de un inserto en el fresado de careado; *(b)* fresado concurrente; *(c)* fresado convencional; *(d)* dimensiones en el fresado de careado. La anchura de corte, w, no es necesariamente la misma que el radio del cortador.

donde f es el avance por diente del cortador, es decir, la distancia que avanza la pieza de trabajo por diente del cortador, en mm/diente o pulgadas/diente, y d es la profundidad de corte. Al aumentar t_c, se incrementa la fuerza en el diente del cortador.

El avance por diente se determina con la ecuación:

$$f = \frac{v}{Nn} \tag{24.3}$$

donde v es la velocidad lineal (*velocidad de avance*) de la pieza de trabajo y n la cantidad de dientes en la periferia del cortador. La precisión dimensional de esta ecuación se puede verificar utilizando las unidades adecuadas para los términos individuales; así, por ejemplo, (mm/diente) = (m/min)(10^3 mm/m)/(rev/min)(número de dientes/rev).

El tiempo de corte (t) se obtiene mediante la expresión

$$t = \frac{l + l_c}{v} \tag{24.4}$$

donde l es la longitud de la pieza de trabajo (fig. 24.3c) y l_c la extensión horizontal del primer contacto del cortador con la pieza de trabajo. Con base en la suposición de que $l_c \ll l$ (aunque por lo general éste no es el caso), la *velocidad de remoción de material* (MRR) es

$$\text{MRR} = \frac{lwd}{t} = wdv \tag{24.5}$$

en la que w es la anchura de corte que (en el fresado plano) es la misma que la anchura de la pieza de trabajo. Como se indica en la sección 23.2, la distancia que el cortador avanza en el ciclo sin corte de la operación de fresado es una consideración económica importante y debe minimizarse, por medios tales como un avance más rápido de los componentes de la máquina herramienta. En la tabla 24.1 se resumen las ecuaciones anteriores y la terminología empleada.

TABLA 24.1

Resumen de parámetros y fórmulas del fresado periférico

N = Velocidad rotacional del cortador de fresado, rpm
F = Avance, mm/diente o pulgadas/diente
D = Diámetro del cortador, mm o pulgadas
n = Número de dientes del cortador
v = Velocidad lineal de la pieza de trabajo o velocidad de avance, mm/min o pulgadas/min
V = Velocidad superficial del cortador, m/min. o pies/min.
= DN
f = Avance por diente, mm/diente o pulgadas/diente
= v/Nn
l = Longitud de corte, mm o pulgadas
t = tiempo de corte, s o min
= $(l + l_c)/v$, en la que l_c = medida del primer contacto del cortador con la pieza de trabajo
MRR = mm^3/min. o $pulg^3$/min.
= wdv, en la que w es el ancho del corte
Torque = N·m o lb·pie
= $F_cD/2$
Potencia = kW o hp
= (Torque)(ω), en la que $\omega = 2\pi N$ radianes/min

Se puede medir y calcular el *requerimiento de potencia* en el fresado periférico, pero es difícil hacerlo con las *fuerzas* que actúan en el cortador (tangencial, radial y axial; ver también fig. 23.5) debido a las diversas variables implicadas, en particular la geometría de la herramienta de corte. Estas fuerzas se pueden medir de manera experimental para diversas condiciones. Sin embargo, el *torque* en el husillo del cortador también puede calcularse a partir de la potencia. (Ver el siguiente ejemplo.) Aunque el torque es producto de la fuerza tangencial en el cortador y el radio del mismo, la fuerza tangencial por diente dependerá de cuántos dientes participan en el corte.

EJEMPLO 24.1 Velocidad de remoción de material, potencia, torque y tiempo de corte en fresado plano

Se está realizando una operación de fresado plano en un bloque de acero blando recocido de 12 pulgadas de largo y 4 pulgadas de ancho, con un avance de $f = 0.01$ pulgadas/diente y una profundidad de corte de $d = \frac{1}{8}$ de pulgada. El cortador tiene $D = 2$ pulgadas de diámetro y 20 dientes rectos, gira a $N = 100$ rpm y por definición es más ancho que el bloque a maquinar. Calcule la velocidad de remoción de material, la potencia y el torque requeridos para esta operación y el tiempo de corte.

Solución De acuerdo con la información proporcionada, la velocidad lineal de la pieza de trabajo (v) se puede calcular mediante la ecuación 24.3:

$$v = fNn = (0.01)(100)(20) = 20 \text{ pulgadas/min}$$

De la ecuación 24.5, se calcula que la velocidad de remoción de material es:

$$\text{MRR} = (4)\left(\frac{1}{8}\right)(20) = 10 \text{ pulg}^3/\text{min}$$

Como la pieza de trabajo es acero blando recocido, estimemos que la potencia unitaria con base en la tabla 21.2 es 1.1 hp · min/pulg^3. Por lo tanto, la potencia requerida se puede calcular como:

$$\text{Potencia} = (1.1)(10) = 11 \text{ hp}$$

El torque que actúa sobre el husillo del cortador también se puede calcular considerando que la potencia es producto de la velocidad rotacional del husillo y el torque (en radianes por unidad de tiempo). Por lo que:

$$\text{Torque} = \frac{\text{Potencia}}{\text{Velocidad Rotatoria}}$$

$$= \frac{(11 \text{ hp})(33{,}000 \text{ lb-pie/min} \cdot \text{hp})}{(100 \text{ rpm})(2\pi)} = 578 \text{ lb-pie.}$$

El tiempo de corte se obtiene mediante la ecuación 24.4, en la que se puede demostrar la cantidad l_c con relaciones geométricas simples y para $D \gg d$, para aproximarse a:

$$l_c = \sqrt{Dd} = \sqrt{(2)\left(\frac{1}{8}\right)} = 0.5 \text{ pulgadas}$$

Por lo tanto, el tiempo de corte es:

$$t = \frac{12 + 0.5}{20} = 0.625 \text{ min} = 37.5 \text{ s}$$

24.2.2 Fresado de careado o refrentado

En el *fresado de careado* o *refrentado* (fig. 24.4), el cortador se monta en un husillo que tiene un eje de rotación perpendicular a la superficie de la pieza de trabajo (fig. 24.2b) y remueve material en la forma mostrada en la figura 24.4a. El cortador gira a una velocidad rotacional N y la pieza se mueve a lo largo de una trayectoria recta a una velocidad lineal v. Cuando la rotación del cortador es semejante a la de la figura 24.4b, la operación es *fresado concurrente*; cuando lo hace en la dirección opuesta (fig. 24.4c), la operación es *fresado convencional*. Los dientes de corte, como los insertos de carburo, se montan en el cuerpo del cortador como se muestra en la figura 24.5 (ver también fig. 22.3c).

Dado el movimiento relativo entre los dientes del cortador y la pieza de trabajo, el fresado de careado deja *marcas de avance* en la superficie maquinada (fig. 24.6) similares a las de las operaciones de torneado (fig. 21.2). Obsérvese que la rugosidad de la superficie de la pieza depende de la geometría de la esquina del inserto y del avance por diente.

En la figura 24.7 se muestra la terminología de un cortador de fresado de careado o refrentado, así como los diversos ángulos. Como se puede ver en la vista lateral del inserto en la figura 24.8, el *ángulo de avance* del inserto en el fresado de careado influye de manera directa sobre el *espesor no deformado de la viruta*, como sucede en las operaciones de torneado. Al aumentar el ángulo de avance (positivo, como se muestra en la fig. 24.8b), disminuye el espesor no deformado de la viruta (como sucede con el espesor de la viruta) y se incrementa la longitud de contacto (anchura de la viruta). El ángulo de avance también influye en las fuerzas de fresado: es evidente que al disminuir dicho ángulo, se presenta un componente de fuerza vertical cada vez más pequeño (fuerza axial sobre el husillo del cortador). Por lo general, los *ángulos principales* para la mayoría de los cortadores de fresado de careado van de 0° a 45°. En la figura 24.8 se observa que el área transversal de la viruta sin deformar permanece constante.

Existe una amplia variedad de cortadores para fresado. El diámetro del cortador debe elegirse de manera que no interfiera en los aditamentos y otros componentes en el arreglo. En una operación común de fresado de careado, la relación del diámetro del cortador (D) a la anchura del corte (w) no debe ser menor a 3:2.



FIGURA 24.5 Cortador de fresado de careado con insertos indexables. *Fuente*: Cortesía de Ingersoll Cutting Tool Company.

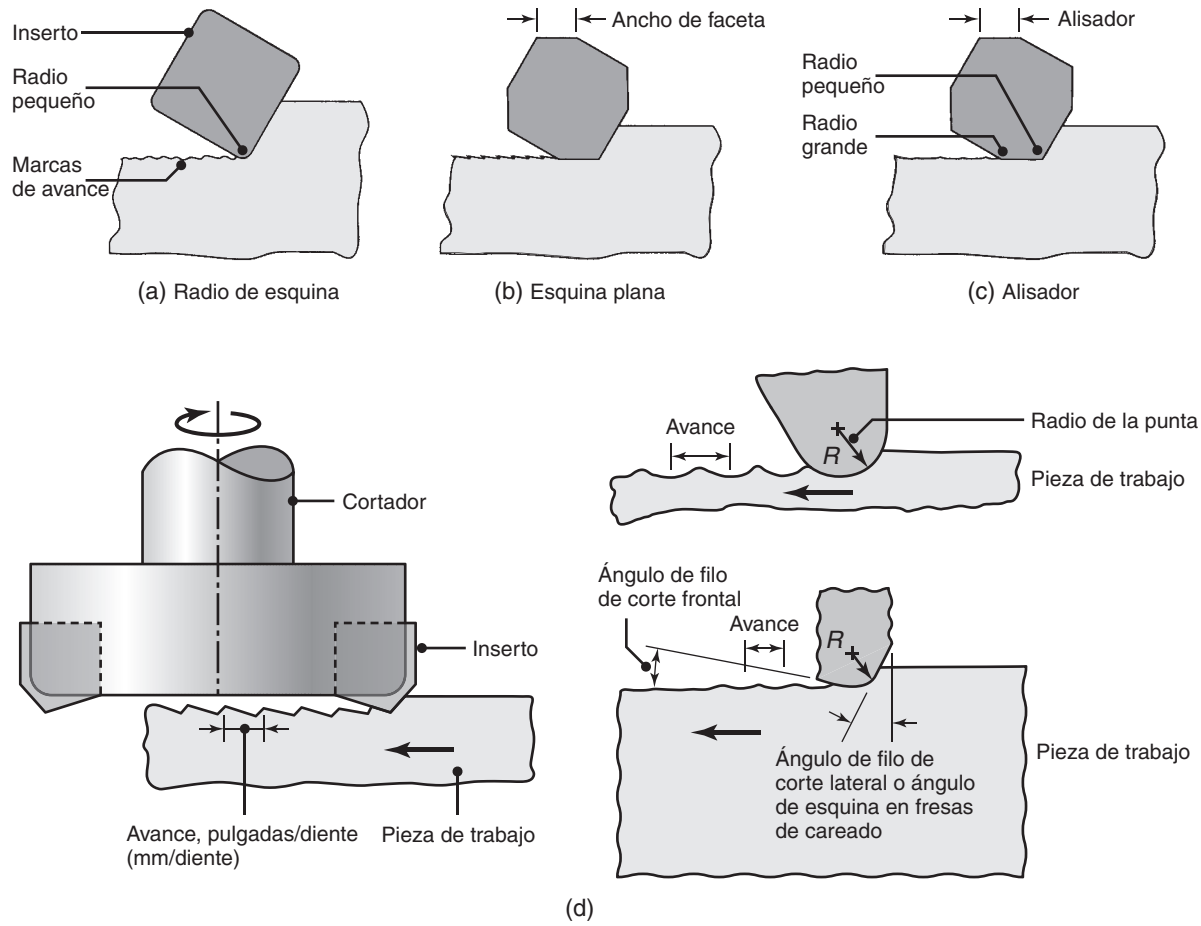


FIGURA 24.6 Esquema del efecto de la forma del inserto sobre las marcas de avance en una superficie de fresado de careado: *(a)* radio pequeño de esquina; *(b)* esquina plana en inserto, y *(c)* alisador, el cual consta de un radio pequeño seguido de un radio grande que deja marcas de avance más finas. *(d)* Marcas de avance debido a diversas formas de insertos.

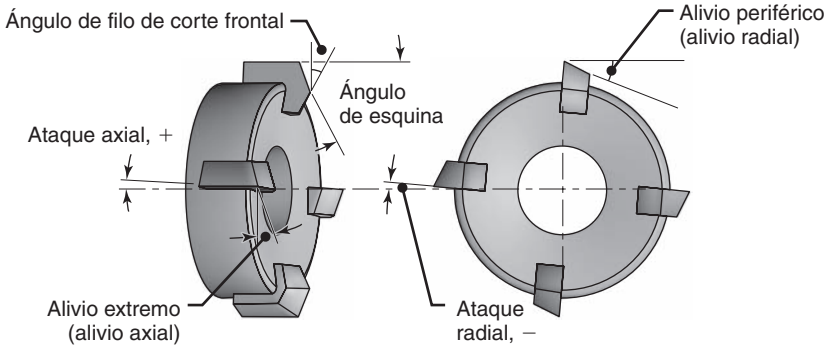


FIGURA 24.7 Terminología del cortador de fresado de careado.

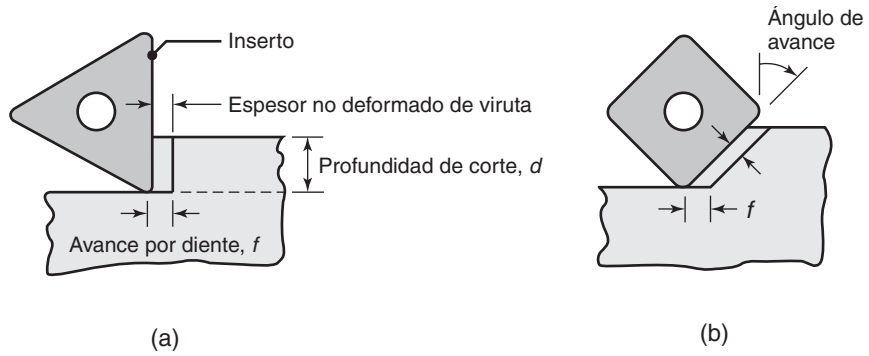


FIGURA 24.8 Efecto del ángulo de avance sobre el espesor no deformado de la viruta en el fresado de careado. Obsérvese que al aumentar el ángulo de avance, disminuye el espesor de la viruta, pero se incrementa la longitud de contacto (es decir, la anchura de la viruta). Los filos del inserto deben ser suficientemente grandes para soportar el aumento de la longitud de contacto.

La relación del diámetro del cortador respecto de los ángulos del inserto y su posición relativa respecto de la superficie a fresar es importante porque determina el ángulo al cual un inserto *entra* y *sale* de la pieza de trabajo. En la figura 24.4b de fresado concurrente se observa que (si el inserto tiene ángulos cero de ataque radial y axial, ver fig. 24.7) la superficie de ataque del inserto ataca directamente la pieza. Sin embargo, en la figura 24.9a y b se advierte que el mismo inserto puede atacar la pieza a diferentes ángulos, dependiendo de las posiciones relativas del cortador y la anchura de la pieza de trabajo. En la figura 24.9a se ve que la punta del inserto hace el primer contacto, de manera que existe la posibilidad de que se astille el filo de corte. Por otro lado, en la figura 24.9b, los primeros contactos (en la entrada, reentrada y las dos salidas) se encuentran en ángulo y lejos de la punta del inserto. Por lo tanto, existe una menor tendencia a que el inserto falle, ya que las fuerzas en el inserto varían con más lentitud. De acuerdo con la figura 24.7, los ángulos de ataque radial y axial también tienen efecto sobre esta operación.

En la figura 24.9c se muestran los ángulos de salida de varias posiciones del cortador. Nótese que en los primeros dos ejemplos el inserto sale de la pieza de trabajo en un ángulo, provocando que la fuerza en el inserto se reduzca a cero a una velocidad menor (deseable) que en el tercer ejemplo, en el que el inserto sale de la pieza de manera repentina (lo cual es poco deseable para la vida de la herramienta).

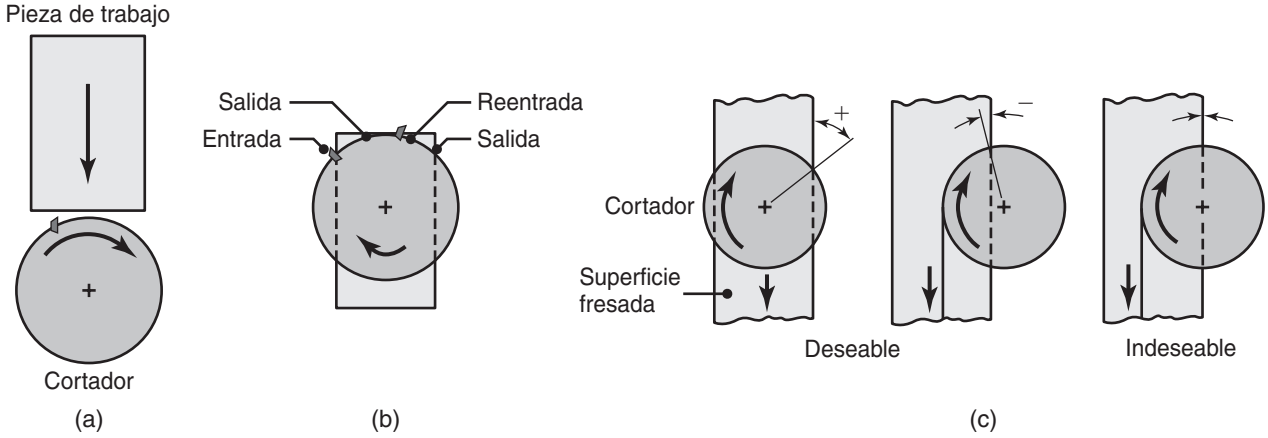


FIGURA 24.9 *(a)* Posición relativa del cortador e inserto al entrar en contacto inicialmente con la pieza de trabajo en el fresado de careado. *(b)* Posiciones del inserto hacia el extremo del corte. *(c)* Ejemplos de ángulos de salida del inserto, que muestran posiciones deseables (ángulo positivo o negativo) e indeseables (ángulo cero). En todas las figuras, el husillo del cortador está perpendicular a la página y gira en el sentido de las manecillas del reloj.

EJEMPLO 24.2 Velocidad de remoción de material, potencia requerida y tiempo de corte en fresado de careado

En relación con la figura 24.4, suponga que $D = 150$ mm, $w = 60$ mm, $l = 500$ mm, $d = 3$ mm, $v = 0.6$ m/min y $N = 100$ rpm. El cortador tiene 10 insertos y el material de la pieza de trabajo es una aleación de aluminio de alta resistencia. Calcule la velocidad de remoción de material, el tiempo de corte, el avance por diente y la potencia requerida.

Solución Primero obsérvese que la sección transversal de corte es $wd = (60)(3) = 180$ mm^2. Si se considera que la velocidad de la pieza de trabajo, v, es 0.6 m/min = 600 mm/min, la velocidad de remoción de material (MRR) se puede calcular como:

$$\text{MRR} = (180)(600) = 108{,}000 \text{ mm}^3/\text{min}$$

El tiempo de corte se obtiene mediante:

$$t = \frac{l + 2l_c}{v}$$

En la figura 24.4 se observa que, para este problema, $l_c = \frac{D}{2} = 75$ mm. Por lo tanto, el tiempo de corte es:

$$t = \frac{500 + 150}{10} = 65 \text{ s} = 1.08 \text{ min}$$

El avance por diente se puede obtener de la ecuación 24.3. Si se considera que $N = 100$ rpm = 1.67 rev/s, se encontrará que:

$$f = \frac{10}{(1.67)(10)} = 0.6 \text{ mm/diente}$$

Para este material, considérese que la potencia unitaria, de acuerdo con la tabla 21.2, es de 1.1 W · s/mm^3. Por lo tanto, la potencia es:

$$\text{Potencia} = (1.1)(1800) = 1980 \text{ W} = 1.98 \text{ kW}$$

24.2.3 Fresado frontal

El *fresado frontal* es una operación de maquinado importante y común debido a su versatilidad y capacidad para producir diversos perfiles y superficies curvadas. El cortador, conocido como **fresa frontal** (fig. 24.2c), tiene un zanco recto (para dimensiones pequeñas) o un zanco cónico (para dimensiones más grandes) y se monta en el husillo de la fresadora. Las fresas frontales se pueden fabricar con aceros de alta velocidad o con insertos de carburo, similares a los del fresado de careado. Por lo general, el cortador gira en un eje perpendicular a la superficie de la pieza de trabajo y también se puede inclinar para maquinar superficies cónicas o curvadas.

Existen fresas frontales con extremos hemiesféricos (*fresas de punta esférica*) para la producción de superficies esculpidas, como en matrices y moldes. Las *fresas frontales huecas* tienen dientes internos de corte y se utilizan para maquinar la superficie cilíndrica de piezas de trabajo sólidas y redondas. El fresado frontal puede producir varias superficies a cualquier profundidad, como las de tipo curvado, escalonadas y de cavidades (fig. 24.2d). El cortador puede retirar material con su filo de corte del extremo y con las horizontales, como se puede ver en la figura 24.2c. Las máquinas de husillo vertical y husillo horizontal, así como los centros de maquinado, pueden emplearse para piezas de trabajo de fresado frontal de diversas formas y tamaños. Las máquinas pueden programarse de manera que el cortador siga una serie compleja de trayectorias que optimicen toda la operación de maquinado, a fin de mejorar la productividad y obtener un costo mínimo.

Fresado frontal de alta velocidad. En la sección 25.5 se describen el maquinado de alta velocidad y sus aplicaciones. El *fresado frontal de alta velocidad* se ha convertido en un proceso importante con diversas aplicaciones, como el fresado de componentes grandes de aluminio para aeronaves y estructuras de panal con velocidades de husillo de 20,000 a 60,000 rpm. Las máquinas deben tener alta rigidez y precisión, requiriendo por lo general rodamientos hidrostáticos (de aire) y dispositivos de sujeción de trabajo de alta calidad. Los husillos poseen una precisión rotatoria de 10 μm, por lo que la superficie de la pieza de trabajo también es muy precisa. A velocidades tan altas de remoción de material, la recolección y el desecho de las virutas pueden representar un problema significativo, como se explicó en la sección 23.3.7.

La producción de cavidades en matrices para conformado de metales (**estampado de matrices**), como en el forjado o el formado de láminas metálicas, también se efectúa mediante fresado frontal de alta velocidad, utilizando a menudo fresas frontales de punta esférica con recubrimiento de TiAlN (fig. 24.10). Las máquinas tienen movimientos de *cuatro* o *cinco ejes* (por ejemplo, ver fig. 24.18) y pueden manejar matrices hasta de 3 m $\times$ 6 m (9 pies $\times$ 18 pies) con un peso de 60 toneladas. Así, no es de sorprender que dichas matrices lleguen a costar alrededor de 2 millones de dólares. Las ventajas de las máquinas de cinco ejes son que *(a)* tienen la capacidad de maquinar formas muy complejas en un solo arreglo; *(b)* pueden emplear herramientas de corte más cortas (reduciendo así la tendencia a la vibración), y *(c)* permiten taladrar orificios a varios ángulos compuestos.



FIGURA 24.10 Fresas frontales de punta esférica. Estos cortadores tienen la capacidad de producir contornos elaborados y con frecuencia se utilizan en el maquinado de matrices y moldes. (Ver también fig. 24.2d). *Fuente*: Cortesía de Dijet, Inc.

24.2.4 Otras operaciones de fresado y cortadores de fresado

Se utilizan muchas otras operaciones y cortadores de fresado para maquinar piezas de trabajo. En el **fresado combinado de fresas paralelas,** se montan dos o más cortadores en un eje para maquinar dos superficies paralelas en la pieza (fig. 24.11a). El **fresado de forma** produce perfiles curvados empleando cortadores que tienen dientes muy afilados (fig. 24.11b). Dichos cortadores también sirven para cortar dientes de engranes, como se describe en la sección 24.7. Las operaciones de **acanalado** y **cortado** se realizan usando *cortadores circulares*, como se muestra en la figura 24.11c y d, respectivamente. Los dientes se pueden alternar en forma ligera, como los de una hoja de sierra (sección 24.5), para proveer espacio al cortador cuando produce ranuras profundas. Las *sierras de cortado* son relativamente delgadas, por lo general menores a 5 mm $\left(\frac{3}{16}\right.$ de pulgada$\left.\right)$. Los *cortadores de ranura T* se utilizan para fresar ranuras T, como las que se encuentran en las mesas de trabajo de máquinas herramienta para sujetar piezas de trabajo. Como se muestra en la figura 24.12a, primero se fresa una ranura con una fresa frontal; después el cortador maquina en un pase el perfil completo de la ranura T.

Los *cortadores de ranura para chaveta* se utilizan en la elaboración de ranuras de chavetas semicilíndricas (Woodruff) para ejes. Los *cortadores de fresado angular* (ángulo simple o doble ángulo) se emplean para producir superficies cónicas con varios ángulos. Las *fresas huecas* (fig. 24.12b) son huecas y se montan en un eje; esto permite utilizar el mismo eje para cortadores de diferentes tamaños. El uso de fresas huecas es similar al de fresas frontales. El fresado con un solo diente de corte montado en un husillo de alta velocidad se conoce como *fresado de un solo filo*; por lo general, sirve en operaciones de fresado de careado y mandrinado. A esta herramienta se le puede dar forma como una herramienta de corte de una sola punta y puede colocarse en varias posiciones radiales en el husillo, en un arreglo similar al mostrado en la figura 23.23b.

24.2.5 Portaherramientas

Los cortadores de fresado se clasifican en cortadores de árbol o cortadores tipo zanco. Los **cortadores de árbol** se montan en un *árbol* (ver figs. 24.11 y 24.15a) para operaciones como fresado periférico, de careado, combinado de fresas paralelas y de forma. En los **cortadores tipo zanco,** el cortador y el zanco se hacen de una pieza; las fresas frontales son

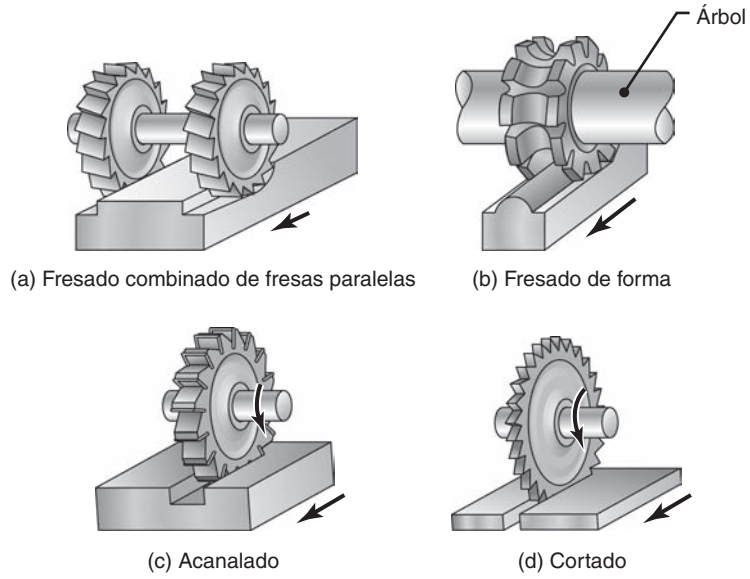


FIGURA 24.11 Cortadores para *(a)* fresado combinado de fresas paralelas; *(b)* fresado de forma; *(c)* acanalado, y *(d)* cortado con un cortador de fresado.

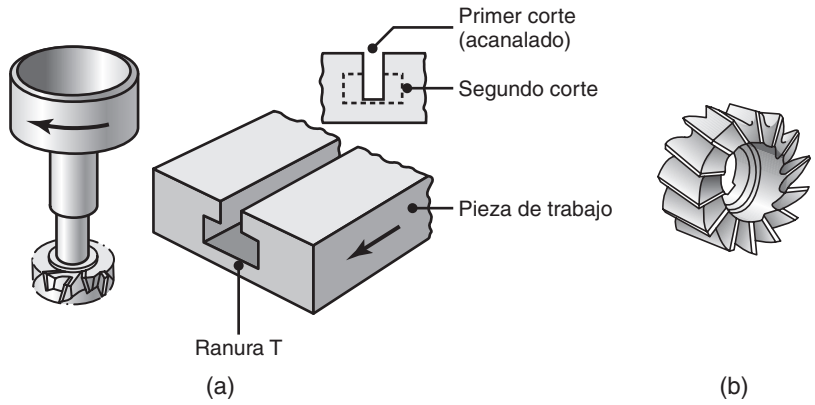


FIGURA 24.12 *(a)* Corte de ranura T con un cortador de fresado. *(b)* Fresa hueca.

los ejemplos más comunes. Las fresas frontales pequeñas poseen zancos rectos, pero las más grandes tienen zancos cónicos para montarlas mejor en el husillo de la máquina, a fin de resistir las fuerzas y torque más altos comprendidos en el corte. Los cortadores con zancos rectos se montan en boquillas de pinzas o en sujetadores especiales de fresas frontales; los que tienen zancos cónicos se montan en portaherramientas cónicos.

Además de los tipos mecánicos, también existen portaherramientas y ejes hidráulicos. La rigidez de los cortadores y portaherramientas es importante para proporcionar calidad a la superficie y reducir la vibración y el traqueteo durante las operaciones de fresado.

24.2.6 Capacidades del proceso de fresado

Además de las diversas características de los procesos de fresado descritas hasta ahora, sus capacidades incluyen parámetros como acabado superficial, tolerancias dimensionales, capacidad de producción y consideraciones de costos. En las tablas 23.1 y 23.8, las figuras 23.13 y 23.14 y el capítulo 40, se presenta información sobre las capacidades del proceso.

En la tabla 24.2 se presentan los intervalos convencionales de velocidades y avances de corte para el fresado. Dependiendo del material de la pieza de trabajo y sus condiciones, el material de la herramienta de corte y los parámetros del proceso, las velocidades de corte varían ampliamente, desde 30 hasta 3000 m/min (90 a 10,000 pies/min). Por lo general, el avance por diente va de alrededor de 0.1 mm (0.004 pulgada) a 0.5 mm (0.02 pulgada) y las profundidades de corte van de 1 mm a 8 mm (0.04 a 0.30 pulgada). Para recomendaciones sobre el fluido de corte, ver la tabla 23.5.

En la tabla 24.3 se proporciona una **guía general de resolución de problemas**; en las figuras 24.13 y 24.14 se ilustran los últimos cuatro casos de dicha tabla. El *contragolpeteo* comprende marcas de avance doble producidas por el extremo posterior del cortador. En la tabla 24.3 se observa que algunas recomendaciones (como el cambio de parámetros de fresado o de herramientas de corte) son más fáciles de seguir que otras (como los cambios de ángulos de las herramientas y la geometría del cortador, además de la rigidez de los husillos y los dispositivos de sujeción del trabajo).

24.2.7 Lineamientos de diseño y operación para fresado

En general, los lineamientos para torneado y mandrinado provistos en las secciones 23.3.6 y 23.4 también se aplican a las operaciones de fresado. Algunos factores adicionales relativos a dichas operaciones son los siguientes:

- Hasta donde sea posible, deben utilizarse cortadores de fresado estándares, dependiendo de las características de diseño de las partes. Tienen que evitarse cortadores especiales costosos.
- Deben especificarse chaflanes o biseles en vez de radios; si se especifican radios, será difícil hacer que coincidan diversas superficies de intersección.

- Deben evitarse las cavidades y bolsas internas con esquinas puntiagudas, dada la dificultad para fresarlas, ya que los dientes o insertos de corte tienen un radio de filo finito. Cuando sea posible, el radio de la esquina debe coincidir con la geometría del cortador de fresado.
- Las piezas de trabajo deben ser suficientemente rígidas para minimizar las deflexiones que pudieran producir las fuerzas de sujeción y corte.

Los lineamientos para evitar la vibración y el traqueteo en el fresado son similares a los del torneado. Además, deben considerarse las siguientes prácticas:

- Los cortadores deben montarse tan cerca como sea posible de la base del husillo, para reducir las deflexiones de las herramientas.
- Los portaherramientas y dispositivos de fijación deben ser tan rígidos como sea posible.
- En casos de vibración y traqueteo, deben modificarse las condiciones de forma y proceso de la herramienta y utilizarse cortadores con menos dientes de corte o con espaciado aleatorio de dientes.

TABLA 24.2

Recomendaciones generales para operaciones de fresado

Material	Herramienta de corte	Condiciones iniciales de propósito general		Variedad de condiciones	
		Avance mm/diente (pulgadas /diente)	Velocidad m/min (pies/min)	Avance mm/diente (pulgadas /diente)	Velocidad m/min (pies/min)
Aceros de bajo carbono y de maquinado libre	Carburo sin recubrimiento, carburo recubierto, cermets	0.13–0.20 (0.005–0.008)	120–180 (400–600)	0.085–0.38 (0.003–0.015)	90–425 (300–1400)
Aceros aleados					
Blandos	Cermets sin recubrimiento, recubiertos	0.10–0.18 (0.004–0.007)	90–170 (300–550)	0.08–0.30 (0.003–0.012)	60–370 (200–1200)
Duros	Cermets, PcBN	0.10–0.15 (0.004–0.006)	180–210 (600–700)	0.08–0.25 (0.003–0.010)	75–460 (250–1500)
Hierro fundido, gris					
Blando	Cermets sin recubrimiento, recubiertos, SiN	0.10–10.20 (0.004–0.008)	120–760 (400–2500)	0.08–0.38 (0.003–0.015)	90–1370 (300–4500)
Duro	Cermets, SiN, PcBN	0.10–0.20 (0.004–0.008)	120–210 (400–700)	0.08–0.38 (0.003–0.015)	90–460 (300–1500)
Acero inoxidable, Austenítico	Cermets sin recubrimiento, recubiertos	0.13–0.18 (0.005–0.007)	120–370 (400–1200)	0.08–0.38 (0.003–0.015)	90–500 (300–1800)
Aleaciones de alta temperatura Base níquel	Cermets sin recubrimiento, recubiertos, SiN, PcBN	0.10–0.18 (0.004–0.007)	30–370 (100–1200)	0.08–0.38 (0.003–0.015)	30–550 (90–1800)
Aleaciones de titanio	Cermets sin recubrimiento, recubiertos	0.13–0.15 (0.005–0.006)	50–60 (175–200)	0.08–0.38 (0.003–0.015)	40–140 (125–450)
Aleaciones de aluminio					
Maquinado libre	PCD sin recubrimiento, recubiertos	0.13–0.23 (0.005–0.009)	610–900 (2000–3000)	0.08–0.46 (0.003–0.018)	300–3000 (1000–10,000)
Alto silicio	PCD	0.13 (0.005)	610 (2000)	0.08–0.38 (0.003–0.015)	370–910 (1200–3000)
Aleaciones de cobre	PCD sin recubrimiento, recubiertos	0.13–0.23 (0.005–0.009)	300–760 (1000–2500)	0.08–0.46 (0.003–0.018)	90–1070 (300–3500)
Plásticos	PCD sin recubrimiento, recubiertos	0.13–0.23 (0.005–0.009)	270–460 (900–1500)	0.08–0.46 (0.003–0.018)	90–1370 (300–4500)

Fuente: Con base en datos de Kennametal, Inc.
Nota: Las profundidades de corte, *d*, van generalmente de 1 a 8 mm (0.04 a 0.3 pulgadas). PcBN: Nitruro de boro cúbico policristalino. PCD: Diamante policristalino. Ver también la tabla 23.4 para intervalos de velocidades de corte dentro de los grupos de materiales para herramientas.

TABLA 24.3

Guía general de resolución de problemas para operaciones de fresado

Problema	Causas probables
Ruptura de la herramienta	El material de la herramienta carece de tenacidad, ángulos inapropiados de la herramienta, parámetros de maquinado demasiado elevados.
Desgaste excesivo de la herramienta	Parámetros de maquinado demasiado elevados, material inadecuado de la herramienta, ángulos inapropiados de la herramienta, fluido de corte inadecuado.
Acabado rugoso de la superficie	Avance por diente demasiado alto, muy pocos dientes en el cortador, herramienta astillada o desgastada, acumulación del borde, vibración y traqueteo.
Tolerancias demasiado amplias	Falta de rigidez del husillo y sujeción del trabajo, aumento excesivo de temperatura, herramienta desafilada, virutas congestionando el cortador.
Superficie bruñida de la pieza de trabajo	Herramienta desafilada, profundidad de corte demasiado baja, ángulo de alivio radial muy pequeño.
Contragolpeteo	Herramientas de corte desafiladas, inclinación en husillo del cortador, ángulos negativos de la herramienta.
Marcas de traqueteo	Rigidez insuficiente en el sistema; vibraciones externas; avance, profundidad de corte y anchura de corte demasiado grandes.
Formación de rebabas	Filos de corte desafilados o demasiado honeados, ángulo incorrecto de entrada o salida, avance y profundidad de corte demasiado altos, forma incorrecta del inserto.
Ruptura	Ángulo de avance demasiado bajo, geometría incorrecta del filo de corte, ángulo incorrecto de entrada o salida, avance y profundidad de corte demasiado altos.

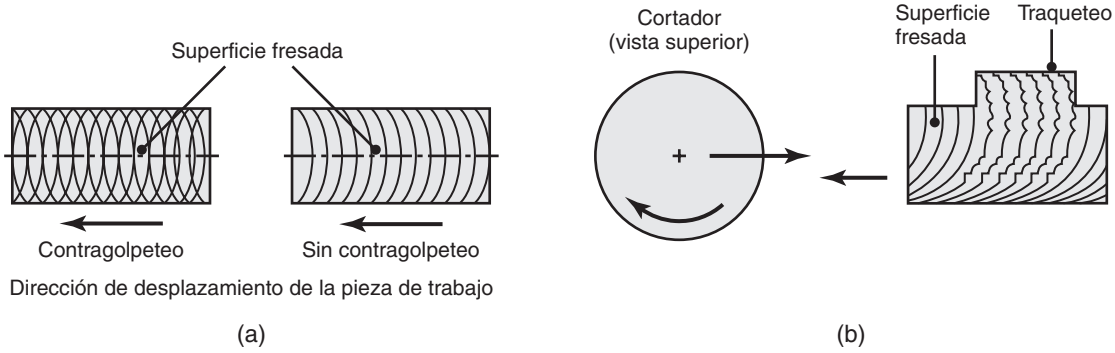


FIGURA 24.13 Características de superficie maquinada en el fresado de careado. Ver también figura 24.6.

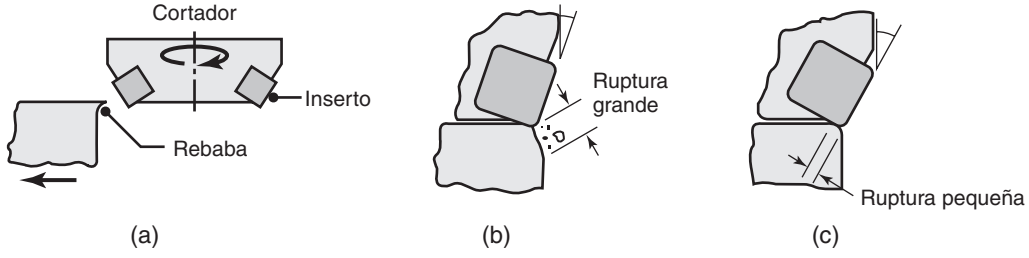


FIGURA 24.14 Defectos de los filos en el fresado de careado: *(a)* formación de rebabas a lo largo del filo de la pieza de trabajo; *(b)* ruptura a lo largo del filo de la pieza de trabajo, y *(c)* forma en que se puede evitar aumentando el ángulo de avance (ver también última fila en la tabla 24.3).

24.2.8 Fresadoras

Dado que tienen la capacidad de realizar varias operaciones de corte, las fresadoras se encuentran entre las máquinas herramienta más versátiles y útiles. La primera fue construida en 1820 por Eli Whitney (1765-1825). En la actualidad existe una gran selección de fresadoras con diversos usos. A continuación se describen las características de las fresadoras estándar. Sin embargo, muchas de estas máquinas y operaciones están siendo reemplazadas con *controles por computadora* y *centros de maquinado*.

Máquinas tipo columna y codo. Utilizadas para operaciones de fresado de propósito general, las *máquinas tipo columna y codo* son las fresadoras más comunes. El husillo en el que se monta el cortador de fresado puede ser *horizontal* (fig. 24.15a), para fresado periférico, o *vertical*, para operaciones de fresado de careado y frontal, mandrinado y taladrado (fig. 24.15b). Los componentes básicos de estas máquinas son:

- *Mesa de trabajo*: en la que se sujeta la pieza de trabajo utilizando ranuras T. La mesa se mueve longitudinalmente en relación con las fresas paralelas.
- *Carro*: soporta la mesa y puede moverse en dirección transversal.
- *Codo*: soporta el carro y da movimiento vertical a la mesa, de manera que la profundidad de corte puede ajustarse y es posible acomodar piezas de trabajo con diversas alturas.
- *Brazo superior*: se utiliza en máquinas horizontales; es ajustable para acomodar diferentes longitudes de eje.
- *Cabezal*: contiene el husillo y el sujetador del cortador. En máquinas verticales, la cabeza puede fijarse o ajustarse verticalmente y girarse en un plano vertical sobre la columna para cortar superficies cónicas.

Las *fresadoras simples* tienen tres ejes de movimiento, que por lo general se mueven manual o mecánicamente. En las *fresadoras tipo columna y codo universales*, la mesa puede girar en el plano horizontal. De esta manera se pueden maquinar formas complejas (como canales helicoidales a diversos ángulos) para producir partes como engranes, brocas, machuelos y cortadores.

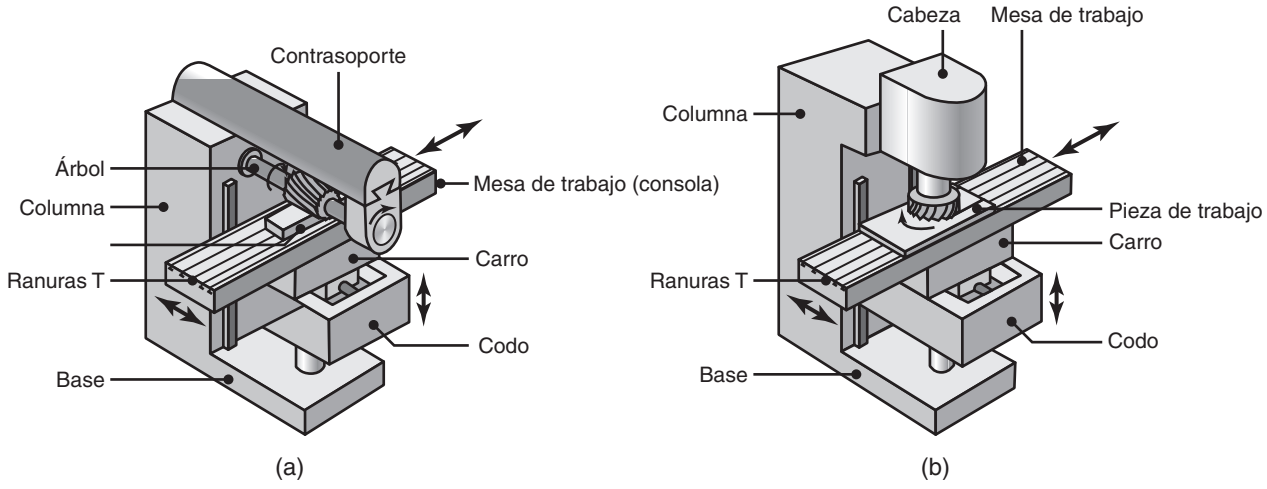


FIGURA 24.15 Esquema de *(a)* fresadora tipo columna y codo de husillo horizontal, y *(b)* fresadora tipo columna y codo de husillo vertical. *Fuente*: G. Boothroyd.

Fresadoras tipo bancada. En las *máquinas tipo bancada*, la mesa de trabajo se monta directamente en la bancada, que reemplaza al codo y puede moverse sólo en forma longitudinal (fig. 24.16). Estas máquinas no son tan versátiles como otros tipos, pero tienen alta rigidez y por lo general se utilizan para trabajo de alta producción. Los husillos pueden ser horizontales o verticales y tipo dúplex o triples (con dos o tres husillos), para maquinado simultáneo de dos o tres superficies de una pieza de trabajo.

Otros tipos de fresadoras. Existen muchos otros tipos de fresadoras (ver también *centros de maquinado*, sección 25.2). Las *fresadoras tipo cepilladora*, que son similares a las máquinas tipo bancada, están equipadas con diversas cabezas y cortadores para fresar diferentes superficies. Se utilizan en piezas de trabajo pesadas y son más eficaces que las cepilladoras (sección 24.3) cuando se usan con propósitos semejantes. Las *máquinas de mesa giratoria* son similares a las fresadoras verticales y están equipadas con una o más cabezas para operaciones de fresado de careado.

Las máquinas de fresado están siendo reemplazadas con rapidez por *máquinas de control numérico por computadora* (CNC), que son versátiles y tienen la capacidad de fresar, taladrar, mandrinar y machuelear con precisión repetitiva (fig. 24.17). También existen *fresadoras de perfiles*, que cuentan con cinco ejes de movimiento (fig. 24.18); obsérvese los tres movimientos lineales y los dos movimientos angulares de los componentes de la máquina.

Dispositivos y accesorios de sujeción del trabajo. La pieza de trabajo a fresar debe sujetarse con seguridad a la mesa de trabajo para resistir las fuerzas de corte y evitar su deslizamiento durante el fresado. Con este propósito se utilizan diversos montajes y tornillos de banco. (Ver también la sección 37.8 de *fijación flexible*.) Se montan y sujetan a la mesa mediante las ranuras T mostradas en la figura 24.15a y b. Los tornillos de banco se emplean para trabajo de pequeña producción en partes pequeñas. Los montajes se usan para trabajo de mayor producción y se pueden automatizar por medios mecánicos e hidráulicos.

Los *accesorios* para fresadoras incluyen diversos soportes y accesorios para el cabezal de la máquina (así como para la mesa de trabajo) diseñados con el propósito de adaptarlos a diferentes operaciones de fresado. Por lo general, el accesorio más común en los talleres ha sido el *cabezal divisor (de índice) universal*. De accionamiento manual, este aditamento gira (indexa) la pieza de trabajo a ángulos especificados entre los pasos individuales de maquinado. Por lo común se ha utilizado para fresar partes con superficies poligonales y para maquinar dientes de engranes. En la actualidad, los cabezales

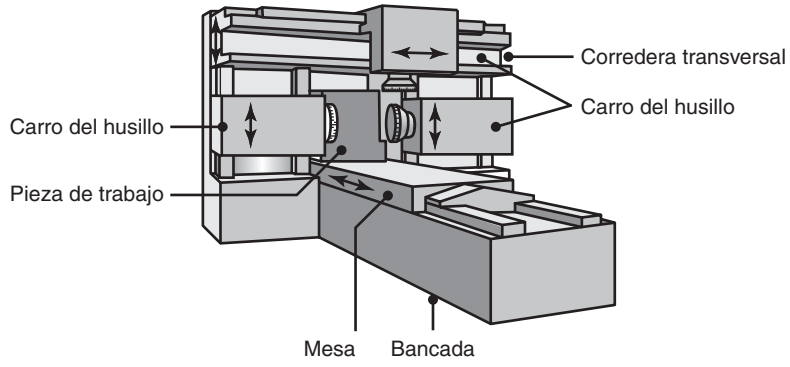


FIGURA 24.16 Esquema de una fresadora tipo bancada.

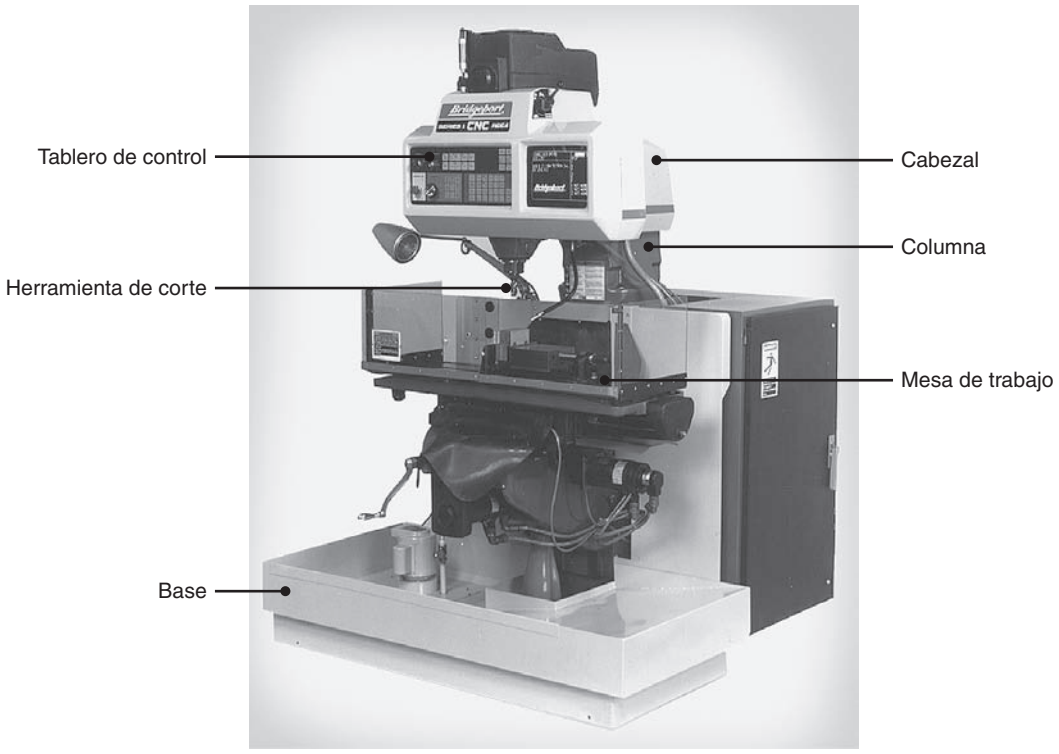


FIGURA 24.17 Fresadora de husillo vertical de control numérico por computadora (CNC). Ésta es una de las máquinas herramienta más versátiles. La fresadora de husillo vertical original utilizada en talleres de trabajo se sigue conociendo como "Bridgeport", en honor de su fabricante en Bridgeport, Connecticut. *Fuente*: Cortesía de Bridgeport Machines Division, Textron Inc.

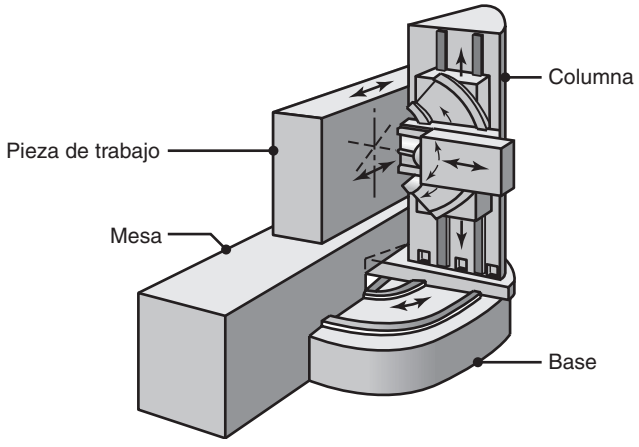


FIGURA 24.18 Esquema de una fresadora de perfiles de cinco ejes. Obsérvese que existen tres movimientos lineales principales y dos angulares de los componentes de la máquina.

divisores sólo se usan para pequeñas cantidades en talleres de trabajo; han sido reemplazados por los controles CNC y los centros de maquinado.

24.3 Cepillado

Cepillado de mesa móvil. Ésta es una operación de maquinado relativamente simple mediante la cual se producen superficies planas, así como secciones transversales con canales y muescas, a lo largo de la pieza de trabajo (fig. 24.19). Por lo general, el cepillado se realiza en piezas tan grandes como 25 m × 15 m (75 pies × 40 pies), aunque es más común una longitud de 10 m. En una **cepilladora**, la pieza se monta sobre una mesa que se desplaza hacia delante y hacia atrás a lo largo de una trayectoria recta. Una corredera transversal horizontal, equipada con uno o más cabezales de herramientas, se puede mover de modo vertical a lo largo de las guías de la columna. Las herramientas de corte se montan en los cabezales y el maquinado se efectúa en trayectoria recta. Para evitar que los filos de corte de la herramienta se astillen al rozarlos con la pieza de trabajo durante la carrera de retorno, las herramientas se inclinan o elevan mecánica o hidráulicamente.

Debido al movimiento alternativo de la pieza de trabajo, es importante el tiempo que transcurre sin corte durante la carrera de retorno. Por consiguiente, estas operaciones no son eficaces ni económicas (excepto por la producción en bajas cantidades, que suele ser el caso para piezas grandes y largas). La eficacia de la operación puede mejorarse equipando las cepilladoras con portaherramientas y herramientas que corten en ambas direcciones de avance de la mesa. Además, dada la longitud de la pieza de trabajo, es fundamental equipar las herramientas de corte con rompevirutas. De lo contrario, las virutas generadas pueden ser muy largas, lo que interfiere en la operación y constituye un riesgo de seguridad.

Las velocidades de corte en las cepilladoras pueden ser hasta de 120 m/min (400 pies/min) con capacidades de potencia hasta de 110 kW (150 hp). Las velocidades recomendadas para hierros fundidos y aceros inoxidables van de 3 a 6 m/min (10 a 20 pies/min) y hasta de 90 m/min (300 pies/min) para aleaciones de aluminio y magnesio. Por lo general, los avances son de 0.5 a 3 mm/carrera (0.02 a 0.125 pulgada/carrera). Los materiales más comunes de las herramientas son aceros de alta velocidad M2 y M3 y carburos K20 (C2) y P20 (C6).

Cepillado de mesa fija. El maquinado por *cepillado de mesa fija* es básicamente el mismo que el de mesa móvil, excepto que *(a)* la que se desplaza es la herramienta y no la pieza de trabajo, y *(b)* las piezas son más pequeñas, por lo general de menos de 1 m × 2 m (3 pies × 6 pies) de área superficial. En una **cepilladora de mesa fija horizontal**, la herramienta de corte se desplaza hacia delante y hacia atrás a lo largo de la trayectoria recta. La herramienta se sujeta al cabezal de la herramienta, que se monta en la corredera. Ésta tiene un movimiento alternativo. En la mayoría de las máquinas, el corte se efectúa durante

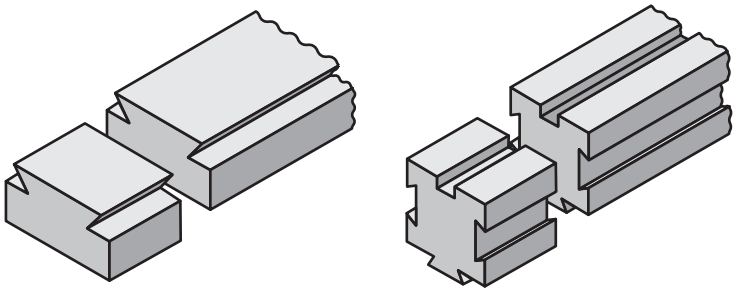


FIGURA 24.19 Partes comunes que se pueden fabricar en un cepillo.

el movimiento de avance de la corredera (*corte de empuje*); en otras, se realiza durante la carrera de retorno de la corredera (*corte de arrastre*). Las cepilladoras de mesa fija verticales (**ranuradoras**) se utilizan para maquinar muescas, ranuras de chavetas y matrices. Debido a las bajas capacidades de producción, en la actualidad sólo las cepilladoras de mesa fija para propósitos especiales (como las de engranes, sección 24.7.2) son de uso común.

24.4 Brochado y brochadoras

La operación de *brochado* es semejante al cepillado de mesa fija con un cortador largo de dientes múltiples y se utiliza para maquinar superficies internas y externas, como orificios de sección circular, cuadrada o irregular (fig. 24.20). En una **brocha** (fig. 24.21a), la profundidad total del material removido en una carrera es la suma de las profundidades de corte de cada diente de la brocha. Una brocha grande puede remover material hasta una profundidad de 38 mm (1.5 pulgadas) en una carrera. El brochado es un proceso de producción importante y puede fabricar partes con buen acabado superficial y precisión dimensional. Compite de manera favorable con otros procesos (como mandrinado, fresado, cepillado de mesa fija y rimado) para elaborar formas similares. Aunque las brochas pueden ser costosas, el costo se justifica con las líneas de producción de grandes cantidades.

Brochas. En la figura 24.21b se presenta la terminología de una brocha típica. El *ángulo de ataque* (gancho) depende del corte del material (como sucede en el torneado y otras operaciones de corte) y por lo general va de 0° a 20°. El *ángulo de holgura* es comúnmente de 1° a 4°; los dientes de acabado tienen ángulos más pequeños. Un ángulo de holgura demasiado pequeño hace que los dientes rocen con la superficie brochada. El *paso* de los dientes depende de factores como la longitud de la pieza de trabajo (longitud de corte), la resistencia de los dientes y el tamaño y la forma de las virutas.

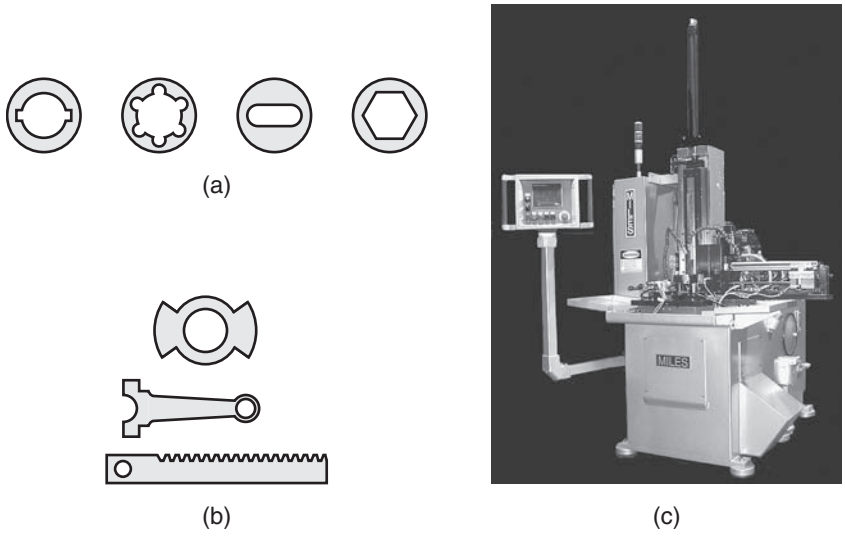


FIGURA 24.20 *(a)* Partes comunes producidas mediante brochado interno. *(b)* Partes fabricadas mediante brochado de la superficie. *(c)* Máquina de brochado vertical. *Fuente*: *(a)* y *(b)* Cortesía de General Broach and Engineering Company; *(c)* Cortesía de Ty Miles, Inc.



FIGURA 24.21 *(a)* Acción de corte de una brocha que muestra diversas características. *(b)* Terminología de una brocha.

La profundidad de los dientes y el paso deben ser suficientemente grandes para manejar las virutas generadas durante el brochado, en particular con piezas de trabajo grandes. Por lo menos dos dientes deben estar en contacto con la pieza en todo momento. La siguiente fórmula se puede utilizar a fin de obtener el paso para una brocha que corte una superficie de longitud l:

$$\text{Paso} = k\sqrt{l} \tag{24.6}$$

donde k es una constante, igual a 1.76 cuando l está en mm y a 0.35 cuando l está en pulgadas. Un paso promedio para brochas pequeñas va de 3.2 mm a 6.4 mm (0.125 a 0.25 pulgada) y para las grandes, de 12.7 mm a 25 mm (0.5 a 1 pulgada). La profundidad de corte por diente depende del material de la pieza de trabajo y del acabado superficial requerido. Por lo general, va de 0.025 mm a 0.075 mm (0.001 a 0.003 pulgada) para brochas de tamaño mediano, aunque pueden ser mayores a 0.25 mm (0.01 pulgada) para brochas más grandes.

Existen brochas con diversos perfiles de dientes, incluyendo algunas con *rompevirutas* (fig. 24.22). Entre las brochas de *superficie* figuran las *planas* (para corte de superficies planas), *de ranuras, de contorno, de cola de milano, de anillo* (para formas externas de precisión) y *de fresas paralelas*. Respecto de los tipos de brochas *internas*, las hay para *orificio* (para orificios de tolerancia cerrada, formas redondas y otras formas; fig. 24.23), *ranura de chaveta, engrane interno* y *estriado* (para cañones de armas). Por lo general, las formas irregulares internas se brochan iniciando con un orificio redondo, taladrado o mandrinado en la pieza de trabajo.

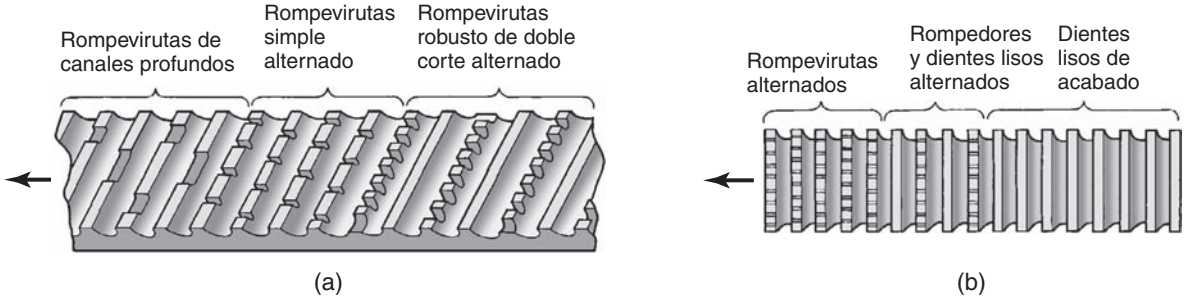


FIGURA 24.22 Características de rompevirutas en *(a)* brocha plana, y *(b)* brocha redonda.

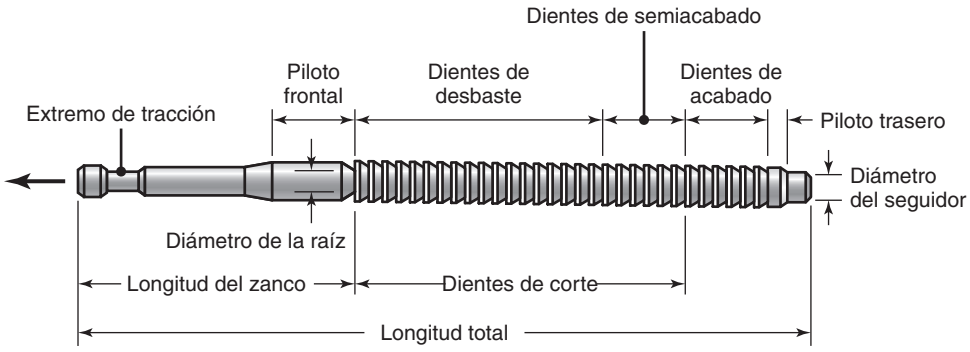


FIGURA 24.23 Terminología de una brocha interna tipo tracción utilizada para agrandar orificios largos.

Brochado rotativo. En general, este proceso se utiliza para brochar las superficies de apoyo de los cigüeñales y partes similares. El cigüeñal se rota entre centros y la brocha, que está equipada con múltiples insertos de carburo, pasa tangencialmente a través de las superficies de apoyo y remueve el material. El brochado rotativo es una combinación de *rasurado* y *pelado* (que retira una capa delgada de material con una herramienta de corte de forma especial); en él se emplean con éxito brochas rectas y circulares. Se han construido máquinas que brochan varios cigüeñales de manera simultánea.

Brochadoras. Las máquinas para brochar son relativamente simples en cuanto a construcción; sólo tienen movimientos lineales y, por lo general, son de accionamiento hidráulico, aunque algunas se mueven mediante manivela, tornillo o cremallera. Existen muchos estilos de máquinas de brochado y, en cuanto a tamaños, van desde máquinas para fabricar partes en forma de aguja hasta las utilizadas para brochar cañones de armas, incluyendo cañones estriados (canales internos en espiral). Las máquinas de brochado jalan o empujan las brochas y son horizontales o verticales. Por lo común, las *brochas de empuje* son más cortas, en la gama de 150 mm a 350 mm (6 a 14 pulgadas). Las *brochas de tracción* tienden a enderezar el orificio, en tanto que el empuje permite que la brocha siga cualquier irregularidad del orificio principal. Las máquinas horizontales tienen la capacidad de carreras más largas. La *fuerza* requerida para jalar o empujar la brocha depende de *(a)* la resistencia del material de la pieza de trabajo; *(b)* la profundidad y anchura total de corte; *(c)* la velocidad de corte; *(d)* el perfil de los dientes, y *(e)* el uso de fluidos de corte. Las capacidades de la fuerza de tracción de las brochas son tan altas como 0.9 MN (100 toneladas).

Parámetros del proceso. Las velocidades de corte del brochado van desde 1.5 m/min (5 pies/min) para aleaciones de alta resistencia, hasta 15 m/min (50 pies/min) para aleaciones de aluminio y magnesio. Los materiales más comunes de las brochas son los aceros de alta velocidad M2 y M7 e insertos de carburo. En la actualidad, la mayoría de las brochas se recubren con nitruro de titanio a fin de mejorar su vida útil y el acabado superficial. También se utilizan insertos de cerámica para operaciones de acabado en algunas aplicaciones. Se pueden hacer piezas en bruto de acero de alta velocidad más pequeñas para brochas con técnicas de metalurgia de polvos, a fin de mejorar el control de la calidad. Aunque se pueden indexar insertos de carburo o cerámica después de desgastarse, los dientes de las brochas de acero de alta velocidad deben reafilarse por rectificado, lo cual reduce el tamaño de la brocha. Son recomendables los fluidos de corte, en especial para brochado interno.

Consideraciones de diseño. En el brochado, como en otros procesos de maquinado, se necesita observar ciertos lineamientos para obtener una producción económica y de alta calidad. Los requisitos principales son los siguientes:

- Las partes deben diseñarse de manera que se puedan sujetar con seguridad en las brochadoras. Deben tener suficiente resistencia estructural y rigidez para soportar las fuerzas de corte durante el brochado.
- Deben evitarse los orificios ciegos, las esquinas puntiagudas, las estrías con cola de milano y las superficies planas grandes.
- Son preferibles los chaflanes a las esquinas redondas.

EJEMPLO 24.3 **Brochado de estrías internas**

La parte mostrada en la figura 24.24 está fabricada con hierro nodular (65-45-15; sección 12.3.2) y estrías internas, cada una de 50 mm (2 pulgadas) de largo. Las estrías tienen 19 dientes de evolvente de círculo con un paso diametral de 63.52 mm (2.5009 pulgadas). Se utilizó una brocha de acero de alta velocidad M2 con 63 dientes, longitud de 1.448 m (57 pulgadas) y un diámetro igual al del paso para producir las estrías. El corte por diente fue de 0.116 mm (0.00458 pulgada); la velocidad de producción, de 63 piezas por hora; y el número de partes por rectificado, de 400, con una vida total de la brocha de unas 6000 partes.

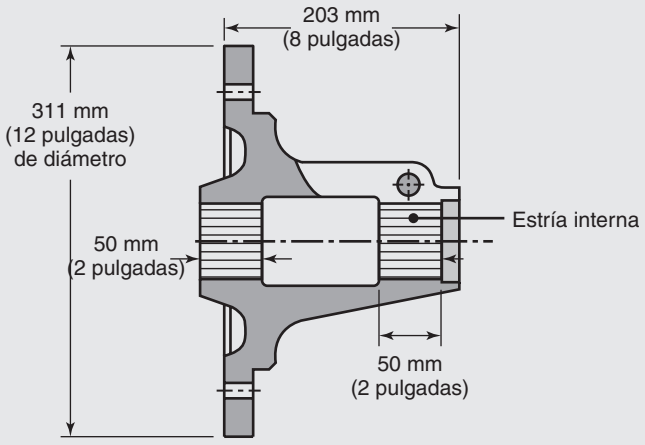


FIGURA 24.24 Ejemplo de parte con estrías internas producidas por brochado.

Fuente: ASM International.

24.5 Aserrado

El *aserrado* es una operación de corte común y antigua que se remonta al año 1000 a.C., en el que la herramienta de corte es una hoja de dientes pequeños (**sierra**). Cada diente remueve una pequeña cantidad de material con cada recorrido de la sierra. Este proceso se puede utilizar para todos los materiales metálicos y no metálicos y tiene la capacidad

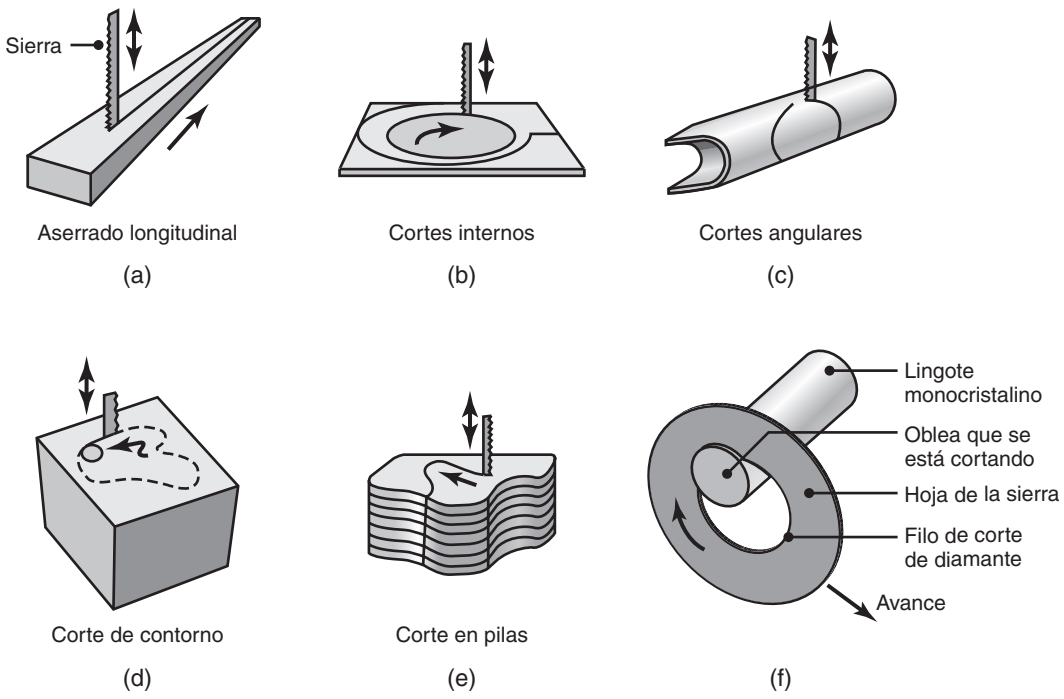


FIGURA 24.25 Ejemplos de diversas operaciones de aserrado.

de producir diversas formas (fig. 24.25). El aserrado es un proceso eficiente de remoción volumétrico y puede producir formas casi netas a partir de materias primas. La anchura de corte (**ranura**) en el aserrado suele ser angosta, por lo que el proceso desperdicia poco material.

En la figura 24.26 se muestran configuraciones comunes de dientes y cuchillas de sierras. Por lo común, el espaciado de los dientes es de 0.08 a 1.25 dientes por mm (2 a 32 por pulgada). Existe una gran variedad de tamaños, formas y espaciado de dientes, así como espesores y anchos de hojas. En general, las hojas de las sierras se fabrican con aceros de alto carbono y alta velocidad (M2 y M7). Para aserrar materiales más duros, se utilizan hojas de acero con dientes de acero de alta velocidad o de carburo (fig. 24.27).

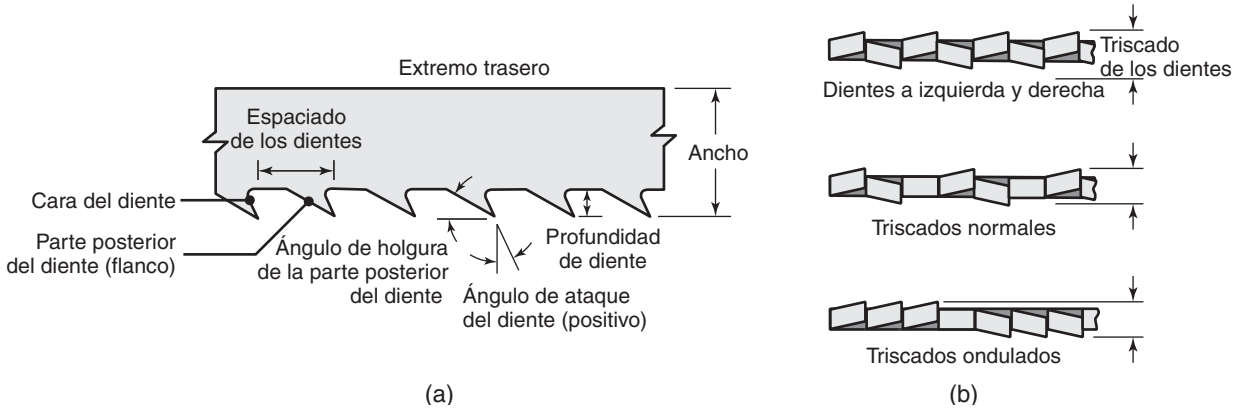


FIGURA 24.26 *(a)* Terminología de los dientes de una sierra. *(b)* Tipos de triscado de los dientes de una sierra, alternados para proporcionar una holgura a la hoja de la sierra con el fin de evitar que se atoren durante el aserrado.

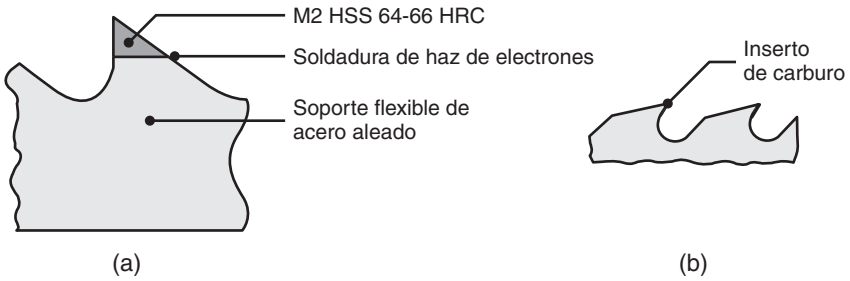


FIGURA 24.27 *(a)* Dientes de acero de alta velocidad soldados en una hoja de acero. *(b)* Insertos de carburo unidos por soldadura fuerte a los dientes de la hoja.

El **triscado de los dientes** en una sierra (fig. 24.26b) es importante, ya que proporciona una ranura suficientemente ancha para que la hoja se mueva en forma libre dentro la pieza de trabajo sin pegarse y sin excesiva resistencia a la fricción, reduciendo así el calor generado. Éste puede tener efectos adversos sobre el corte, en especial al cortar termoplásticos, que se ablandan con rapidez por el calor. El triscado de los dientes también permite que la hoja cuente con una trayectoria precisa, siguiendo el modelo a cortar sin desviarse. Por lo menos dos o tres dientes deben estar siempre en contacto con la pieza de trabajo para evitar que se *enganchen* (que el diente de la sierra se atore en la pieza). Ésta es la razón por la que puede ser difícil aserrar materiales delgados, en particular láminas metálicas. Cuanto más delgado sea el material, los dientes de la sierra deberán ser más finos y mayor su número por unidad de longitud de la sierra. Por lo general, se utilizan fluidos de corte para mejorar la calidad de corte y la vida útil de la sierra.

Tipos de sierras. Las *sierras de marco* o *arco* tienen hojas rectas (seguetas) y movimientos de vaivén o alternantes. Desarrolladas en la década de 1650, por lo general se utilizan para cortar barras, varillas y formas estructurales. Pueden operarse manual o mecánicamente. Debido a que el corte ocurre durante sólo una de las carreras, las sierras de marco no son tan eficientes como las sierras de banda (que se describen más adelante). Por lo general, las hojas de las *sierras de marco mecánicas* tienen de 1.2 mm a 2.5 mm (0.05 a 0.10 pulgada) de espesor y hasta 610 mm (24 pulgadas) de largo. La velocidad de los movimientos de vaivén va de 30 por minuto para aleaciones de alta resistencia a 180 por minuto para aceros al carbono. El bastidor de las sierras de marco mecánicas tiene un peso aumentado por diversos mecanismos, aplicando hasta 1.3 kN (300 libras) de fuerza a la pieza de trabajo para mejorar la capacidad de corte. Las hojas de las *sierras de marco manuales* son más delgadas y cortas que las de las sierras de arco mecánicas, que tienen hasta 1.2 dientes por mm (32 por pulgada) para aserrar láminas metálicas y tubería delgada.

Por lo general, las *sierras circulares* (también conocidas como *sierras en frío* cuando se corta metal) se utilizan para aserrado de alta capacidad de producción, proceso conocido como *seccionado o tronzado*. Las operaciones de seccionado también se pueden realizar con discos delgados abrasivos, como se describe en la sección 26.4. El aserrado en frío es muy común en la industria, sobre todo para cortar secciones transversales grandes. Existen sierras en frío con varios perfiles y tamaños de dientes y se pueden hacer avanzar en cualquier ángulo en la pieza de trabajo. En las máquinas modernas, el seccionado con sierras circulares produce superficies relativamente lisas con buen control del espesor y precisión dimensional, debido a la rigidez de las máquinas y de las sierras. La sierra de corte de diámetro interno mostrada en la figura 24.25f se utiliza ampliamente para cortar obleas de silicio monocristalino en dispositivos microelectrónicos (ver también la sección 28.4).

Las *sierras de banda* tienen hojas continuas, largas y flexibles y, por lo tanto, su acción de corte es continua. Las sierras de banda verticales se utilizan para *corte* recto y *de contorno* de láminas planas y otras partes soportadas en una mesa horizontal (fig. 24.25d). También existen sierras de banda controladas por computadora con la habilidad de seguir la trayectoria de corte en forma automática. Hay asimismo sierras de

banda mecánicas que, en comparación con las sierras de marco, tienen mayor productividad debido a la acción de corte continua. Con hojas de acero de alta velocidad, se alcanzan velocidades de corte hasta de 60 m/min (200 pies/min) para aserrar aleaciones de alta resistencia y hasta de 120 m/min (400 pies/min) para aceros al carbono.

Las hojas y el hilo de alta resistencia pueden *recubrirse* con polvo de diamante (**hojas con dientes de diamante** y **sierras de banda de diamante**) de manera que las partículas de diamante actúan como dientes de corte (corte abrasivo); también se utilizan partículas de carburos para este propósito. Estas hojas e hilo son apropiados para aserrar materiales duros metálicos, no metálicos y compósitos. Los diámetros de los hilos van de 13 mm (0.5 pulgada) para uso en corte de roca hasta 0.08 mm (0.003 pulgada) para corte de precisión. También se pueden aserrar materiales duros con discos delgados, abrasivos y con procesos de maquinado avanzado (capítulo 27).

Aserrado por fricción. El *aserrado por fricción* es un proceso en el que la hoja o el disco de acero dulce roza contra la pieza de trabajo a velocidades hasta de 7,600 m/min (25,000 pies/min). La energía por fricción se transforma en calor, que ablanda con rapidez una zona angosta en la pieza de trabajo. La acción de la hoja, que puede tener dientes o muescas para mejorar la eficiencia del corte, extrae y expulsa el metal ablandado de la zona de corte. El calor generado en la pieza produce una *zona afectada por el calor* (sección 30.9) en las superficies de corte. Por lo tanto, mediante este proceso se pueden afectar de manera adversa las propiedades de la pieza a lo largo de los extremos de corte. Dado que sólo una pequeña parte de la hoja entra en contacto permanente con la pieza de trabajo, la hoja se enfría con rapidez al pasar a través del aire. Este proceso de aserrado por fricción es apropiado para metales duros, ferrosos y plásticos reforzados, aunque no para metales no ferrosos, por su tendencia a adherirse a la hoja. Para cortar secciones grandes de acero se utilizan discos de aserrado por fricción, con diámetros hasta de 1.8 m (6 pies). El aserrado por fricción también se emplea comúnmente para remover rebabas de las fundiciones.

24.6 Limado

El *limado* comprende la remoción a pequeña escala de material de una superficie, esquina, borde u orificio, incluyendo la remoción de rebabas. Desarrolladas por primera vez hacia el año 1000 a.C., las limas suelen fabricarse con acero endurecido y existen varias secciones transversales planas, redondas, semicirculares, cuadradas y triangulares. Las limas pueden tener muchas formas de dientes y grados de rugosidad. Aunque por lo general el limado se realiza manualmente, existen máquinas de limado con características automáticas para altas capacidades de producción, en las que las limas realizan hasta 500 recorridos/min.

Las *limas de banda* constan de segmentos de lima, cada uno de casi 75 mm (3 pulgadas) de largo, que se remachan a una banda de acero flexible y se utilizan de manera similar a las sierras de banda. También existen limas tipo disco.

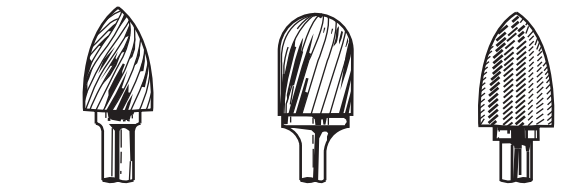


FIGURA 24.28 Tipos de matafilos utilizadas en operaciones de rebabeo.

Las **limas rotatorias** y los **matafilos** (fig. 24.28) se utilizan para aplicaciones como rebabeo, remoción de cascarilla de las superficies, producción de conos en partes y remoción de pequeñas cantidades de material en la fabricación de matrices. Por lo general, estos cortadores son cónicos, cilíndricos o esféricos y tienen diversos perfiles de dientes. Su acción de corte (similar a la de las rimas) remueve pequeñas cantidades de material a altas velocidades. La velocidad rotatoria de los matafilos va de 1500 rpm para cortar aceros, donde se usan matafilos grandes, hasta 45,000 rpm para magnesio, donde se emplean matafilos pequeños.

24.7 Manufactura de engranes mediante maquinado

En las partes II y III se describieron diversos procesos para fabricar engranes o dientes de engranes en varios componentes, por ejemplo, fundición, forjado, extrusión, estirado, laminación de roscas y metalurgia de polvos. También se puede utilizar el troquelado de láminas metálicas para hacer engranes delgados, como los usados en relojes mecánicos de pulsera, relojes de pared y mecanismos similares. Los engranes de plástico se pueden fabricar por procesos como moldeo por inyección y fundición.

Los engranes pueden ser tan pequeños como los utilizados en relojes, o de diámetros tan grandes como 9 m (30 pies), para hacer girar las superestructuras de las grúas móviles. La precisión dimensional y el acabado superficial requerido para los dientes de los engranes dependen del uso al que se destinan. Una calidad deficiente de los dientes de los engranes contribuye a una transmisión deficiente de energía y al aumento de la vibración y el ruido, por lo que afecta de manera adversa las características de fricción y desgaste. Por ejemplo, los engranes de los submarinos deben ser de una calidad extremadamente alta, a fin de reducir los niveles de ruido y evitar así que sean detectados.

En la figura 24.29 se muestra la nomenclatura estándar para un engrane recto de evolvente. Iniciando con una pieza en bruto para engranes forjada o fundida, existen dos métodos básicos de fabricación de dichos dientes: *corte de forma* y *generación*.

24.7.1 Corte de forma

En el *corte de forma*, la herramienta de corte es similar a un cortador de fresado de forma producido con la forma del espacio entre los dientes del engrane (fig. 24.30a). La forma de

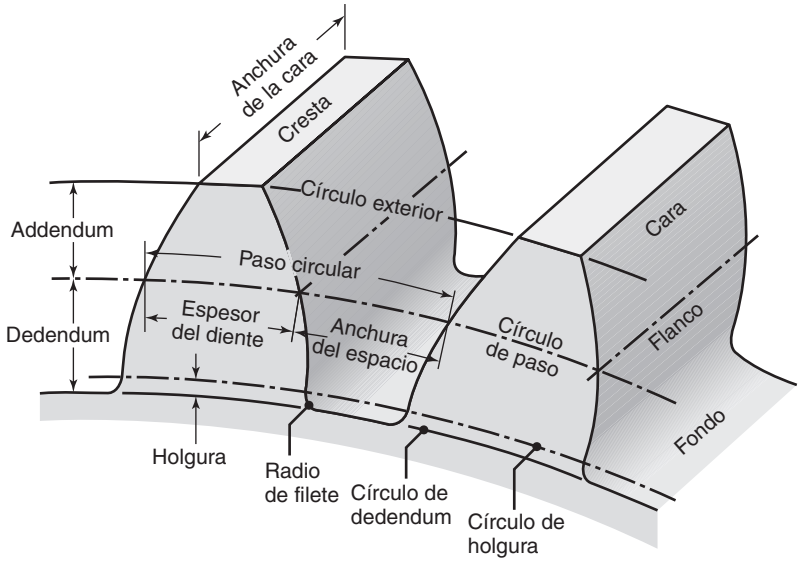


FIGURA 24.29 Nomenclatura de un engrane recto de evolvente.

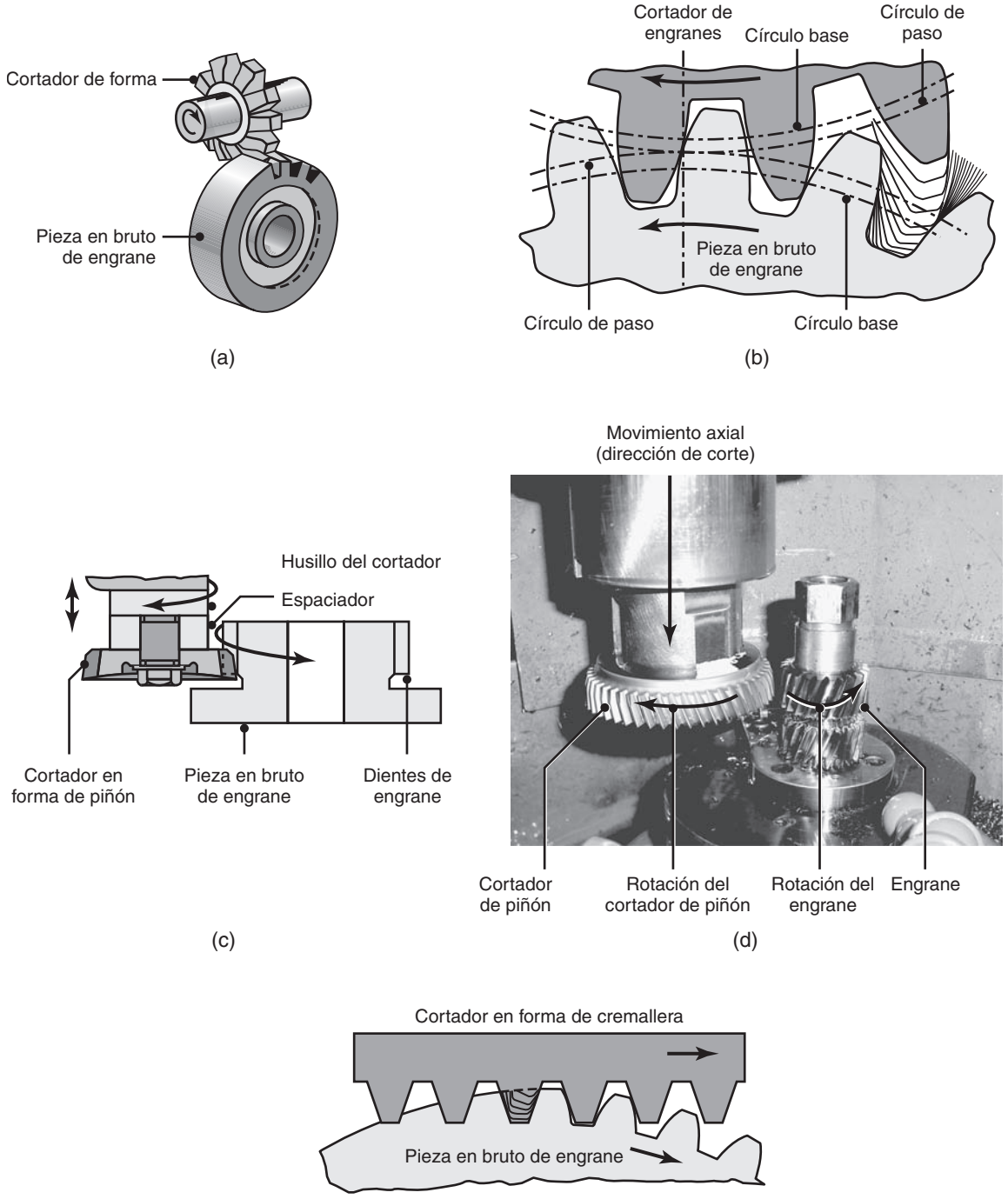


FIGURA 24.30 *(a)* Producción de dientes de engrane en una pieza en bruto por corte de forma. *(b)* Esquema de engrane que se genera con un cortador de engranes en forma de piñón. *(c)* y *(d)* Engrane que se genera en una cepilladora de engranes utilizando un cortador en forma de piñón. Obsérvese que el cortador se mueve alternativamente en la dirección vertical. *(e)* Engrane que se genera con cortador en forma de cremallera. *Fuente*: *(d)* Cortesía de Schafer Gear Works, Inc.

los dientes de los engranes se reproduce maquinando la pieza en bruto del engrane alrededor de su periferia. El cortador avanza axialmente a lo largo del diente del engrane y hasta la profundidad apropiada, a fin de producir el perfil de los dientes del engrane. Después de cortar cada uno, el cortador se retira, la pieza en bruto del engrane se gira (*indexa*) y el cortador procede a cortar otro diente. Este proceso continúa hasta que se maquinan todos los dientes.

Cada cortador está diseñado para cortar cierto número de dientes. La precisión del perfil de los dientes producidos por corte de forma depende de la precisión del cortador y de la máquina y su rigidez. Aunque ineficiente, el corte de forma se puede realizar en fresadoras con el cortador montado en un árbol y la pieza en bruto del engrane montada en un cabezal divisor. Dado que el cortador tiene una geometría fija, el corte de forma sólo se puede utilizar para producir dientes de engranes que tengan una anchura constante; es decir, en engranes rectos o helicoidales, pero no en engranes cónicos. Los engranes internos y los dientes de engranes en superficies rectas (como en una cremallera y piñón) se elaboran por corte de forma con un cortador de forma usando una máquina similar a un cepillado. El cortado de forma es un proceso relativamente simple y puede emplearse para cortar dientes de engranes con varios perfiles. Por otro lado, es una operación lenta; además, algunos tipos de máquinas requieren mano de obra experta. Es posible utilizar máquinas con características semiautomáticas de manera económica para el corte de forma, en producciones limitadas. Sin embargo, por lo general, el corte de forma es adecuado sólo para producción de bajas cantidades.

También puede utilizarse el *brochado* para maquinar dientes de engranes y es particularmente apropiado para fabricar dientes internos. El proceso de brochado es rápido y produce un terminado fino de la superficie con alta precisión dimensional. Sin embargo, dado que cada tamaño de engrane requiere una brocha diferente (y las brochas son costosas), este método es apropiado casi en exclusiva para la producción en grandes cantidades.

Los dientes de engranes también pueden cortarse en máquinas especiales con una herramienta de corte de una sola punta, guiada por una *plantilla* con la forma del perfil del diente. Como la plantilla puede ser mucho más grande que el diente del engrane, se mejora la precisión dimensional.

24.7.2 Generación de engranes

La herramienta de corte utilizada en la *generación de engranes* puede ser una de las siguientes: *(a)* cortador en forma de piñón; *(b)* cortador recto en forma de cremallera, y *(c)* fresa madre.

- Un **cortador en forma de piñón** puede considerarse uno de los dos engranes de un par conjugado, y el otro, la pieza en bruto del engrane (fig. 24.30b). Este tipo de cortador se utiliza en *cepilladoras de engranes* (fig. 24.30c y d). Tiene un eje paralelo al de la pieza en bruto del engrane y gira lentamente con dicha pieza, a la misma velocidad que el círculo de paso y en un movimiento alternativo axial. Un tren de engranes proporciona el movimiento relativo requerido entre el eje del cortador y el eje de la pieza en bruto del engrane. El corte puede ocurrir en la carrera hacia arriba o hacia abajo de la máquina. Debido a que la holgura necesaria para el recorrido del cortador es pequeña, el cepillado de mesa fija resulta adecuado para engranes que se localizan cerca de superficies de obstrucción, como un reborde en la pieza en bruto del engrane en la figura 24.30c y d. El proceso se puede usar para producir bajas y altas cantidades.
- En un **cortador de cremallera**, la herramienta generadora es un *segmento* de una cremallera (fig. 24.30e), que realiza movimientos alternativos paralelos al eje de la pieza en bruto del engrane. Dado que no es práctico tener más de seis a 12 dientes en un cortador de cremallera, el cortador debe separarse a intervalos adecuados y regresar al punto de inicio. La pieza en bruto del engrane permanece fija durante la operación.

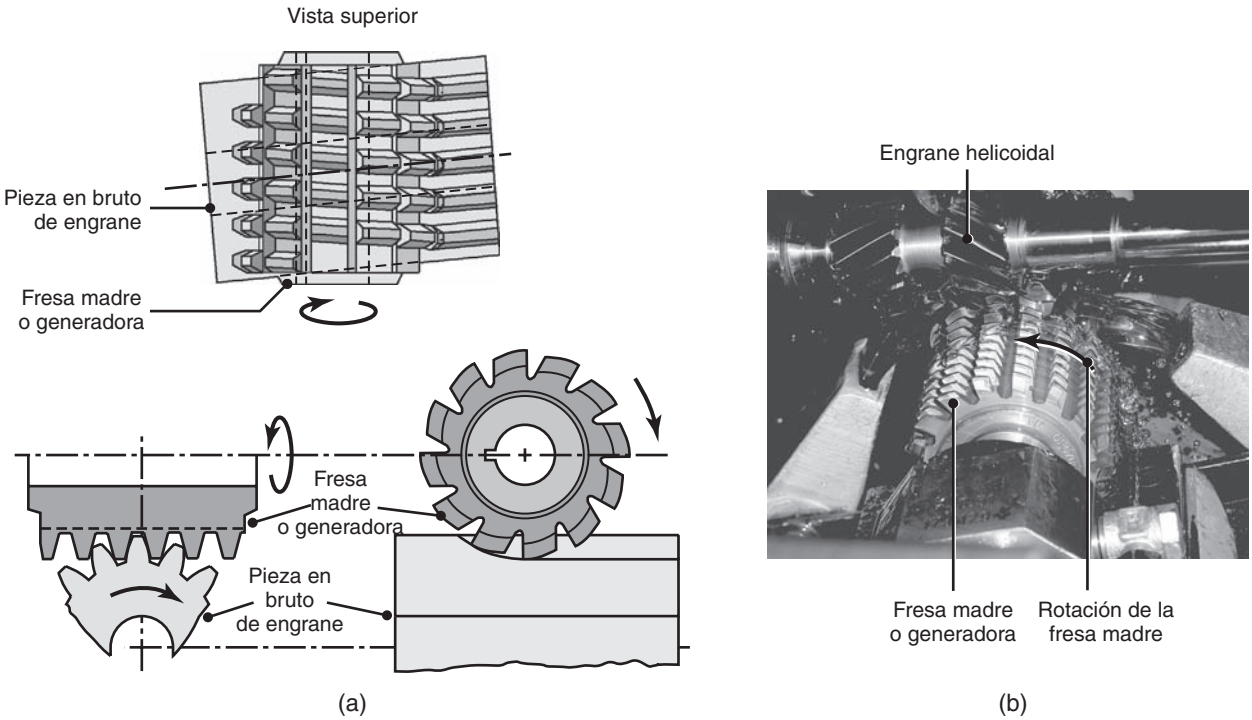


FIGURA 24.31 *(a)* Esquema de corte de engranes con una fresa madre o generadora. *(b)* Producción de engranes sinfín con una fresa madre o generadora. *Fuente*: Cortesía de Schafer Gear Works, Inc.

- Una **fresa madre** (fig. 24.31) es básicamente un sinfín o tornillo de corte de engranes convertido en herramienta de generación de engranes mediante una serie de ranuras o hendiduras longitudinales maquinadas en él para formar los dientes de corte. Al utilizar la fresa madre para un engrane recto, el ángulo entre la fresa madre y los ejes de la pieza en bruto del engrane es 90° menos el ángulo de avance en las roscas de la fresa madre. Todos los movimientos en la generación de engranes son rotatorios y la fresa madre y la pieza en bruto del engrane giran de manera continua, muy similar a dos engranes engranados, hasta que se cortan todos los dientes.

Las fresas madre tienen una, dos o tres roscas. Por ejemplo, si la fresa madre posee una sola rosca y el engrane va a tener 40 dientes, la fresa madre y el husillo del engrane deben engranarse uno con otro de manera que la fresa madre haga 40 revoluciones, en tanto que la pieza en bruto del engrane hace una revolución. De modo similar, si se utiliza una fresa madre de doble rosca, haría 20 revoluciones contra una revolución de la pieza en bruto del engrane. Además, la fresa madre debe hacerse avanzar de forma paralela al eje del engrane por una distancia mayor a la anchura de la del diente del engrane (fig. 24.29), a fin de producir dientes rectos en engranes rectos. Las mismas fresas madre y máquinas se pueden usar para cortar engranes helicoidales inclinando el eje del husillo de la fresa madre.

Debido a que produce varios engranes a altas velocidades y con buena precisión dimensional, la generación de engranes se utiliza ampliamente en la industria. Aunque el proceso también es adecuado para la producción de bajas cantidades, resulta más económico para fabricar medias y altas cantidades. Las máquinas de generación de engranes también pueden producir engranes cónicos en espiral e hipoideos. Como la mayoría de las demás máquinas herramienta, las modernas máquinas de generación de engranes se controlan mediante computadora. Las *máquinas multiejes de control computarizado* son capaces de generar muchos tipos y formas de engranes por medio de cortadores de fresado indexable.

24.7.3 Corte de engranes cónicos

Los engranes cónicos rectos se desbastan en un corte con un cortador de forma en máquinas que se indexan de manera automática. Después se termina el engrane dándole la

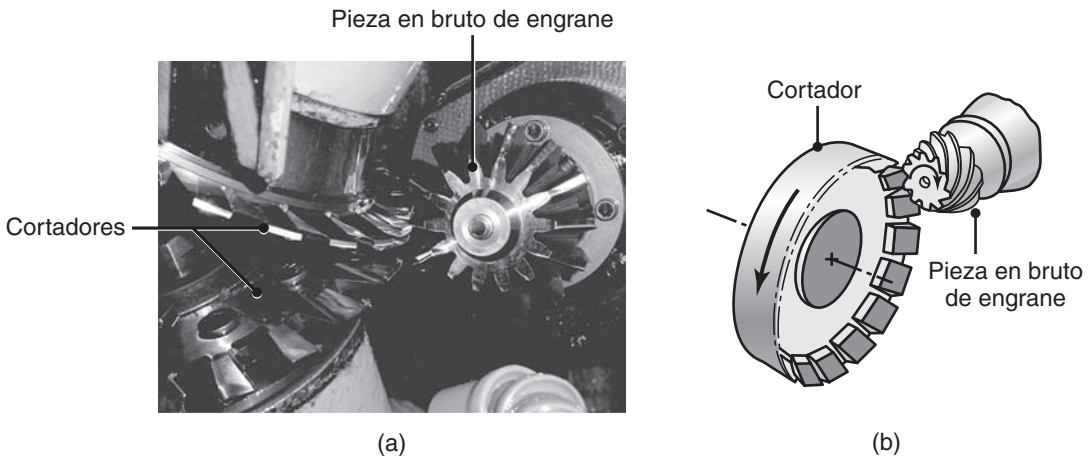


FIGURA 24.32 *(a)* Corte de una pieza en bruto de engrane cónico recto con dos cortadores. *(b)* Corte de engrane cónico helicoidal. *Fuente*: Cortesía de Schafer Gear Works, Inc.

forma adecuada en un generador de engranes. El método de generación es análogo al método de generación de cremalleras ya descrito. Los cortadores se mueven de manera alternativa a través de la cara del engrane cónico, como sucede con la herramienta en la cepilladora de mesa fija (fig. 24.32a). Las máquinas para engranes cónicos espirales operan con base en el mismo principio, en tanto que el cortador en espiral es básicamente un cortador de fresado de careado con varias hojas de corte de lados rectos que sobresalen de su periferia (fig. 24.32b).

24.7.4 Procesos de acabado de engranes

Tal como se produjeron mediante algunos de los procesos ya descritos, el acabado superficial y la precisión dimensional de los dientes del engrane pueden ser insuficientes para ciertas aplicaciones. Además, es posible que los engranes sean ruidosos o que sus propiedades mecánicas (en particular la resistencia a la fatiga y al desgaste) no sean suficientemente elevadas. Existen diversos *procesos de acabado* para mejorar la calidad de la superficie de los engranes. El método de manufactura del engrane y la posibilidad de que los engranes se hayan endurecido por tratamiento térmico determinan la elección del proceso. Como se describe en el capítulo 4, el tratamiento térmico puede provocar la distorsión de las partes. Por consiguiente, para obtener un perfil preciso de dientes de engranes, los engranes tratados térmicamente deben someterse a operaciones adecuadas de terminado.

Rasurado. El proceso de rasurado de engranes comprende un cortador fabricado con la forma exacta del perfil del diente terminado, el cual remueve cantidades pequeñas de metal de la superficie de los dientes del engrane. A los dientes del cortador se les realizan ranuras o hendiduras en varios puntos a lo ancho, haciendo el proceso similar al brochado fino. El cortador tiene un movimiento alternativo. El rasurado y el bruñido (se describe posteriormente) se pueden efectuar sólo en engranes con una dureza de 40 HRC o inferior.

Aunque las herramientas son costosas y se requieren máquinas especiales, el rasurado es rápido y es el proceso más utilizado para el acabado de engranes. Produce dientes de engranes con acabado superficial mejorado y una buena precisión dimensional del perfil del diente. Después, los engranes rasurados pueden tratarse térmicamente y rectificarse para obtener una mejor dureza, resistencia al desgaste y un perfil de dientes más preciso.

Bruñido. El acabado superficial de los dientes de los engranes también puede mejorarse mediante bruñido. Presentado en la década de 1960, el bruñido es básicamente un proceso de deformación plástica de la superficie (ver sección 34.2) por medio de una matriz especial de bruñido endurecida con forma de engrane, que somete las superficies del dien-

te a una acción de laminación de superficies (**laminación de engranes**). El trabajo en frío resultante en las superficies del diente no sólo mejora el acabado superficial, sino que también induce esfuerzos residuales de compresión en las superficies de los dientes del engrane, mejorando así su resistencia a la fatiga. Sin embargo, se ha demostrado que el bruñido no mejora de manera significativa la precisión dimensional del diente del engrane.

Rectificado, honeado y lapeado. Para obtener la máxima precisión dimensional, el espaciado y forma de los dientes, así como el acabado superficial, los dientes de los engranes se pueden rectificar, honear y lapear posteriormente, como se describe en el capítulo 26. Para formar o generar superficies de dientes de engranes, se utilizan ruedas de rectificado afiladas. Existen varios tipos de rectificadoras, siendo la rectificadora de formas de un solo índice la más utilizada. En el **rectificado de forma**, la forma de la piedra abrasiva es idéntica a la del espaciado de los dientes (fig. 24.33a). En la **generación**, la piedra abrasiva actúa de manera similar al cortador generador de engranes, ya descrito (fig. 24.32b).

La herramienta de **honeado** es un engrane de plástico con partículas abrasivas finas. El proceso de honeado es más rápido que el rectificado y se utiliza para mejorar el acabado superficial. Para mejorar aún más este acabado, los dientes de engranes rectificados se **lapean**, usando compuestos abrasivos con *(a)* una herramienta de lapeado en forma de engrane fabricada de hierro fundido o bronce, o *(b)* un par de engranes coinci-

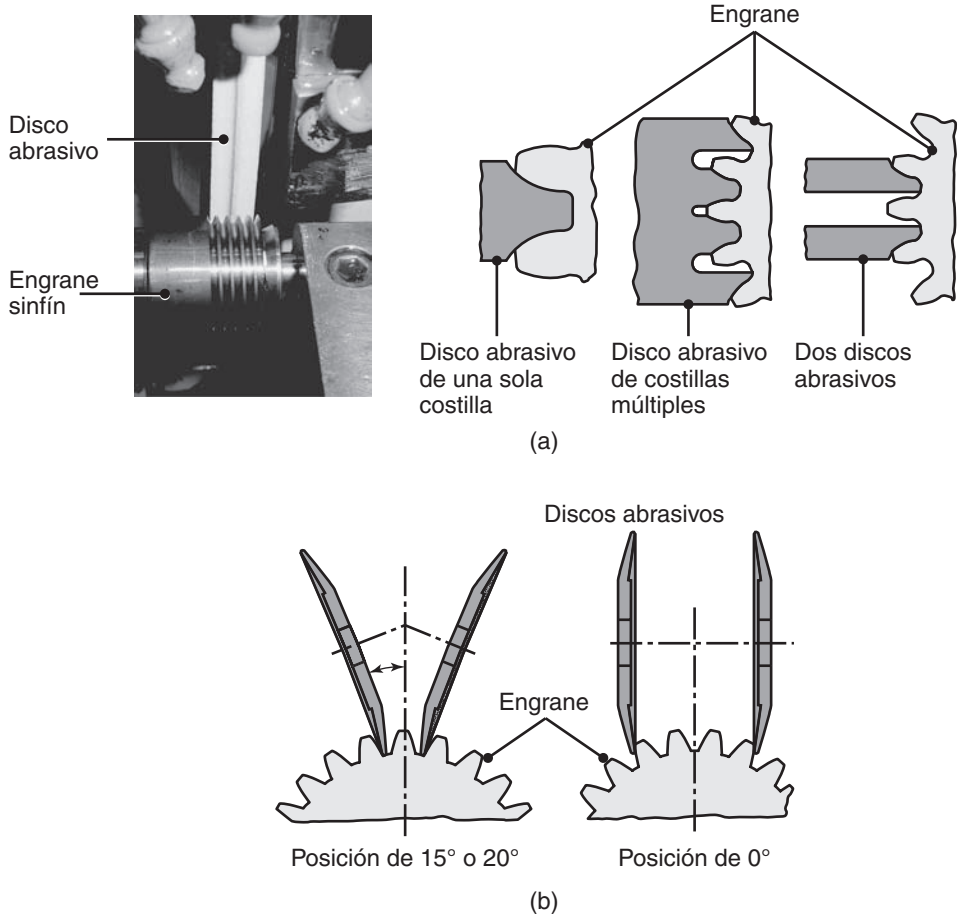


FIGURA 24.33 Acabado de engranes por rectificado: *(a)* rectificado de forma con discos abrasivos de forma; *(b)* rectificado por generación utilizando dos discos.

dentes que giran juntos. Aunque las capacidades de producción son inferiores y los costos superiores, estas operaciones de acabado resultan adecuadas, en particular para producir engranes endurecidos de calidad muy alta, larga vida útil y operación silenciosa.

24.7.5 Consideraciones de diseño y economía del maquinado de engranes

Las consideraciones de diseño para las operaciones de corte de engranes se pueden resumir de la siguiente manera:

- Es importante el diseño de las piezas en bruto de engranes, en particular para dientes complejos de engranes; es necesario hacer provisiones a fin de sujetar dichas piezas con seguridad en la máquina.
- La precisión dimensional y el acabado superficial especificados en los dientes de engranes deben ser tan amplios como sea posible para reducir los costos de producción.
- Es más difícil maquinar los engranes anchos que los angostos.
- Los engranes deben maquinarse antes de ensamblarlos en sus ejes.
- Debe proporcionarse suficiente holgura entre los dientes de un engrane y los rebordes, hombros y otras características, de manera que la herramienta de corte pueda maquinar sin interferencia.
- Deben hacerse provisiones para utilizar cortadores estándar siempre que sea posible.

Economía. Como en todas las operaciones de maquinado, el costo de los engranes aumenta rápidamente con la mejoría del acabado superficial y la calidad. En la figura 24.34 se muestra el costo relativo de manufactura de los engranes en función de la calidad, conforme a los números de especificaciones de la AGMA (American Gear Manufacturers Association) y el DIN (Deutsches Institut für Normung). Cuanto mayor es el número, mayor será la precisión dimensional de los dientes de los engranes. Como se observa en esta figura, el costo de manufactura puede variar en magnitud, dependiendo de las tolerancias dimensionales.

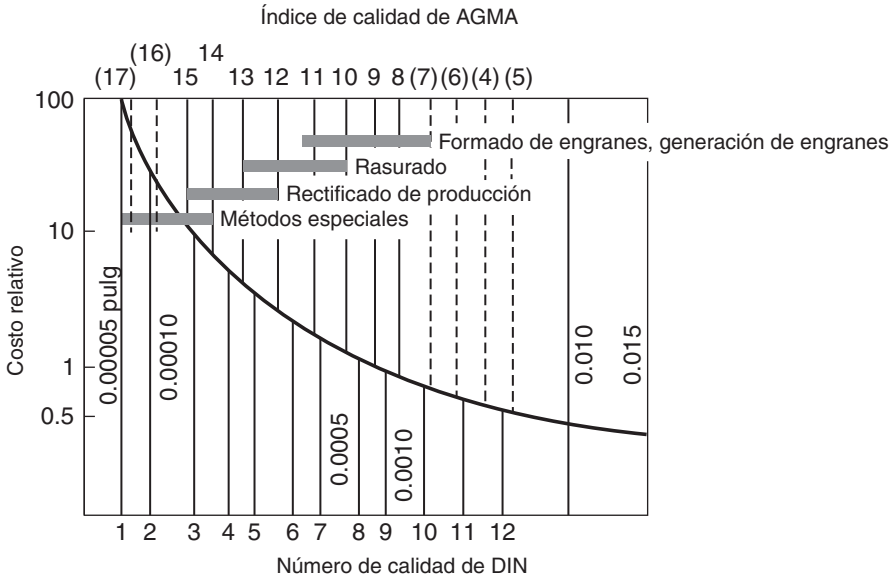


FIGURA 24.34 Costo de manufactura de engranes en función de la calidad de los mismos. Los números a lo largo de las líneas verticales indican tolerancias.

RESUMEN

- Mediante los procesos descritos en este capítulo se pueden maquinar diversas formas complejas. El fresado es uno de los procesos de maquinado más comunes, debido a que tiene la capacidad de producir varias formas en piezas de trabajo de manera económica.
- Aunque esos procesos son similares a los de torneado, taladrado y mandrinado, la mayoría de estos últimos utilizan herramientas y cortadores de dientes múltiples en varios ejes respecto de la pieza de trabajo.
- En la actualidad, la mayoría de las máquinas herramienta para estas operaciones se controlan por computadora, tienen diversas características y operan con mayor flexibilidad.
- Además de los diversos procesos de formado y moldeado descritos en otros capítulos, se producen engranes por maquinado, ya sea por corte de forma o por generación; este último fabrica engranes con mejor acabado superficial y mayor precisión dimensional. La calidad del perfil del diente de los engranes aumenta con los procesos de acabado, como rasurado, bruñido, rectificado, honeado y lapeado.

TÉRMINOS CLAVE

Aserrado
Aserrado por fricción
Brocha de empuje
Brocha de tracción
Brochado
Brochado rotativo
Bruñido
Cepillado de mesa fija
Cepillado de mesa móvil
Cortador de cremallera
Corte de forma
Eje
Estampado de matrices
Fresa madre
Fresado
Fresado concurrente
Fresado de careado
Fresado de un solo filo
Fresado frontal
Fresado frontal de alta velocidad
Fresado plano
Generación de engranes
Honeado
Lapeado
Limado
Matafilos
Ranura
Rasurado
Sujeción de trabajo
Triscado de los dientes

BIBLIOGRAFÍA

Arnone, M., *High Performance Machining*, Hanser, 1998.

ASM Handbook, Vol. 16: *Machining*, ASM International, 1989.

Boothroyd, G. y Knight, W. A., *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, 2ª. ed., Marcel Dekker, 1989.

Brown, J., *Advanced Machining Technology Handbook*, McGraw-Hill, 1998.

Ewert, R. H., *Gears and Gear Manufacture: The Fundamentals*, Chapman and Hall, 1997.

Hoffman, E. G., *Jigs and Fixture Design*, 4a. ed., Industrial Press, 1996.

Krar, S. F. y Check, A. F., *Technology of Machine Tools*, 5a. ed., Glencoe Macmillan/McGraw-Hill, 1996.

Machinery's Handbook, Industrial Press, modificado periódicamente.

Machining Data Handbook, 3a. ed., 2 vols. Machinability Data Center, 1980.

Metal Cutting Tool Handbook, 7a. ed., Industrial Press, 1989.

Stephenson, D. A. y Agapiou, J. S., *Metal Cutting: Theory and Practice*, Marcel Dekker, 1996.

Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4a. ed., Vol. 1: *Machining*, Society of Manufacturing Engineers, 1983.

Townsend, D. P., *Dudley's Gear Handbook: The Design, Manufacturing, and Application of Gears*, 2a. ed., McGraw-Hill, 1991.

Walsh, R. A., *McGraw-Hill Machining and Metalworking Handbook*. McGraw-Hill, 1994.

Weck, M., *Handbook of Machine Tools*, 4 vols., Wiley, 1984.

PREGUNTAS DE REPASO

24.1 ¿Por qué el fresado es un proceso de maquinado tan versátil?

24.2 Describa los diferentes tipos de cortadores utilizados en las operaciones de fresado y proporcione una aplicación para cada tipo.

24.3 ¿Cuáles son las ventajas de los dientes helicoidales sobre los dientes rectos en los cortadores para fresado plano?

24.4 Explique las características relativas del fresado concurrente y del fresado convencional.

24.5 Describa las características geométricas de una brocha y explique sus funciones.

24.6 ¿Por qué el aserrado es un proceso utilizado comúnmente? ¿Tiene limitaciones? Explique su respuesta.

24.7 ¿Por qué algunas hojas de sierras tienen dientes alternados?

24.8 Explique la diferencia entre rasurado y bruñido.

24.9 ¿Qué ventajas tienen las fresadoras tipo cama sobre las de tipo columna y codo para operaciones de producción?

24.10 ¿Por qué el eje de una fresa madre se inclina respecto del eje de la pieza en bruto del engrane?

24.11 Describa la diferencia entre acabado por rectificado de forma y por generación.

24.12 ¿Qué es una fresa hueca? ¿Por qué se utiliza?

24.13 ¿Por qué es difícil aserrar secciones muy delgadas o láminas metálicas?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

24.14 Explique por qué el brochado de los soportes de los cigüeñales es una alternativa atractiva para otros procesos de maquinado.

24.15 En este capítulo se presentan diversos lineamientos para varias operaciones de corte. Comente las razones que sirven de base para estos lineamientos.

24.16 Explique por qué las sierras de marco no son tan productivas como las sierras de banda.

24.17 En las operaciones de fresado con máquinas de husillo horizontal y vertical, ¿cuál es la que probablemente mantiene una mejor precisión dimensional? ¿Por qué?

24.18 ¿Qué similitudes y diferencias existen en el ranurado con un cortador de fresado y con una sierra?

24.19 ¿Por qué tienen que someterse a operaciones de acabado los engranes maquinados? ¿Qué proceso de acabado no es adecuado para los dientes de engranes endurecidos? ¿Por qué?

24.20 ¿Cómo reduciría la rugosidad de la superficie mostrada en la figura 24.6?

24.21 ¿Por qué son tan útiles máquinas como la mostrada en la figura 24.17?

24.22 Comente sus observaciones en relación con los diseños mostrados en la figura 24.20b y sobre la utilidad de las operaciones de brochado.

24.23 Explique cómo se puede iniciar el corte de contornos en una sierra de banda, como se muestra en la figura 24.25d.

24.24 En la figura 24.27a se sueldan dientes de corte de acero de alta velocidad a una hoja de acero. ¿Recomendaría que toda la hoja se fabricara con acero de alta velocidad? Explique sus razones.

24.25 Describa las partes y condiciones en que el brochado sería el método preferible de maquinado.

24.26 Con dibujos apropiados, explique las diferencias y similitudes entre las operaciones de rasurado, brochado y brochado rotativo.

24.27 ¿Consideraría que los procesos de maquinado descritos en este capítulo son procesos de forma casi neta o forma neta? Explique con ejemplos apropiados.

24.28 ¿Por qué el fresado frontal es un proceso tan versátil? Explique con ejemplos.

24.29 Liste y explique los factores que contribuyen a un acabado superficial deficiente en los procesos descritos en este capítulo.

24.30 Explique las posibles razones por las que un cuchillo corta bien cuando se mueve hacia delante y hacia atrás. Considere factores como el corte del material, la fricción y las dimensiones de corte.

24.31 ¿Existen limitaciones de tamaño para las partes a aserrar? Explique su respuesta.

24.32 ¿Por qué es difícil utilizar aserrado por fricción en metales no ferrosos?

24.33 ¿Recomendaría el brochado de una ranura de chaveta en una pieza en bruto de engrane antes o después del maquinado de los dientes? ¿Por qué?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

24.34 En las operaciones de fresado, el tiempo de corte total se puede ver significativamente afectado por *(a)* la magnitud de la distancia sin corte, l_c, mostrada en las figuras 24.3 y 24.4, y *(b)* la relación de la anchura de corte, w, al diámetro del cortador, D. Dibuje varias combinaciones de estos parámetros, proporcione dimensiones, seleccione avances y velocidades de corte, etc., y determine el tiempo total de corte. Comente sus observaciones.

24.35 Está realizando una operación de fresado plano a una velocidad de corte especificada (velocidad superficial del cortador) y un avance por diente. Explique el procedimiento para determinar la velocidad de mesa requerida.

24.36 Demuestre que la distancia l_c en el fresado plano es aproximadamente igual a $\sqrt{Dd}$ para situaciones en las que $D \gg d$. Ver figura 24.3c.

24.37 En el ejemplo 24.1, ¿cuál de las cantidades se afectará al aumentar el avance a $f = 0.02$ pulgada/diente?

24.38 Calcule la profundidad de corte de viruta, t_c, y el torque para el ejemplo 24.1.

24.39 Estime el tiempo requerido para fresar por careado un bloque de latón de 10 pulgadas de largo y 2 pulgadas de ancho, con un cortador de 6 pulgadas de diámetro con 10 insertos de acero de alta velocidad.

24.40 Se está cortando una placa de 10 pulgadas de largo, 1 pulgada de ancho en una sierra de banda a 150 pies/min. La sierra tiene 12 dientes por pulgada. Si el avance por diente es de 0.003 pulgada, ¿cuánto tiempo se requerirá para aserrar la placa a lo largo?

24.41 Se utiliza una fresa generadora de rosca simple para cortar 40 dientes en un engrane recto. La velocidad de corte es de 120 pies/min y la fresa generadora tiene 3 pulgadas de diámetro. Calcule la velocidad rotacional del engrane recto.

24.42 Suponga que en la operación de fresado de careado que se muestra en la figura 24.4, las dimensiones de la pieza de trabajo son de 5 pulgadas por 10 pulgadas. El cortador es de 6 pulgadas de diámetro, tiene 8 dientes y gira a 300 rpm. La profundidad de corte es de 0.125 pulgada y el avance de 0.005 pulgada/diente. Suponga que el requerimiento específico de energía para este material es de 2 hp min/pulg^3 y que sólo 75% del diámetro del cortador participa en el corte. Calcule *(a)* la potencia requerida, y *(b)* la velocidad de remoción de material.

24.43 Una operación de fresado plano ocurre en una parte de 250 mm de largo y 50 mm de ancho. Se utiliza un cortador helicoidal de 75 mm de diámetro con 10 dientes. Si el avance por diente es de 0.2 mm/diente y la velocidad de corte de 0.75 m/s, obtenga el tiempo de maquinado y la velocidad de remoción de metal para remover 6 mm de la superficie de la parte.

24.44 Calcule los intervalos de tiempo de maquinado para fresado de careado de un cortador de 10 pulgadas de largo, 2 pulgadas de ancho, con una profundidad de corte de 0.1 pulgada para los siguientes materiales de la pieza de trabajo: *(a)* acero de bajo carbono; *(b)* aleaciones de titanio; *(c)* aleaciones de aluminio, y *(d)* termoplásticos.

24.45 Explique si las marcas de avance de la izquierda en la pieza de trabajo con un cortador de fresado de careado (como se muestra en la fig. 24.13a) son segmentos de círculos exactos. Describa los parámetros que considera al responder esta pregunta.

24.46 Al describir las operaciones de brochado y el diseño de las brochas, no hemos proporcionado ecuaciones en relación con los avances, velocidades y velocidades de remoción de material, como lo hicimos en las operaciones de torneado y fresado. Revise la figura 24.21 y desarrolle dichas ecuaciones.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

24.47 La parte mostrada en la figura 24.1f se va a maquinar a partir de una pieza en bruto rectangular. Sugiera las máquinas herramienta requeridas, los soportes necesarios y los tipos y secuencia de operaciones a realizar. Comente sus respuestas en términos del material de la pieza de trabajo, como aluminio contra acero inoxidable.

24.48 Respecto de la figura 24.1f, ¿preferiría maquinar esta parte a partir de una pieza en bruto preformada (forma casi neta) en vez de una pieza rectangular? Si es así, ¿cómo prepararía dicha pieza? ¿Cómo influiría el número de partes requeridas en su respuesta?

24.49 Suponga que es un instructor que cubre los temas descritos en este capítulo y está aplicando un examen sobre varios aspectos para evaluar los conocimientos de los alumnos. Elabore dos problemas cuantitativos y dé las respuestas.

24.50 Sugiera algunos métodos mediante los cuales los cortadores de fresado de diversos diseños (incluyendo fresas frontales) puedan incorporar insertos de carburo.

24.51 Algunos manuales incluyen tablas de recomendaciones en relación con las operaciones de maquinado y el equipo utilizado. Estudie la bibliografía disponible y elabore una tabla para operaciones de fresado.

24.52 Elabore una tabla completa sobre las capacidades de proceso de los procesos de maquinado descritos en este capítulo. Utilizando varias columnas, describa las máqui-

nas comprendidas, los tipos de herramientas y los materiales para herramientas usados, las formas de las piezas en bruto y las partes producidas, los tamaños máximo y mínimo característicos, el acabado superficial, las tolerancias dimensionales y las capacidades de producción.

24.53 Con base en los datos desarrollados en el problema 24.52, diga lo que piensa en relación con el procedimiento a seguir para determinar qué tipo de máquina herramienta seleccionar al maquinar una parte específica.

24.54 Utilizando la Internet, obtenga especificaciones sobre las fresadoras más pequeñas y más grandes disponibles y compare sus resultados con los obtenidos por sus compañeros.

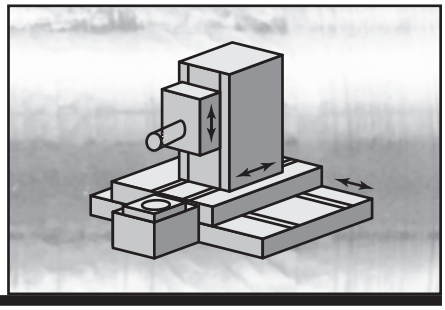
24.55 Liste todos los procesos que se pueden utilizar en la manufactura de engranes, incluyendo los descritos en las partes II y III de este texto. Para cada proceso, describa las ventajas, limitaciones y la calidad de los engranes producidos.

24.56 Si se fueran a maquinar tableros de panal expandidos (ver sección 16.12) en una operación de fresado de forma, ¿qué precauciones tomaría para evitar que la lámina de metal se doblara debido a las fuerzas de la herramienta? Piense en tantas soluciones como pueda.

CAPÍTULO

25

Centros de maquinado, conceptos y estructuras de maquinado avanzado y economía del maquinado



25.1 Introducción 760
25.2 Centros de maquinado 761
25.3 Estructuras de las máquinas herramienta 770
25.4 Vibración y traqueteo en las operaciones de maquinado 775
25.5 Maquinado de alta velocidad 778
25.6 Maquinado duro 781
25.7 Maquinado de ultraprecisión 782
25.8 Economía del maquinado 783

EJEMPLO:

25.1 Maquinado de pistas exteriores de un rodamiento en un centro de torneado 768

ESTUDIO DE CASO:

25.1 Maquinado en seco de alta velocidad de motores de hierro fundido 779

En este capítulo se presentan los avances en el diseño y la construcción de máquinas herramienta para mejorar sus características, precisión y productividad, además de reducir los costos de manufactura. En particular, se describen:

- Los conceptos y las características de los centros de maquinado y torneado.
- La estructura de las máquinas herramienta. Su diseño, construcción y materiales.
- El diseño y la operación de centros de maquinado hexápodo y reconfigurables.
- La razón por la que se generan vibración y traqueteo en las operaciones de maquinado y cómo se pueden evitar.
- La importancia creciente del maquinado de alta velocidad, duro y de ultraprecisión.
- Los factores comprendidos en los costos de maquinado y cómo minimizarlos.

25.1 Introducción

En los capítulos anteriores se describieron las características y peculiaridades de las máquinas herramienta que comúnmente se utilizan para conjuntos específicos de operaciones de maquinado. Además, se enfatizó la conveniencia de que estas máquinas fueran flexibles, de manera que pudieran efectuarse más operaciones sin tener que volver a fijar las piezas de trabajo en diferentes máquinas. En este capítulo se estudian el diseño y las capacidades de los **centros de maquinado** controlados por computadora, que cuentan con la flexibilidad y versatilidad que les falta a otras máquinas herramienta individuales. En consecuencia, a menudo se han convertido en la primera opción al seleccionar máquinas herramienta.

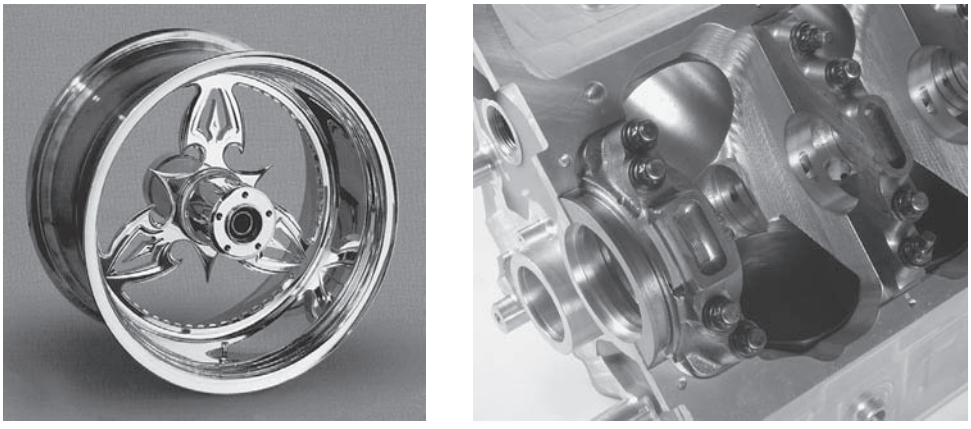
También se describe el desarrollo más reciente en la flexibilidad de los procesos de manufactura, es decir, el concepto de **máquinas reconfigurables**. Aquí, el diseño de estas máquinas consta de componentes modulares, que se pueden arreglar y rearreglar con ra-

pidez dándoles varias configuraciones, de ahí el término *reconfigurable*. El sistema utiliza avanzados *hardware* y *software* de computadora, sistemas de comunicación y controladores reconfigurables.

En este capítulo se presentan las tendencias en el diseño y los materiales para máquinas herramienta. Estos desarrollos requieren conocimientos sobre el desempeño de dichas máquinas, los módulos y sus componentes, en particular los relativos a su rigidez, vibración, traqueteo y características de amortiguamiento. Estas consideraciones son importantes no sólo por lo que se refiere a la precisión dimensional y calidad de las superficies fabricadas, sino también por su influencia en la vida útil de la herramienta, la productividad y la economía general del maquinado. En las últimas secciones de este capítulo se trata la economía de las operaciones de maquinado, identificando los factores que contribuyen a los costos del mismo. Se describe el maquinado de alta velocidad, duro y de ultraprecisión, en el entendido de que estos temas se relacionan fuertemente con las consideraciones económicas del maquinado. Se presenta un método simple de análisis de costos que puede ayudar a determinar las condiciones en las cuales se seleccionarían los parámetros de maquinado, de manera que sea posible lograr un costo mínimo de maquinado o un tiempo unitario mínimo de maquinado.

25.2 Centros de maquinado

Al describir los procesos individuales de maquinado y las máquinas herramienta en los capítulos anteriores, se destacó que cada máquina, sin importar su grado de automatización, está diseñada para realizar básicamente el mismo tipo de operaciones, como torneado, mandrinado, taladrado, fresado, brochado, cepillado de mesa móvil o cepillado de mesa fija. También se mostró que la mayoría de las partes manufacturadas mediante los métodos descritos en este libro requieren operaciones adicionales en sus superficies antes de ser terminadas. Por ejemplo, obsérvese que las partes mostradas en la figura 25.1 tienen varias características geométricas complejas y que todas sus superficies necesitan diferentes tipos de operaciones de maquinado (como fresado, careado, mandrinado, taladrado, rimado o roscado) para cumplir algunos requisitos específicos en relación



(a) (b)

FIGURA 25.1 Ejemplos de partes que se pueden mecanizar en centros de maquinado mediante diversos procesos como torneado, careado, fresado, taladrado, mandrinado, rimado y roscado. Es común que dichas partes requieran el uso de varias máquinas herramienta para concluirlas. *(a)* Rueda forjada de motocicleta, maquinada de acabado para obtener la tolerancia, y posteriormente pulida y recubierta. *(b)* Vista detallada de un monobloque de motor, que muestra cavidades complejas, orificios roscados y superficies planas. *Fuente*: *(a)* Cortesía de R. C. Components. *(b)* Cortesía de Donovan Engineering, programación por Norman Woodruff y fotografía de Ed Dellis, Powersports photography.

con las formas, características, tolerancias dimensionales y acabado superficial. Una breve revisión conduce a las siguientes observaciones:

- Existen algunas posibilidades en la producción de *forma neta* o *forma casi neta* de estas partes, dependiendo de los requisitos específicos para las formas, tolerancias dimensionales, peculiaridades de la superficie, acabado superficial, diversas propiedades mecánicas y otras que podrían satisfacer los requisitos de servicio. Los procesos de formado que son candidatos para estas partes son la fundición de precisión, la metalurgia de polvos, el moldeo por inyección de polvos y el forjado de precisión. Sin embargo, aun así es muy probable que las partes sigan requiriendo operaciones de acabado adicionales. Por ejemplo, necesitarán maquinado posterior los orificios profundos de diámetro pequeño, los orificios roscados, las superficies planas para ser selladas con empaques, las tolerancias dimensionales muy cerradas, las esquinas y los bordes agudos, así como las superficies planas o curvadas con diferentes requerimientos de acabado superficial.
- Si se requiere cierta forma de maquinado o se demuestra que es más económico dar acabado a estas partes mediante maquinado para proporcionarles su forma final, entonces es obvio que ninguna de las máquinas herramienta descritas *de manera individual* en los capítulos 23 y 24 pueden producir estas partes por completo. También observamos que, tradicionalmente, las operaciones de maquinado se efectúan pasando la pieza de trabajo de una máquina herramienta a otra hasta completar todas las operaciones de este proceso.

El concepto de centros de maquinado. El método tradicional de maquinado de partes por medio de diferentes tipos de máquinas herramienta sigue siendo un método viable y eficiente de manufactura. Se puede automatizar en gran medida para aumentar la productividad y, de hecho, es el principio básico de las **líneas de transferencia** (también conocidas como *líneas de manufactura dedicada*, DML, por sus siglas en inglés), como se describe en la sección 37.2. Empleadas comúnmente en la *producción de alto volumen* o *en masa*, las líneas de transferencia constan de diversas máquinas herramienta específicas, ordenadas en una secuencia lógica.

La pieza de trabajo (como un monobloque de motor automovilístico) se pasa de una estación a otra realizando una operación específica de maquinado en cada una de ellas; después se transfiere a la siguiente máquina para otra operación de maquinado, y así sucesivamente. Sin embargo, existen situaciones en las que las líneas de transferencia no son viables ni económicas, sobre todo cuando los tipos de productos a procesar cambian con rapidez debido a factores como demanda del producto o cambios en la forma o el estilo del mismo. Arreglar de nuevo estas máquinas herramienta para responder a las necesidades del siguiente ciclo de producción es un proceso muy costoso y laborioso. Un concepto importante desarrollado a finales de la década de 1950 es el de los **centros de maquinado**.

Un centro de maquinado (fig. 25.2) es una máquina herramienta avanzada, controlada por computadora, que tiene la capacidad de realizar varias operaciones de maquinado en diferentes superficies y orientaciones de una pieza de trabajo sin tener que retirarla de su dispositivo o aditamento de sujeción. Por lo general, dicha pieza se mantiene estacionaria y las herramientas de corte giran como lo hacen en el fresado, taladrado, honeado, machueleado y en operaciones similares. Mientras que en las líneas de transferencia, o en los talleres o fábricas comunes, la pieza de trabajo se lleva *a la máquina*, en los centros de maquinado es la operación de maquinado la que se lleva *a la pieza de trabajo*.

Respecto del término *pieza de trabajo*, cabe señalar que en un centro de maquinado también consta de todo tipo de **herramental**. Éste incluye herramientas de formado y corte, cortadores y portaherramientas, zancos de herramientas para sujetar insertos, moldes para fundición, matrices o dados hembra y macho para formado, punzones para el trabajo metalmecánico y metalurgia de polvos, arietes para extrusión, dispositivos de sujeción y fijación del trabajo, todos los cuales también se deben manufacturar. Debido a que las geometrías con frecuencia son bastante complicadas y se realizan varias operaciones de maquinado, es común producir estas herramientas en centros de maquinado.

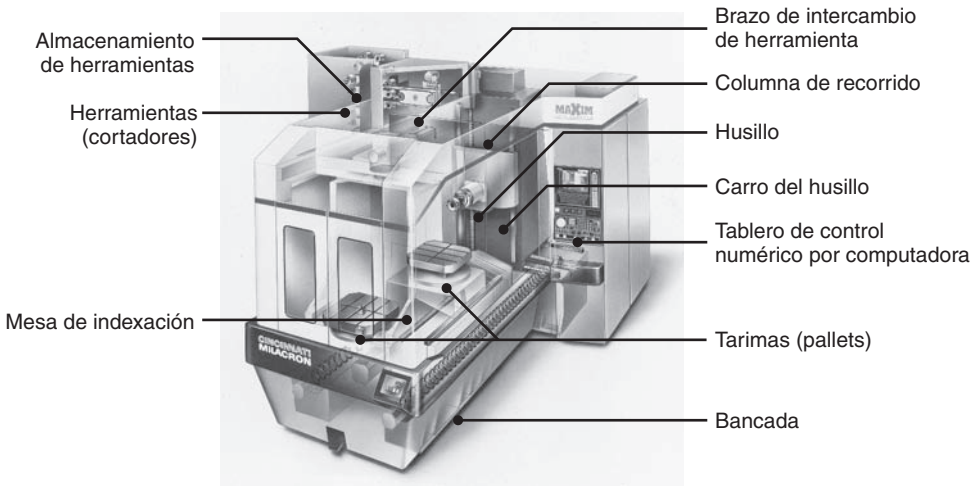


FIGURA 25.2 Centro de maquinado de husillo horizontal equipado con un cambiador automático de herramientas. Los cargadores de herramientas pueden almacenar hasta 200 herramientas de corte, con diversas funciones y tamaños. *Fuente:* Cortesía de Cincinnati Milacron, Inc.

El desarrollo de los centros de maquinado se relaciona estrechamente con los avances en la automatización y el control computarizado de las máquinas herramienta, cuyos detalles se describen en el capítulo 37. Recuérdese que como ejemplo de los avances en los tornos modernos, en la figura 23.10 se ilustra un torno de control numérico (**centro de torneado**) con dos torretas que portan varias herramientas de corte.

Componentes de un centro de maquinado. La pieza de trabajo en un centro de maquinado se coloca en una tarima o ***pallet*** o *módulo* que se puede mover y girar (orientar) en varias direcciones (fig. 25.3). Después de completar una operación específica de maquinado, empieza otra operación, que puede requerir la reindexación de la

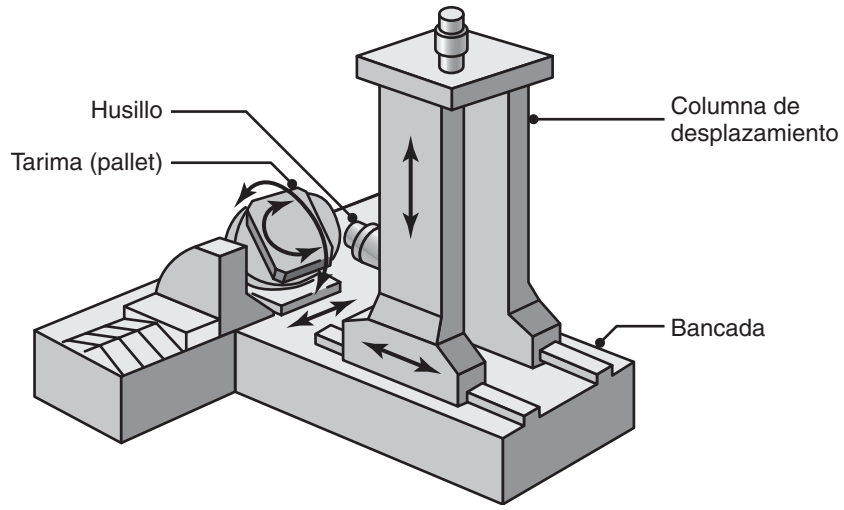


FIGURA 25.3 Esquema del principio de un centro de maquinado de cinco ejes. Obsérvese que además de tres movimientos lineales (tres ejes), la tarima (pallet), que soporta la pieza de trabajo, se puede girar alrededor de dos ejes (por lo tanto, un total de cinco ejes), permitiendo el maquinado de ejes complejos, como los mostrados en la figura 25.1. *Fuente*: Cortesía de Toyoda Machinery.

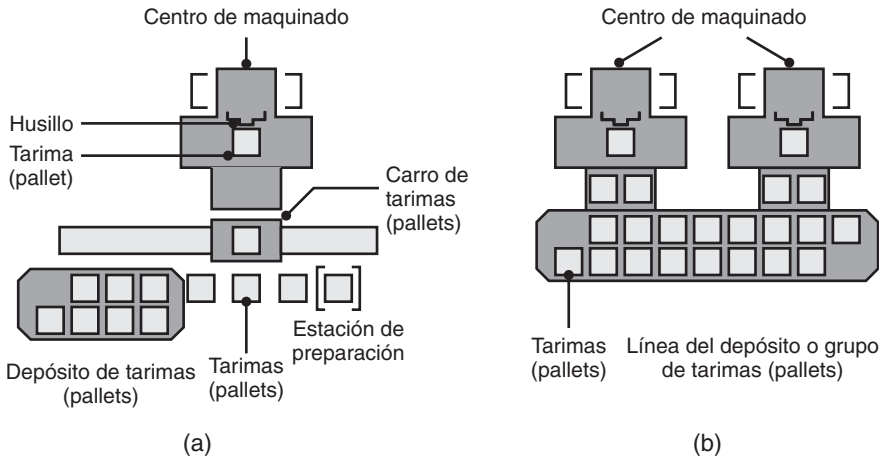


FIGURA 25.4 *(a)* Esquema de la vista superior de un centro de maquinado de husillo horizontal que muestra el depósito o grupo de tarimas, la estación de preparación para una tarima, el carro de tarimas y una tarima activa en operación (mostrada directamente debajo del husillo de la máquina). *(b)* Esquema de dos centros de maquinado con un depósito común de tarimas. También son posibles muchos otros arreglos de tarimas (pallets) en dichos sistemas. *Fuente*: Cortesía de Hitachi Seiki Co., Ltd.

pieza de trabajo sobre su *pallet*. Luego de terminar todas las operaciones de maquinado, se aleja la tarima (*pallet*) en forma automática con la parte terminada y se coloca otra (llevando una nueva pieza de trabajo a maquinar) en posición mediante un **cambiador automático de *pallets*** (fig. 25.4). Todos los movimientos se controlan por computadora y los tiempos del ciclo de cambio de tarima *(pallet)* son de sólo 10 a 30 segundos. Existen estaciones con diversas tarimas que sirven al centro de maquinado. Las máquinas también se pueden equipar con diversas características automáticas, como dispositivos de carga y descarga de partes.

Un centro de maquinado está equipado con un **cambiador automático de herramientas** (ATC, por sus siglas en inglés) programable. Dependiendo del diseño particular se pueden almacenar hasta 200 herramientas de corte en un carrusel, tambor o cadena (*almacenamiento de herramientas*). Algunos centros de maquinado especiales y grandes también cuentan con un almacenamiento auxiliar de herramientas. Las herramientas de corte se seleccionan en forma automática, con acceso aleatorio para la ruta más corta al husillo de la máquina. Las máximas dimensiones que las herramientas de corte pueden alcanzar alrededor de una pieza de trabajo en un centro de maquinado se conocen como **envolvente (volumen) de trabajo**, término que se utilizó por primera vez en relación con los robots industriales, como se describe en la sección 37.6.

El **brazo de intercambio de herramientas** que se muestra en la figura 25.5 es un diseño común; gira alrededor para recoger una herramienta en particular y la coloca en el husillo. Obsérvese que cada herramienta tiene su propio portaherramientas, por lo cual la transferencia de las herramientas de corte al husillo de la máquina es muy eficiente. Las herramientas se identifican con códigos de barras, etiquetas codificadas o chips de memoria incorporados directamente en sus portaherramientas. Por lo general, los *tiempos de cambio de herramienta* son de entre 5 y 10 segundos, pero pueden ser hasta de 30 segundos para herramientas que pesan 110 kg (250 libras). Debido a que el cambio de herramienta es una operación sin corte, la tendencia constante es reducir aún más los tiempos.

Los centros de maquinado se pueden equipar con una **estación de verificación de herramienta** o **de verificación de parte o pieza** que alimenta información al sistema de control de la máquina, de manera que pueda compensar cualquier variación en el ajuste o desgaste de las herramientas. Se pueden instalar **sondas o palpadores de contacto** (fig.

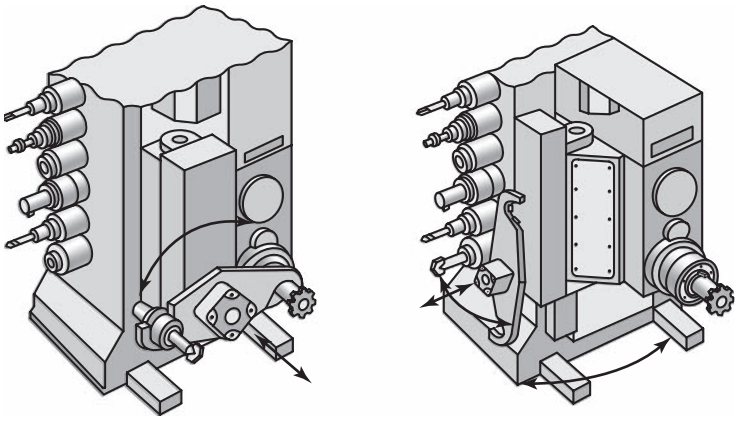


FIGURA 25.5 Cambiador oscilante de herramientas en un centro de maquinado de husillo horizontal. *(a)* El brazo de intercambio de herramientas está colocando un portaherramientas con una herramienta de corte en el husillo de la máquina. Nótese el movimiento axial y rotativo del brazo. *(b)* El brazo está regresando a su posición de inicio. Obsérvese su rotación a lo largo de un eje vertical después de colocar la herramienta y los dos grados de libertad en su posición inicial.

25.6) en un portaherramientas a fin de determinar las superficies de referencia de la pieza de trabajo para seleccionar los ajustes de las herramientas e inspeccionar en línea las partes que se están maquinando. En la figura 25.6 se observa que se pueden contactar diversas superficies (ver también *tecnología de los sensores*, sección 37.7) y que sus posiciones relativas se determinan y almacenan en la base de datos del *softwar*e de la computadora. Después se utilizan los datos para programar las trayectorias de las herramientas y compensar su longitud, diámetro y desgaste en máquinas herramienta más avanzadas.

25.2.1 Tipos de centros de maquinado

Existen diversos diseños de centros de maquinado. Los dos tipos básicos son el de husillo vertical y el de husillo horizontal, pero muchas máquinas tienen la capacidad de operar en ambos ejes.

Centros de maquinado de husillo vertical. También conocidos como *centros de maquinado verticales* (VMC, por sus siglas en inglés), tienen la capacidad de efectuar diversas operaciones de maquinado en partes con cavidades profundas, por ejemplo, en la fabricación de moldes y matrices. En la figura 25.7 se muestra un centro de maquinado de husillo vertical (que es similar a una fresadora de husillo vertical). El carrusel o cargador de herramientas se encuentra a la izquierda de la figura y todas las operaciones y movimientos se dirigen y modifican por medio del tablero de control por computadora mostrado a la derecha. Debido a que las fuerzas de empuje en el maquinado vertical se dirigen hacia abajo, dichas máquinas tienen gran rigidez y producen partes con buena precisión dimensional. Por lo general, son menos costosas que las máquinas de husillo horizontal.

Centros de maquinado de husillo horizontal. También conocidos como *centros de maquinado horizontales* (HMC, por sus siglas en inglés), son adecuados para piezas de trabajo grandes y altas que requieren maquinado en muchas de sus superficies. El *pallet* se puede girar en diferentes ejes (por ejemplo, ver fig. 25.3) a diversas posiciones

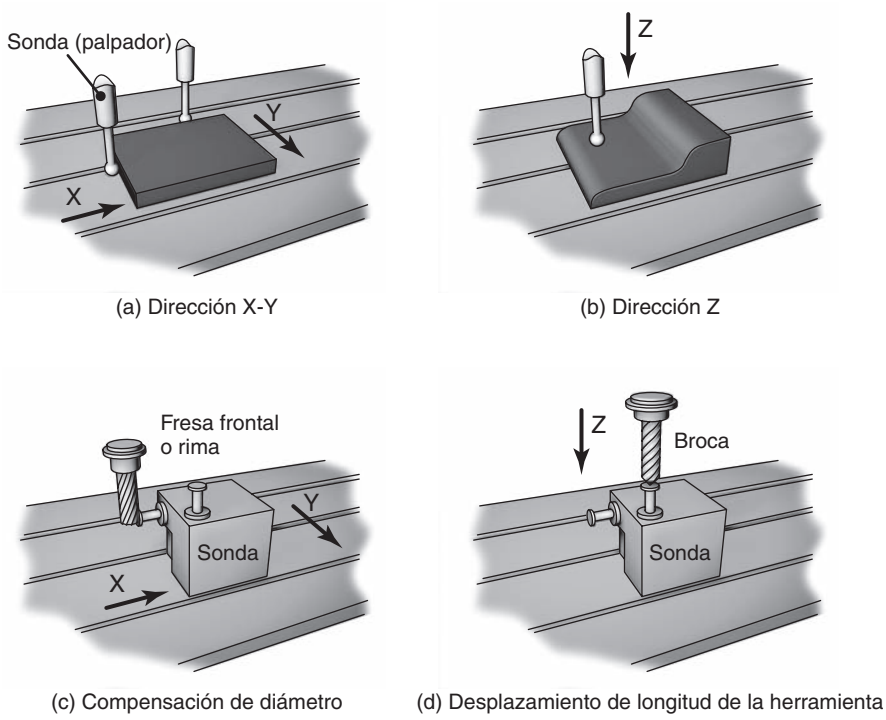


FIGURA 25.6 Sondas o palpadores de contacto utilizadas en los centros de maquinado para determinar las posiciones de la pieza de trabajo y la herramienta y superficies en relación con la mesa o columna de la máquina. Sondas o palpadores de contacto: *(a)* determinando la posición de X-Y (horizontal) de una pieza; *(b)* determinando la altura de una superficie horizontal; *(c)* determinando la posición del plano de la superficie de un cortador (por ejemplo, para compensación del diámetro del cortador), y *(d)* determinando la longitud de una herramienta para desplazamiento de la longitud de la herramienta.

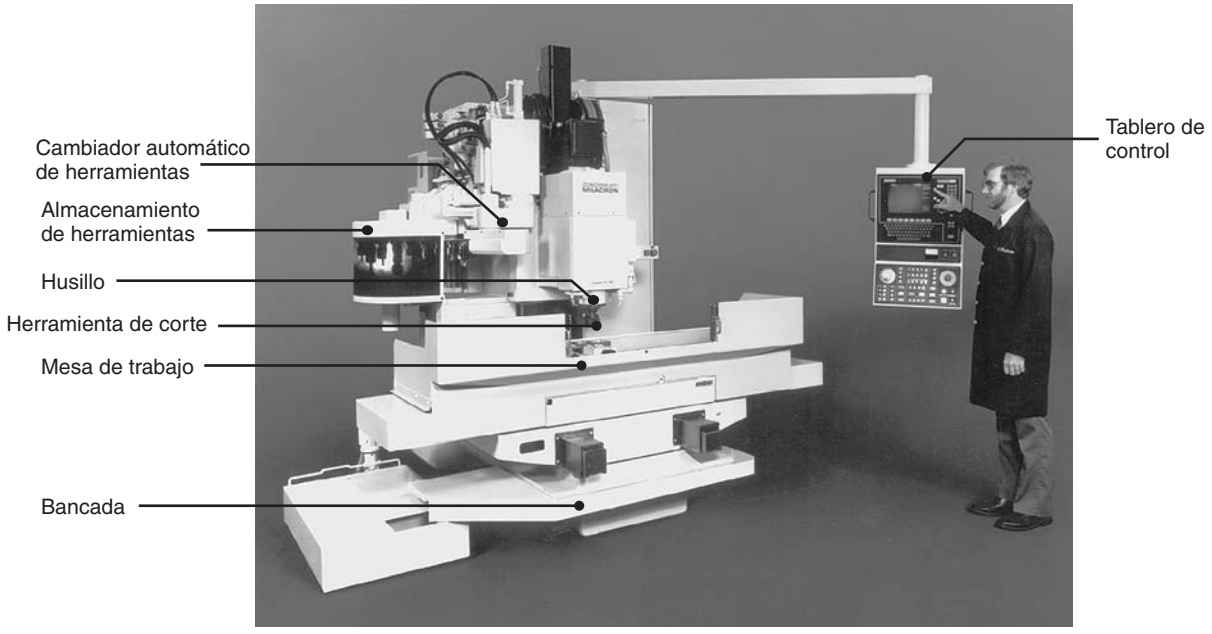


FIGURA 25.7 Centro de maquinado de husillo vertical. El cargador de herramientas está a la izquierda de la máquina. El operador puede hacer girar el tablero de control de la derecha. *Fuente*: Cortesía de Cincinnati Milacron, Inc.

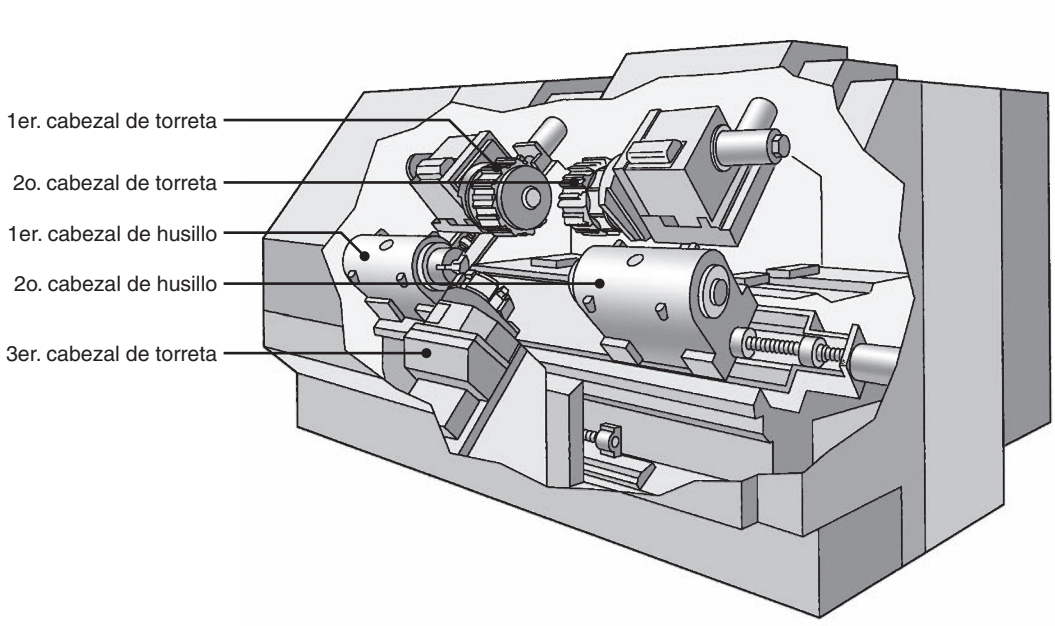


FIGURA 25.8 Esquema de un centro de torneado de control numérico por computadora. Obsérvese que la máquina tiene dos cabezales de husillo y tres cabezales de torreta, lo que hace que tenga capacidades de maquinado muy flexibles. *Fuente*: Cortesía de Hitachi Seiki, Co., Ltd.

angulares. Otra categoría de máquinas de husillo horizontal son los **centros de torneado**, que son *tornos* controlados por computadora con distintas características. En la figura 25.8 se muestra un centro de torneado de tres torretas; se construye con dos husillos horizontales y tres torretas equipadas con diversas herramientas de corte, usadas para realizar diferentes operaciones en una pieza de trabajo rotatoria o rotacional.

Los *centros universales de maquinado* están equipados con husillos verticales y horizontales. Tienen diversas características y la capacidad de maquinar todas las superficies de una pieza de trabajo (es decir, verticales, horizontales y a una amplia variedad de ángulos).

25.2.2 Características y capacidades de los centros de maquinado

A continuación se resumen las principales características de los centros de maquinado:

- Los centros de maquinado son capaces de manejar una amplia variedad de tamaños y formas de partes de manera eficiente, económica y repetitiva; tienen alta precisión dimensional y tolerancias del orden de ± 0.0025 mm (0.0001 pulgada).
- Estas máquinas son versátiles y tienen la capacidad de cambiar con rapidez de un tipo de producto a otro.
- Reducen el tiempo requerido para cargar y descargar las piezas de trabajo, cambiar las herramientas, calibrar la parte y resolver problemas. Por lo tanto, mejoran la productividad, reducen la necesidad de mano de obra (en particular mano de obra calificada) y minimizan los costos de producción.
- Estas máquinas están equipadas con dispositivos que monitorean las condiciones de la herramienta y detectan su rotura y desgaste, además de sondas o palpadores para compensar el desgaste y posicionamiento de las herramientas.

- En la actualidad, el calibrado e inspección de las piezas de trabajo maquinadas durante el proceso y después del mismo son características de los centros de maquinado.
- Estas máquinas son compactas y altamente automatizadas y tienen sistemas de control avanzados, de manera que un operador puede atender dos o más centros de maquinado al mismo tiempo, reduciendo así los costos de mano de obra.

Debido a la alta productividad de los centros de maquinado, se generan grandes cantidades de viruta que deben recolectarse y desecharse de manera adecuada (sección 23.3.7); a este proceso se le conoce como *manejo de virutas*. Existen diversos diseños para la **recolección de virutas** con una o más bandas transportadoras de espiral (tornillo) o de cadena, que las recolectan con charolas en la máquina y las entregan en un punto de recolección.

Existen centros de maquinado con una amplia variedad de tamaños y características; sus costos van desde unos $50,000 hasta $1 millón de dólares y más. Las capacidades comunes llegan hasta 75 kW (100 hp). Por lo general, las velocidades máximas del husillo van de 4000 a 8000 rpm y algunas llegan a 75,000 rpm para aplicaciones especiales, utilizando cortadores de diámetro pequeño. Los husillos modernos pueden acelerar a una velocidad de 20,000 rpm en sólo 1.5 segundos. Algunos pallets (tarimas) tienen la capacidad de soportar piezas de trabajo que pesan hasta 7000 kg (15,000 libras), aunque existen capacidades mayores para aplicaciones especiales.

25.2.3 Selección de los centros de maquinado

Por lo general, los centros de maquinado requieren gastos de capital importantes; para que su costo sea rentable, es posible que tengan que utilizarse durante más de un turno al día. Por consiguiente, debe existir demanda continua y suficiente de partes que justifiquen esta compra. Sin embargo, debido a su versatilidad inherente, los centros de maquinado pueden emplearse para producir una amplia variedad de productos, particularmente para la *manufactura justo a tiempo* (JIT, por sus siglas en inglés), como se describirá en la sección 39.5.

La selección del tipo y tamaño de los centros de maquinado depende de diversos factores, en particular:

- Del tipo de productos, su tamaño y la complejidad de su forma.
- Del tipo de operaciones de maquinado a realizar y del tipo y la cantidad de herramientas de corte requeridas.
- De la precisión dimensional requerida.
- De la capacidad de producción requerida.

EJEMPLO 25.1 Maquinado de pistas exteriores de un rodamiento en un centro de torneado

Las pistas exteriores para rodamientos (fig. 25.9) se maquinan en un centro de torneado. El material de inicio es un tubo de acero 52100 laminado en caliente con 91 mm (3.592 pulgadas) de DE y 75.5 mm (2.976 pulgadas) de DI. La velocidad de corte es de 95 m/min (313 pies/min) para todas las operaciones. Todas las herramientas son de carburo, incluyendo la herramienta para tronzar (la última operación), que es de 3.18 mm ($\frac{1}{8}$ de pulgada) en lugar de 4.76 mm ($\frac{3}{16}$ de pulgada) para el tronzador de acero de alta velocidad que se utilizaba inicialmente.

El material ahorrado por este cambio es significativo, porque la anchura de la pista es pequeña. El centro de torneado tuvo la capacidad de maquinar estas pistas a altas velocidades y con tolerancias repetibles de ± 0.025 mm (0.001 pulgada). (Ver también el ejemplo 23.2).

Fuente: Cortesía de McGill Manufacturing Company.

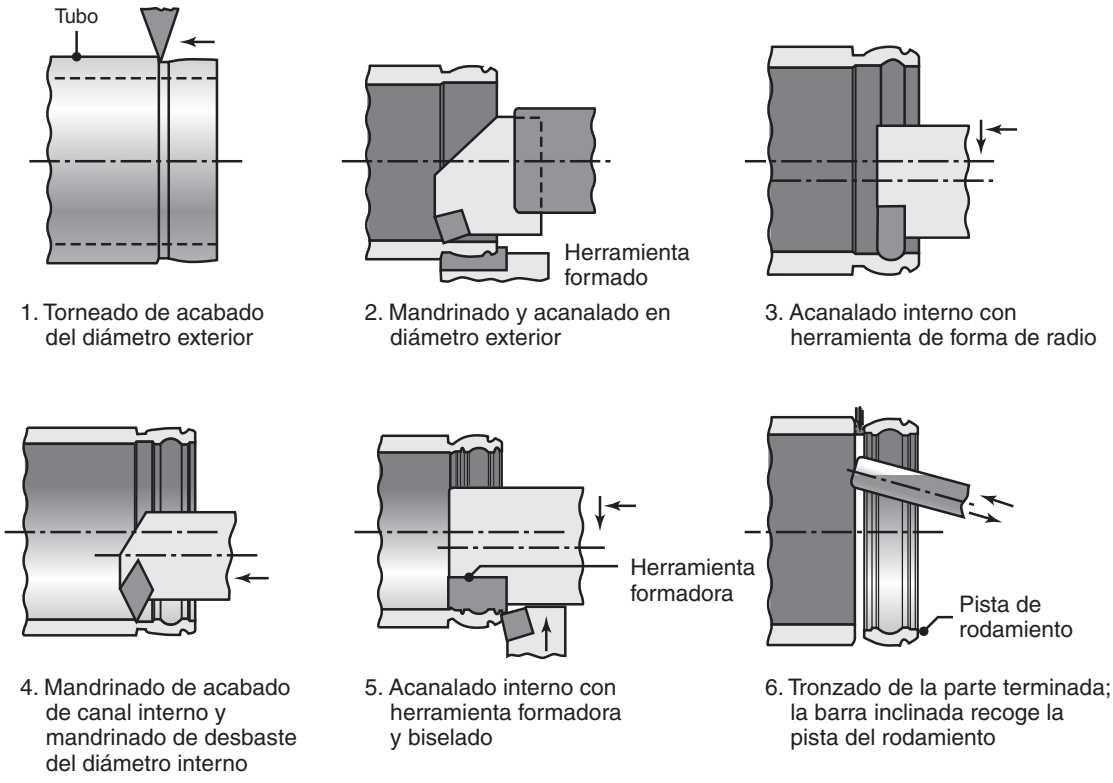


FIGURA 25.9 Maquinado de pistas exteriores de rodamiento.

25.2.4 Máquinas y sistemas reconfigurables

La necesidad de flexibilizar los procesos de manufactura ha llevado al concepto más reciente de *máquinas reconfigurables*, que constan de varios módulos. El término *reconfigurables* proviene del hecho de que (utilizando *hardware* de computadora, controladores reconfigurables avanzados y los avances en tecnologías de administración de la información) los componentes de la máquina se pueden ordenar y reordenar con rapidez en numerosas configuraciones para cumplir demandas específicas de producción. Con base en la estructura básica de la máquina herramienta de un centro de maquinado de tres ejes, la figura 25.10 muestra un ejemplo de cómo se puede reconfigurar para que se vuelva un

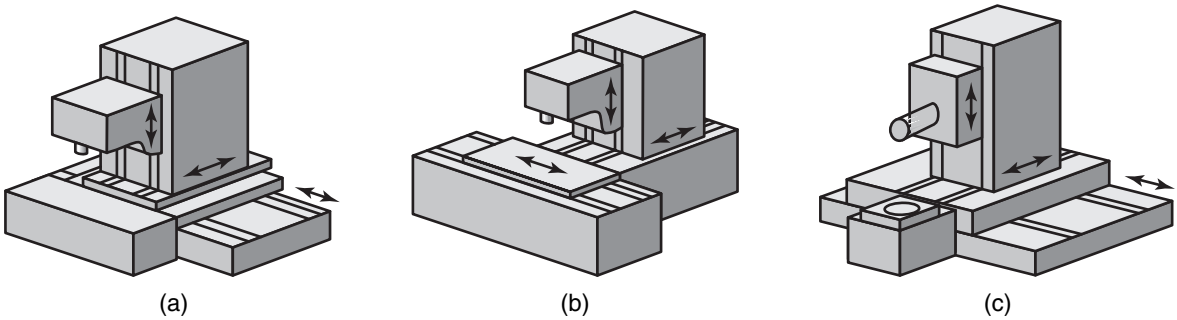


FIGURA 25.10 Esquema de un centro de maquinado modular reconfigurable, capaz de manejar piezas de trabajo de diferentes formas y tamaños que requieren distintas operaciones de maquinado en sus diversas superficies. *Fuente*: Y. Koren.

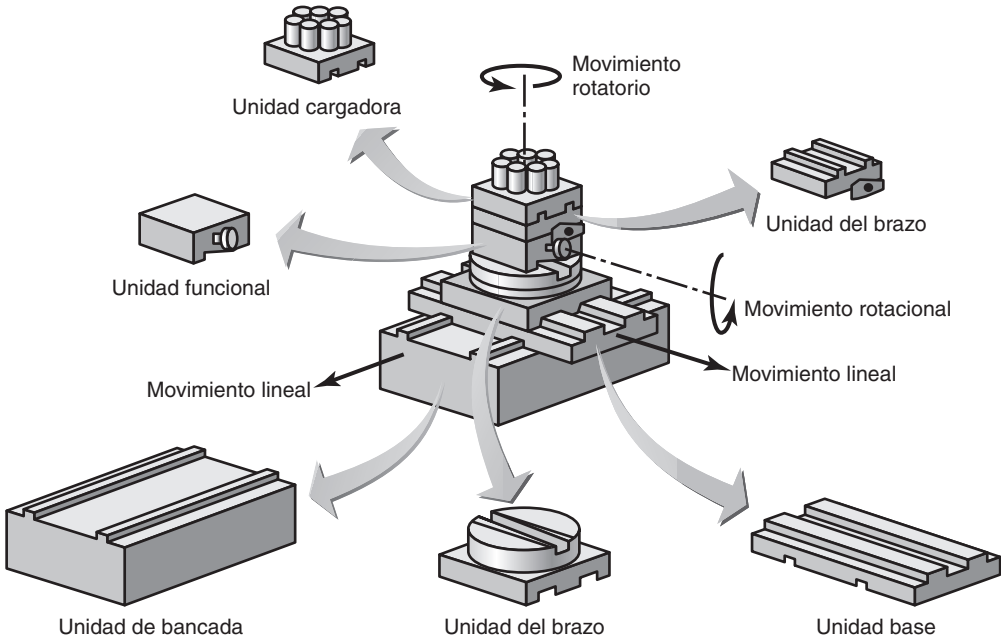


FIGURA 25.11 Esquema del ensamble de diferentes componentes de un centro de maquinado reconfigurable. *Fuente*: Y. Koren.

centro de maquinado modular. Con tal flexibilidad, la máquina puede realizar distintas operaciones de maquinado al tiempo que soporta diversos tamaños de piezas de trabajo y geometrías de partes. En la figura 25.11 se proporciona otro ejemplo en el que una máquina de cinco ejes (tres movimientos lineales y dos rotacionales) se puede reconfigurar ensamblando diferentes módulos.

Las máquinas reconfigurables prometen *(a)* mejorar la productividad y el rendimiento de las operaciones de manufactura; *(b)* reducir el tiempo de entrega para producción, y *(c)* proporcionar una respuesta rápida y de costo efectivo a las demandas del mercado (ver también capítulo 39). Estas capacidades son significativas, en particular dada la frecuente introducción de nuevos productos en un mercado global altamente competitivo, las fluctuaciones en la demanda de productos, la mezcla de los mismos y las modificaciones impredecibles en el diseño de productos.

25.3 Estructuras de las máquinas herramienta

En esta sección describimos los materiales y aspectos de diseño de las estructuras de las máquinas herramienta que son importantes en la producción de partes con características geométricas aceptables y características dimensionales y de acabado superficial.

25.3.1 Materiales

En esta sección se indican los materiales que se utilizan comúnmente o que son adecuados para las estructuras de las máquinas herramienta y se describen sus características.

- El **hierro fundido gris**, primer material utilizado en estructuras para máquinas herramienta, tiene las ventajas de poseer buena capacidad de amortiguamiento y bajo costo, pero la desventaja es que resulta pesado. La mayor parte de las estructuras de las máquinas herramienta están fabricadas con hierro fundido clase 40; algunas han sido elaboradas con clase 50 (ver tabla 12.4). Cada fundición requiere un modelo, cuyo costo aumenta de manera significativa con el tamaño de la parte.

- Las estructuras de **acero soldado** son más ligeras que las de hierro fundido. Los aceros forjados *(a)* cuentan con una amplia variedad de tamaños y formas de sección (como canales, ángulos y tubos); *(b)* tienen propiedades mecánicas deseables; *(c)* poseen buenas características de manufactura (como formabilidad, maquinabilidad y soldabilidad), y *(d)* son de bajo costo. Las estructuras fabricadas con aceros pueden tener altas relaciones de rigidez a peso, utilizando secciones transversales como tubos y canales. En cambio, su capacidad de amortiguamiento es muy baja.
- Los componentes a base de material **cerámico** se utilizan en las máquinas herramienta avanzadas para mejorar su resistencia, rigidez, resistencia a la corrosión y acabado superficial y para obtener buena estabilidad térmica. Los componentes a base de cerámicos de las máquinas herramienta se introdujeron por primera vez en la década de 1980. En la actualidad se pueden fabricar husillos y rodamientos de nitruro de silicio, que tienen mejores características de fricción y desgaste que los materiales metálicos tradicionales. Además, la baja densidad de los cerámicos los hace más adecuados que los componentes de maquinaria de alta velocidad que se someten a movimientos rápidos alternativos o rotatorios, en los que las bajas fuerzas de inercia son deseables para mantener la estabilidad del sistema, reducir las fuerzas de inercia y disminuir el tiempo sin corte en las operaciones de maquinado de alta velocidad.
- Los **compósitos** pueden ser de matriz de polímero, matriz metálica o matriz de cerámico con diversos materiales de refuerzo. Es posible adecuar las composiciones para proporcionar propiedades mecánicas idóneas en los ejes seleccionados de la máquina herramienta. Aunque son costosos y de uso limitado (en la actualidad), es probable que los compósitos se vuelvan materiales importantes para aplicaciones de alta precisión y maquinado de alta velocidad.
- Los **compósitos de granito epóxico** (con una composición característica de 93% de granito triturado y 7% de aglutinante epóxico) se utilizaron por primera vez en las rectificadoras de precisión sin centros y en las rectificadoras de interiores en la década de 1980. Estos materiales compósitos tienen diversas propiedades favorables: *(a)* buena capacidad para fundirse (que permite versatilidad de diseño en máquinas herramienta); *(b)* alta relación de rigidez a peso; *(c)* estabilidad térmica; *(d)* resistencia a la degradación ambiental, y *(e)* buena capacidad de amortiguamiento.
- El **concreto polimérico** es una mezcla de concreto y plástico triturado (por lo general, polimetilmetacrilato) y puede fundirse con facilidad, dándole las formas deseadas para maquinar bases y diversos componentes. Se introdujo por primera vez en la década de 1980 y se están desarrollando nuevas composiciones. Aunque cuenta con buena capacidad de amortiguamiento, el concreto polimérico tiene baja rigidez (alrededor de un tercio del hierro fundido clase 40) y conductividad térmica deficiente. También se puede utilizar en la construcción tipo sándwich con hierros fundidos, combinando así las ventajas de cada tipo de material. El concreto simple también puede ser vaciado en las estructuras de hierro fundido de las máquinas herramienta a fin de aumentar su masa y mejorar su capacidad de amortiguamiento. Llenar las cavidades de las bases de las máquinas herramienta con arena suelta también ha demostrado ser un medio efectivo para mejorar la capacidad de amortiguamiento.

25.3.2 Consideraciones de diseño de las máquinas herramienta

Por lo general, las consideraciones importantes en las máquinas herramienta comprenden los siguientes factores:

- Diseño, materiales y construcción.
- Materiales y construcción del husillo.
- Distorsión térmica de los componentes de la máquina.
- Compensación de errores y control del movimiento de los componentes móviles a lo largo de las guías.

Rigidez. La rigidez es un factor básico de la precisión dimensional de una máquina herramienta. Es una función de *(a)* el módulo elástico de los materiales utilizados, y *(b)* la geometría de los componentes estructurales, incluyendo el husillo, los rodamientos, el tren de accionamiento y las guías. La rigidez de la máquina se puede mejorar con el diseño, como el uso de costillas o nervaduras interiores colocadas en forma diagonal.

Amortiguamiento. El amortiguamiento es un factor muy crítico en la reducción o eliminación de la vibración y el traqueteo en las operaciones de maquinado. Principalmente, implica *(a)* los tipos de materiales utilizados, y *(b)* el tipo y la cantidad de uniones (por ejemplo, soldadas contra atornilladas) en la estructura de la máquina herramienta. Como ya se indicó, los hierros fundidos y los compósitos de matriz de polímero tienen una mejor capacidad de amortiguamiento que los metales o cerámicos. Además, cuanto mayor sea la cantidad de uniones en la estructura, mayor será el amortiguamiento.

Distorsión térmica. Un factor importante en las máquinas herramienta es la distorsión térmica de sus componentes, que contribuye de manera significativa a su falta de precisión. Se ha calculado que casi 50% de los errores de las máquinas herramienta se deben a la temperatura: sus componentes se dilatan o contraen en diversas medidas en diferentes direcciones.

Existen dos fuentes de calor en las máquinas herramienta:

1. *Fuentes internas:* como rodamientos, tornillos sinfín de bolas, guías de las máquinas, motores de los husillos, bombas y servomotores, así como la zona de corte durante el maquinado.
2. *Fuentes externas:* como fluidos de corte, hornos que se encuentren cerca, calentadores, otras máquinas cercanas, luz solar y fluctuaciones en la temperatura ambiente, aparatos de aire acondicionado, conductos de ventilación, o incluso alguien que abre o cierra una puerta o ventana.

Estas consideraciones son importantes sobre todo en el **maquinado de precisión** y **ultraprecisión,** cuyas tolerancias dimensionales y el acabado superficial se aproximan en la actualidad al nivel de los nanómetros. Las máquinas utilizadas para estas aplicaciones están equipadas con lo siguiente:

- Diversas características térmicas y geométricas de compensación de errores en tiempo real, incluyendo el modelado de calor y enfriamiento y la compensación electrónica para posiciones precisas de tornillos sinfín de bolas.
- Rodamientos de husillos hidrostáticos de gas o fluido.
- Nuevos diseños para transmisiones de tracción o fricción para movimiento lineal.
- Controles extremadamente finos de avance y posición utilizando microactuadores.
- Canales de circulación de fluidos en la base de la máquina herramienta para el mantenimiento de la estabilidad térmica.

Los componentes estructurales de la máquina herramienta se pueden fabricar con materiales de alta estabilidad dimensional y bajo coeficiente de dilatación térmica, como SuperInvar, granito, cerámicos y compósitos. La *retroalimentación* también es una alternativa viable para mejorar el desempeño de máquinas más obsoletas.

Técnicas de ensamble para componentes de máquinas herramienta. Tradicionalmente, los componentes de las máquinas herramienta se han ensamblado mediante sujetadores roscados y soldadura. En la actualidad, las técnicas de ensamble avanzado incluyen fundición integral y unión con resinas. Por medio de una tecnología de fundición híbrida se pueden fundir guías de acero (con su rigidez superior) en forma integral sobre una bancada de hierro fundido. La *unión con resinas* se utiliza para ensamblar máquinas herramienta, reemplazando la sujeción mecánica. Los adhesivos (descritos en la sección 32.4) tienen características favorables para construir máquinas herramienta, ya que no requieren preparación especial y son adecuados para ensamblar componentes metálicos y no metálicos.

Guías o correderas. Tradicionalmente, la preparación de guías en las máquinas herramienta ha requerido un esfuerzo significativo. Las guías simples de hierro fundido en las máquinas (que es lo más común) precisan de mucho tallado manual para lograr la precisión y vida de servicio necesarias. También se están investigando otros materiales, incluyendo epóxicas moldeadas y distintos recubrimientos de base polímero. Por lo general, los movimientos de diversos componentes en una máquina herramienta a lo largo de varios ejes han utilizado *tornillos sinfín de bolas* convencionales, *accionamientos de tornillos rotatorios* y *motores rotatorios*. Este sistema de componentes mecánicos y eléctricos tiene diversas desventajas, como limitaciones de velocidad, restricciones de longitud, efectos de inercia, juego en los engranes y otros errores, desgaste de los componentes y baja eficiencia.

Transmisiones de motor lineal. Un *motor lineal* es como un motor eléctrico rotatorio común que se ha desenrollado (abierto) y extendido. Éste es el mismo principio utilizado en algunos sistemas de transporte terrestre de alta velocidad, en el que los carros levitan mediante fuerzas magnéticas. En estas transmisiones las superficies de deslizamiento se separan mediante un espacio de aire, lo que produce una fricción muy baja.

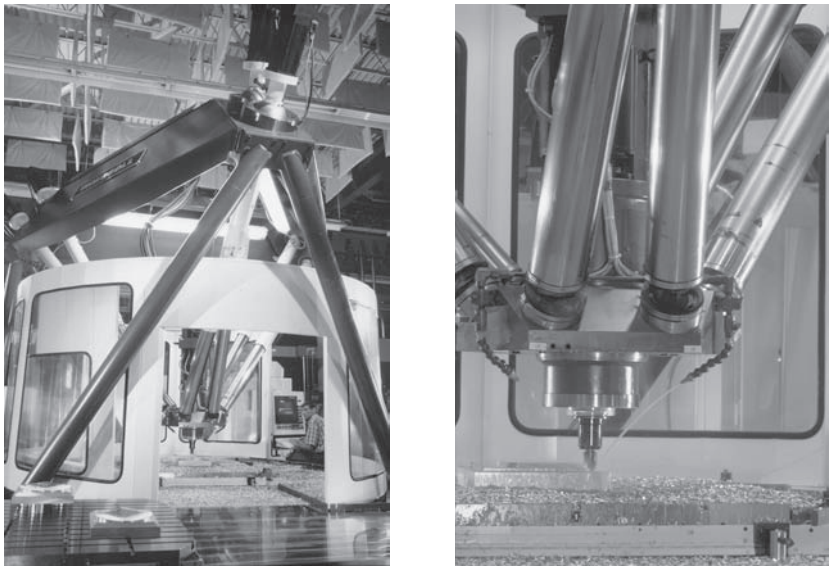
Las transmisiones de motor lineal en las máquinas herramienta tienen ventajas importantes:

- Simplicidad y mantenimiento mínimo, ya que no existen partes móviles ni conexiones mecánicas.
- Operación suave, mejor precisión de posicionamiento y repetibilidad, en un intervalo tan bajo como una micra.
- Una amplia variedad de velocidades lineales, de 1 μm/s a 5 m/s.
- Velocidades de aceleración de aproximadamente 1 a 2 g (10 a 20 m/s^2) y tan altas como 4 a 10 g para unidades más pequeñas.
- Los componentes móviles no sufren desgaste, porque no existe contacto físico entre las superficies de deslizamiento de la máquina.

Cimentaciones de las máquinas. Los materiales de las cimentaciones, su masa y la manera en que se instalan en una planta son factores que deben considerarse, ya que ayudan a reducir la vibración y no afectan de manera adversa el desempeño de otra maquinaria cercana. Por ejemplo, al instalar una rectificadora especial para rectificado de alta precisión de engranes de propulsión marina de 2.75 m (9 pies) de diámetro, la cimentación de concreto fue de 6.7 m (22 pies) de profundidad. La gran masa de concreto, combinada con la base de la máquina, redujo la amplitud de las vibraciones. Se pueden obtener incluso mejores resultados si la máquina se instala en una placa de concreto *independiente*, que se aísla del resto del piso de la planta con dispositivos antivibratorios o amortiguadores.

25.3.3 Máquinas hexápodas

Continuamente se producen desarrollos en el diseño y los materiales utilizados en estructuras y componentes de máquinas herramienta. Las metas importantes son *(a)* impartir flexibilidad de maquinado a las máquinas herramienta; *(b)* aumentar su *envolvente de maquinado* (es decir, el espacio dentro del cual se puede realizar el maquinado), y *(c)* hacerlas más ligeras. Una estructura de máquina herramienta verdaderamente innovadora es un marco independiente octaédrico (de ocho lados). Conocidas como **hexápodas** (fig. 25.12) o *máquinas con uniones cinemáticas paralelas*, se basan en un mecanismo conocido como *plataforma Stewart* (llamado así en honor de D. Stewart), invento desarrollado en 1966 y usado al principio para posicionar simuladores de cabinas de aeronaves. Su principal ventaja es que las uniones en la máquina hexápoda reciben carga axial; los esfuerzos de flexión y las deflexiones son mínimos, lo que produce una estructura extremadamente rígida.



(a) (b)

FIGURA 25.12 *(a)* Máquina herramienta hexápoda, que muestra sus componentes principales. *(b)* Vista detallada de la herramienta de corte en un centro de maquinado hexápodo. *Fuente*: Cortesía de National Institute of Standards and Technology.

La pieza de trabajo se monta sobre una mesa estacionaria; se utilizan tres pares de *tubos telescópicos* (puntales o piernas), cada uno con su propio motor y equipado con tornillos sinfín de bolas, para maniobrar un portaherramienta rotatorio de la herramienta de corte. Durante el maquinado de una parte con diversas características y curvaturas, el controlador de la máquina acorta en forma automática algunos tubos y extiende otros, de manera que el cortador pueda seguir una trayectoria especificada alrededor de la pieza de trabajo. En estas máquinas participan seis conjuntos de coordenadas (de ahí el término *hexápoda*, que significa "de seis patas"): tres conjuntos lineales y tres conjuntos rotatorios. Cada movimiento del cortador (incluso un movimiento lineal simple) se traduce en seis longitudes coordinadas de las patas moviéndose en tiempo real; estos movimientos son rápidos. En consecuencia, implican altas aceleraciones y desaceleraciones, con grandes fuerzas de inercia.

Estas máquinas *(a)* tienen alta rigidez; *(b)* no son tan masivas como los centros de maquinado; *(c)* poseen menos de una tercera parte de piezas que dichos centros; *(d)* cuentan con una gran envolvente de maquinado (y, por tanto, un mayor acceso a la zona de trabajo); *(e)* tienen la capacidad de mantener la herramienta de corte perpendicular a la superficie que se está maquinando (mejorando así la operación de maquinado), y *(f)* su flexibilidad es alta (con seis grados de libertad) en la producción de partes con diversas geometrías y tamaños sin necesidad de volver a fijar el trabajo en proceso. A diferencia de la mayoría de las máquinas herramienta, estas máquinas son básicamente portátiles. De hecho, hoy en día existen *accesorios hexápodos,* de manera que un centro de maquinado convencional se puede convertir con facilidad en una máquina hexápoda.

Se ha construido una cantidad limitada de estas máquinas. Debido a su potencial como máquinas herramienta eficientes, su desempeño se está evaluando de manera continua en relación con la rigidez, distorsión térmica, fricción dentro de los puntales, precisión dimensional, velocidad de operación, repetibilidad y confiabilidad. Actualmente, el costo de una máquina hexápoda es de unos $500,000 dólares, pero es probable que disminuya de modo significativo cuando aumenten su aceptación y uso.

25.4 Vibración y traqueteo en las operaciones de maquinado

Al describir los procesos de maquinado y las máquinas herramienta, en muchas ocasiones se observó que la *rigidez de la máquina* es tan importante como cualquier otro parámetro en el maquinado. Una baja rigidez puede provocar *vibración y traqueteo* de las herramientas de corte y los componentes de la máquina y, por lo tanto, tener efectos adversos en la calidad de los productos. La vibración y el traqueteo sin control pueden provocar lo siguiente:

- Acabado superficial deficiente, como se muestra en la región central derecha de la figura 25.13.
- Pérdida de precisión dimensional de la pieza de trabajo.
- Desgaste prematuro, formación de virutas y falla de la herramienta de corte, una consideración crítica con materiales frágiles para herramientas, como cerámicos, algunos carburos y diamante.
- Posible daño a componentes de las máquinas herramienta por vibración excesiva.
- Ruido desagradable, en particular si es de alta frecuencia, como el chillido producido al tornear latón en un torno.

La vibración y el traqueteo en el maquinado son fenómenos complejos. Existen dos tipos básicos de vibración en el maquinado: la forzada y la autoexcitada.

Vibración forzada. Por lo general, la vibración forzada es provocada por alguna fuerza *periódica* presente en la máquina herramienta, como la de transmisiones de engranes, inestabilidad de los componentes de las máquinas herramienta, desalineación, y motores y bombas. En procesos como el fresado o torneado de una flecha estriada o de una flecha con una ranura de chaveta u orificio, las vibraciones forzadas se deben al contacto periódico de la herramienta de corte cuando entra y sale de la superficie de la pieza de trabajo. (Por ejemplo, ver figs. 24.9 y 24.14).

La solución básica para la vibración forzada consiste en aislar o eliminar el elemento que produce la fuerza. Por ejemplo, si la frecuencia de la fuerza es equivalente, o casi equivalente, a la frecuencia natural de un componente del sistema de la máquina herramienta, se puede aumentar o disminuir una de las frecuencias. Es posible reducir la amplitud de la vibración incrementando la rigidez o amortiguando el sistema. Aunque cambiar los parámetros de corte no parece afectar en gran medida la magnitud de las vibraciones forzadas, puede ser útil modificar la velocidad de corte y la geometría de la

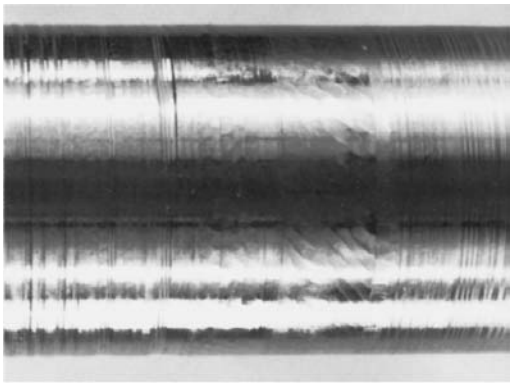


FIGURA 25.13 Marcas de traqueteo (a la derecha del centro de la fotografía) en la superficie de una parte torneada. *Fuente*: Cortesía de General Electric Company.

herramienta. También se reconoce que se puede minimizar la fuente de vibraciones cambiando la configuración de los componentes de la máquina herramienta, como si las fuerzas de accionamiento estuvieran cerca o actuaran a través del *centro de gravedad* de dicho componente. Esta estrategia reduce el momento de flexión en el componente, disminuye las deflexiones y, por lo tanto, mejora la precisión.

Vibración autoexcitada. Generalmente conocida como **traqueteo**, la vibración autoexcitada se debe a la interacción del proceso de remoción de virutas y la estructura de la máquina herramienta. Por lo común, estas vibraciones tienen una amplitud muy alta. El traqueteo suele iniciar con una perturbación en la zona de corte e incluye *(a)* el tipo de virutas producidas; *(b)* una carencia de homogeneidad en el material de la pieza de trabajo o las condiciones de su superficie, y *(c)* las variaciones en las condiciones de fricción en la interfaz de la herramienta y las virutas, según sean afectadas por los fluidos de corte y su efectividad.

El tipo más importante de vibración autoexcitada es el **traqueteo regenerativo**, que se origina cuando una herramienta corta una superficie que tiene rugosidad o alteraciones geométricas desarrolladas por el corte anterior (por ejemplo, ver figs. 21.2 y 21.21). En consecuencia, la profundidad de corte varía y las modificaciones producidas en la fuerza del mismo someten la herramienta a vibraciones. Este proceso continúa de manera repetida (de ahí el término *regenerativo*). Este tipo de vibración se puede observar con facilidad al conducir un auto sobre una carretera rugosa (el llamado *efecto lavadero*).

Por lo general, las vibraciones autoexcitadas se pueden controlar:

- Aumentando la **rigidez** y, en especial, la **rigidez dinámica** del sistema.
- Mediante **amortiguamiento.**

La rigidez dinámica se define como la relación de la amplitud de la fuerza aplicada respecto de la amplitud de la vibración. Por ejemplo, la figura 23.23b muestra el trepanado e indica que existen cuatro componentes implícitos en las deflexiones y que causan la vibración: el husillo, el brazo de soporte de la herramienta de corte, la broca y la herramienta de corte. La experiencia y el análisis indicarían que, a menos que todos los componentes tengan suficiente rigidez, es probable que una operación produzca traqueteo, empezando con una vibración torsional alrededor del eje del husillo y torsión del brazo. Algunos ejemplos son las brocas largas y delgadas que pueden sufrir vibraciones torsionales y las herramientas de corte que son largas o no están bien soportadas (como las que se presentan esquemáticamente en la fig. 23.3) que también producirían vibración y traqueteo.

Factores que influyen en el traqueteo. Se ha observado que la tendencia al traqueteo durante el maquinado es proporcional a las fuerzas de corte y a la profundidad y anchura de éste. Puesto que dichas fuerzas aumentan con la resistencia (de ahí la dureza del material de la pieza de trabajo), por lo general la tendencia al traqueteo aumenta al incrementarse la dureza. Por lo tanto, las aleaciones de aluminio y magnesio tienen menor tendencia al traqueteo que los aceros inoxidables martensíticos y de endurecimiento por precipitación, las aleaciones de níquel y las aleaciones de alta temperatura y refractarias.

Otro factor importante en el traqueteo es el tipo de viruta generado durante las operaciones de corte. Las virutas continuas implican fuerzas estables de corte; en consecuencia, dichas virutas generalmente no provocan traqueteo. En cambio, las virutas discontinuas y las aserradas (fig. 21.5) sí pueden hacerlo. Estas virutas son periódicas y las variaciones de fuerza resultantes durante el corte pueden ocasionar traqueteo. Otros factores que también contribuirían al traqueteo son el uso de cortadores desafilados, la falta de fluidos de corte y el desgaste de las guías y los componentes de las máquinas herramienta.

Amortiguamiento. El amortiguamiento se define como la velocidad a la que decaen las vibraciones. Este efecto puede demostrarse con los amortiguadores de un automóvil, al oprimir la parte delantera o posterior del vehículo y observando la rapidez con que se detiene el movimiento vertical. El amortiguamiento es un factor básico en el control de la

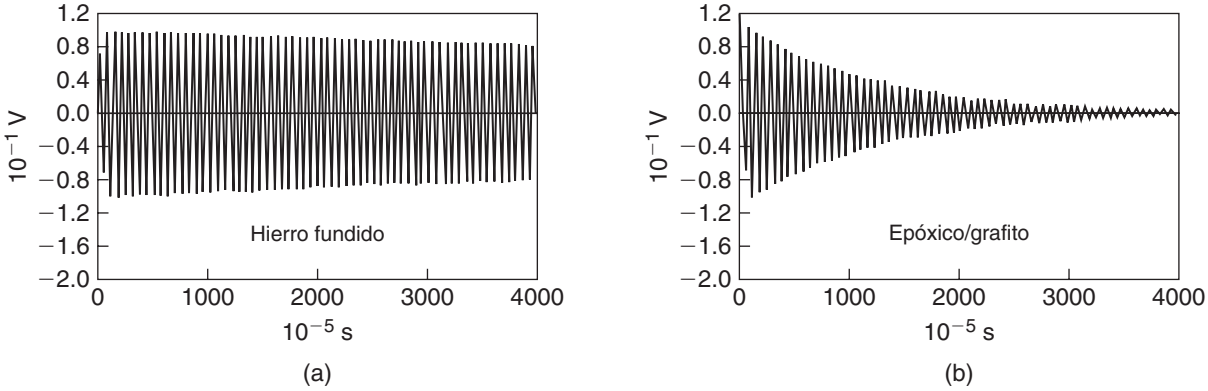


FIGURA 25.14 Capacidad relativa de amortiguamiento de *(a)* hierro fundido gris, y *(b)* un material compósito de epóxico y granito. La escala vertical es la amplitud de vibración y la escala horizontal es el tiempo.

vibración y el traqueteo de las máquinas herramienta y consiste en amortiguamiento interno y externo.

El **amortiguamiento interno** es producido por la pérdida de energía en los materiales durante la vibración. Por ejemplo, los aceros tienen una capacidad de amortiguamiento inferior a la del hierro fundido gris, cuya capacidad es asimismo menor que la de los materiales compósitos (fig. 25.14). La diferencia en la capacidad de amortiguamiento de los materiales se puede observar al golpearlos con un mazo y escuchando el sonido. Por ejemplo, golpee un timbal de latón, una pieza de concreto y una pieza de madera y escuche las variaciones en el sonido.

Las *uniones atornilladas* en la estructura de una máquina herramienta también son una fuente de amortiguamiento; su efectividad depende del tamaño, la posición y el número de uniones. Debido a que la fricción disipa la energía, los movimientos relativos pequeños a lo largo de las uniones secas (sin lubricar) disipan energía y, por lo tanto, ayudan a mejorar el amortiguamiento. Como todas las máquinas herramienta constan de una cantidad de componentes grandes y pequeños ensamblados por varios medios, este tipo de amortiguamiento es acumulativo. En la figura 25.15 se observa cómo aumenta el amortiguamiento general conforme se eleva la cantidad de componentes en un torno y sus áreas de contacto. Sin embargo, como era de esperarse, al incrementarse la cantidad de uniones suele reducirse la rigidez general del sistema de la máquina.

En algunas barras de mandrinado y portaherramientas se ha implementado otro método de amortiguamiento para reducir o eliminar la vibración y el traqueteo. Como se describe e ilustra en la figura 23.17b, el amortiguamiento se logra por medios mecánicos, disipando la energía mediante la resistencia a la fricción de los componentes dentro de la estructura de la barra de mandrinado.

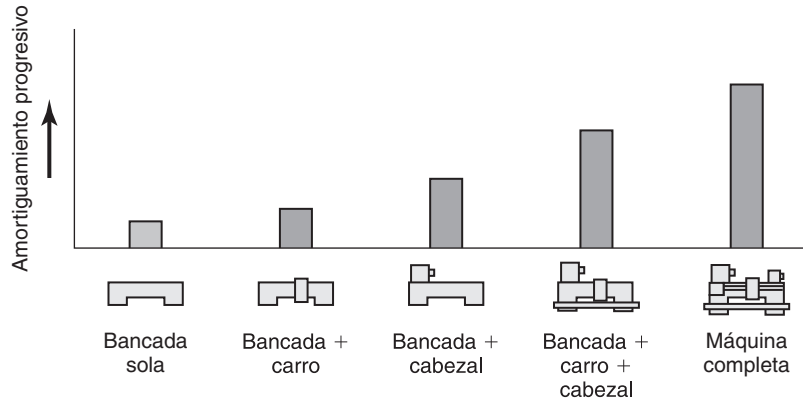


FIGURA 25.15 Amortiguamiento de vibraciones en función de la cantidad de componentes en un torno. Las uniones disipan energía; a mayor cantidad de uniones, mayor capacidad de amortiguamiento de la máquina. *Fuente*: J. Peters.

El **amortiguamiento externo** se logra con amortiguadores externos que son similares a los de automóviles o máquinas. Para este propósito se han desarrollado e instalado amortiguadores especiales para vibración. Además, las máquinas herramienta también pueden colocarse en pisos y cimentaciones especialmente preparados para aislar vibraciones forzadas, como las de máquinas cercanas colocadas en el mismo piso.

Lineamientos para reducir la vibración y el traqueteo. Con base en lo ya indicado, es evidente que se debe lograr un equilibrio entre el incremento de rigidez de una máquina herramienta y la conveniencia de aumentar el amortiguamiento, sobre todo en la construcción de máquinas herramienta de alta precisión. En diversas secciones de los capítulos 23 y 24 se han señalado los lineamientos generales para reducir la vibración y el traqueteo en las operaciones de maquinado, los cuales se pueden resumir de la siguiente manera:

- Minimizar la saliente de las herramientas.
- Mejorar la rigidez de los dispositivos de sujeción de trabajo y soportar con firmeza las piezas de trabajo.
- Modificar la geometría de las herramientas y cortadores para minimizar las fuerzas o hacerlas uniformes.
- Cambiar los parámetros de proceso, como velocidad y profundidad de corte, avance y fluidos de corte.
- Aumentar la rigidez de la máquina herramienta y sus componentes mejorando el diseño, utilizando secciones transversales y materiales más grandes con un módulo elástico mayor.
- Mejorar la capacidad de amortiguamiento de la máquina herramienta.

25.5 Maquinado de alta velocidad

Con las continuas demandas de mayor productividad y menores costos de producción, desde finales de la década de 1950 se han efectuado investigaciones para aumentar la velocidad de corte y de remoción de material en el maquinado, sobre todo para aplicaciones en las industrias aeroespacial y automotriz.

El término "alta" en *maquinado de alta velocidad* (HSM, por sus siglas en inglés) es de algún modo relativo; como guía general, se puede definir un intervalo aproximado de velocidades de corte de la siguiente manera:

Velocidad alta: 600 a 1800 m/min (2000 a 6000 pies/min)
Velocidad muy alta: 1800 a 18,000 m/min (6000 a 60,000 pies/min)
Velocidad ultraalta: >18,000 m/min

En la actualidad, las *velocidades de giro del husillo* en las máquinas herramienta son hasta de 50,000 rpm, aunque por lo general la industria automotriz las ha limitado a 15,000 rpm para mejorar la confiabilidad y tener un tiempo muerto menor en caso de que ocurra alguna falla. La *potencia del husillo* requerida en el maquinado de alta velocidad suele ser de 0.004 W/rpm (0.005 hp/rpm), mucho menor que la del maquinado tradicional, que por lo general es de 0.2 a 0.4 W/rpm (0.25 a 0.5 hp/rpm). Hoy en día, las velocidades de avance en el maquinado de alta velocidad son hasta de 1 m/s (3 pies/s) y las velocidades de aceleración de los componentes de las máquinas herramienta son muy elevadas.

Los diseños de los husillos para grandes velocidades requieren *alta rigidez* y *precisión* y, por lo general, comprenden un motor eléctrico integral. La armadura se instala en la flecha y el estator se coloca en la pared de la carcasa del husillo. Los rodamientos pueden ser elementos giratorios o hidrostáticos; este último es más conveniente porque necesita menos espacio que el primero. Debido a los *efectos de la inercia* durante la aceleración y desaceleración de los componentes de las máquinas herramienta, el uso de materiales ligeros (como los cerámicos y materiales compósitos) es un factor que debe considerarse.

Por supuesto, la selección de los materiales adecuados para las herramientas de corte es una consideración importante. Con base en nuestros temas sobre herramientas y su selección en el capítulo 22 (en particular si se revisa la tabla 22.2), al parecer (dependiendo del material de la pieza de trabajo) los carburos con recubrimiento de fases múltiples, los cerámicos, el nitruro de boro cúbico y el diamante son los materiales para herramientas más apropiados para esta operación.

El maquinado de alta velocidad debe considerarse principalmente para operaciones en las que el **tiempo de corte** sea una parte básica del tiempo en la operación de maquinado en general. Como se describe en la sección 38.6 y el capítulo 40, el **tiempo sin corte** y otros factores diversos son esenciales en la evaluación global de los beneficios del maquinado de alta velocidad para una aplicación en particular.

El trabajo de investigación y desarrollo sobre maquinado de alta velocidad continúa, en particular para el torneado, fresado, mandrinado y taladrado de aleaciones de aluminio, aleaciones de titanio, aceros y superaleaciones. Se ha recabado mucha información en relación con el efecto de la alta velocidad de corte en *(a)* el tipo de virutas producidas; *(b)* las fuerzas y la potencia de corte; *(c)* las temperaturas generadas; *(d)* el desgaste y la falla de las herramientas, *(e)* el acabado y la integridad de la superficie, y *(f)* la economía del proceso.

Estos estudios indican que el maquinado de alta velocidad es económico para ciertas aplicaciones específicas. Por ejemplo, se ha implementado en el maquinado de *(a)* componentes estructurales de aluminio para aeronaves; *(b)* propulsores de submarinos de 6 m (20 pies) de diámetro, fabricados de aleación de níquel, aluminio y bronce y con un peso de 55,000 kg (50 toneladas), y *(c)* motores automovilísticos, con cinco a diez veces la productividad del maquinado tradicional. El maquinado de alta velocidad de contornos complejos de tres y cinco ejes ha sido posible gracias a los avances en la tecnología de control de CNC, como se describe respecto de los *centros de maquinado* en este capítulo y en el capítulo 37.

Otro factor fundamental en la adopción del maquinado de alta velocidad ha sido el requisito para obtener una mejora adicional en las tolerancias dimensionales de las operaciones de corte. Como ya se vio en la figura 21.14, al aumentar la velocidad de corte, la viruta elimina cada vez más el calor generado, por lo que la herramienta y (más importante) la pieza de trabajo mantienen una temperatura cercana a la del medio ambiente. Esto resulta benéfico, porque no existe dilatación térmica ni alabeo de la pieza durante el maquinado.

Las características importantes de las máquinas herramienta en el maquinado de alta velocidad se pueden resumir de la siguiente manera:

1. Diseño del husillo para obtener rigidez, precisión y equilibrio a velocidades rotacionales muy altas.
2. Características de los rodamientos.
3. Inercia de los componentes de la máquina herramienta.
4. Transmisiones de avance rápido.
5. Selección de las herramientas de corte apropiadas.
6. Parámetros de procesamiento y su control por computadora.
7. Dispositivos de sujeción de trabajo que puedan soportar altas fuerzas centrífugas.
8. Sistemas efectivos de remoción de viruta a muy altas velocidades de remoción de material.

ESTUDIO DE CASO 25.1 Maquinado en seco de alta velocidad de motores de hierro fundido

El maquinado de alta velocidad tiene claras ventajas económicas, siempre que se eviten daños y traqueteo al husillo. De manera similar, el maquinado en seco se reconoce como una estrategia prometedora para resolver problemas ambientales asociados

con los fluidos de corte. Por desgracia, con frecuencia se ha percibido que las dos estrategias no pueden aplicarse de manera simultánea, porque sus altas velocidades producirían una vida corta de la herramienta. Sin embargo, el maquinado en seco de alta velocidad es posible con hierro fundido y aluminio; a continuación se hace un análisis para operaciones de desbaste, acabado y producción de orificios en una cabeza de cilindro de hierro fundido para un motor de 4.3 litros.

El maquinado en seco de alta velocidad es una operación demandante. La disipación de calor sin refrigerante líquido necesita recubrimientos de alto rendimiento y materiales para herramientas resistentes al calor. Los materiales de las herramientas de corte son cerámicos o cBN debido al intenso calor generado en el proceso. Además, se requieren máquinas herramienta con gran potencia y husillos con altos niveles de rigidez y potencia. El traqueteo puede ser un problema en el maquinado de alta velocidad, por lo que deben desarrollarse programas de CNC que mantengan los parámetros del proceso dentro de una ventana de operación en la que se asegure que no existe traqueteo.

La clave para el maquinado en seco de la cabeza de hierro fundido es el uso de dos técnicas avanzadas. La primera es el *maquinado de media luna roja*, en el que se generan altas temperaturas en la pieza de trabajo frente a la herramienta, creando un arco rojo visible (de ahí el nombre del proceso). La segunda técnica es el maquinado de limpieza fina, que utiliza aire de alta presión en el interior del husillo a fin de retirar las virutas que normalmente se eliminarían con un fluido de corte. El maquinado de media luna roja se refiere a las operaciones de fresado que ocurren a altas velocidades tanto de avance como de husillo. Esta combinación reduce la fuerza de empuje contra la pieza de trabajo, en comparación con una operación estándar de fresado. El maquinado de media luna roja concentra calor en el material frente a la herramienta y puede alcanzar de 600 °C a 700 °C (1100 °F a 1300 °F) en algunos casos. Esto se debe a que (a altas velocidades) el calor generado se localiza en la zona de cizallamiento o de corte y no tiene tiempo de conducirse a la pieza de trabajo o a la herramienta. Esta zona de alta temperatura produce un destello rojo que es benéfico para los hierros fundidos, porque el calor aumenta la ductilidad y reduce la resistencia de los mismos, lo que permite un maquinado con mucha mayor eficiencia. La parte no se distorsiona, porque la mayoría del calor se retiene en la viruta y se retira antes de que se transfiera a la pieza de trabajo. En la tabla 25.1 se incluye una comparación entre el maquinado de media luna roja y el maquinado convencional para esta aplicación en particular.

El *fresado de acabado* se logra mediante estrategias de maquinado de bajo empuje, por lo general utilizando cortadores con menos insertos por cortador, a menor avance por revolución y mayores velocidades superficiales que el maquinado convencional. El maquinado de menor fuerza de empuje tiene la ventaja adicional de que el diseño del sujetador del trabajo se simplifica, permitiendo con frecuencia mejor acceso a partes complicadas. En el maquinado de acabado de monobloques de hierro fundido para motores se utilizan insertos de cBN. Aunque éste es más costoso que las alternativas de insertos de carburo o de cerámicos, la vida de la herramienta es más larga y se requieren menos preparaciones, por lo que el costo del inserto por parte

TABLA 25.1

Comparación de condiciones de maquinado convencional contra maquinado de media luna roja

Parámetro	Convencional	Media luna roja
Velocidad superficial (pies/min)	250	5000
Velocidad del husillo (rpm)	160	3200
Avance (pulgadas/rev)	0.020	0.005
Número de insertos	10	5
Fuerza de empuje radial (libras)	4300	262
Velocidad de remoción de metal ($pulg^3$/min)	32	80

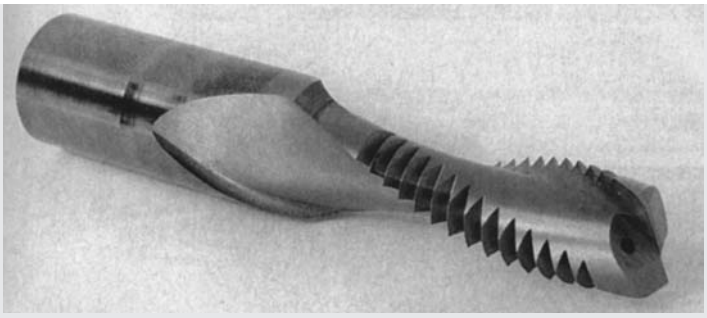


FIGURA 25.16 Herramienta de alta velocidad para fresado de un solo punto, biselado, contrataladrado y roscado de orificios. *Fuente*: Cortesía de Makino, Inc.

maquinada puede ser comparable o menor al de los materiales convencionales para herramientas.

El *maquinado de limpieza fina* es un proceso que emplea aire a alta presión a través del husillo para desechar las virutas y eliminar calor de la herramienta de corte. La presión del aire necesaria es de 1100 a 1380 kPa (160 a 200 psi) para reducir la temperatura de la pieza de trabajo en casi 50%. El maquinado de limpieza fina es adecuado para la mayoría de los orificios poco profundos (relaciones de profundidad a diámetro de cinco o menos), que se adapta a la mayoría de las aplicaciones automotrices. Los orificios más profundos se producen utilizando operaciones de taladrado más convencionales. La producción de orificios profundos, el fresado con una sola herramienta, biselado, contrataladrado y roscado de orificios, se pueden lograr usando herramientas como la que se muestra en la figura 25.16. Este proceso emplea control de CNC de alta velocidad y precisión a fin de mover una herramienta de diámetro pequeño en un patrón helicoidal para formar y roscar los orificios. Además, esto permite que una herramienta simple maquine orificios de diferentes diámetros.

Fuente: Adaptado de "High Speed, Dry Machining Can Cut Cycle Times and Cost", por G. Hyatt, *Manufacturing Engineering*, Vol. 119, No. 3, 1997.

25.6 Maquinado duro

Ya se indicó que al aumentar la dureza de la pieza de trabajo su maquinabilidad disminuye, y el desgaste y la fractura de la herramienta, así como el acabado y la integridad superficial, pueden convertirse en problemas significativos. Como se describe en los capítulos 26 y 27, existen muchas otras técnicas mecánicas (incluyendo maquinado abrasivo), no mecánicas y avanzadas de remoción de material, para metales y aleaciones duros o endurecidos, que resultan económicas. Sin embargo, aún es posible aplicar procesos tradicionales de maquinado a metales y aleaciones duros seleccionando un material adecuado para herramientas duras y utilizando máquinas herramienta con alta rigidez, potencia y precisión.

Un ejemplo común es el maquinado de acabado de ejes, engranes, piñones y diversos componentes automovilísticos de acero tratado térmicamente (45 a 65 HRC) mediante herramientas de corte de nitruro de boro cúbico policristalino (PcBN), cermet o cerámicos. Conocido como *maquinado duro* o *torneado duro*, este proceso produce partes maquinadas con buena precisión dimensional, buen acabado superficial (tan bajo como 0.25 μm o 10 μpulg) e integridad superficial. *(a)* La potencia disponible; *(b)* la rigidez estática y dinámica de la máquina herramienta y su husillo, y *(c)* los dispositivos de sujeción del trabajo y los soportes son factores importantes.

Como se describe en la sección 25.3, las tendencias en el diseño y la construcción de máquinas herramienta modernas incluyen el uso de rodamientos hidrostáticos para

los husillos y las guías. El cabezal y la bancada inclinada en las máquinas (ver fig. 23.10a) se pueden fabricar de *materiales compósitos graníticos* con propiedades únicas. La selección de la herramienta de corte y la preparación del filo también son importantes para evitar fallas prematuras en el maquinado duro.

A partir de consideraciones técnicas, económicas y ecológicas, el torneado duro puede competir de manera exitosa con el proceso de *rectificado* y con la calidad y las características que se aproximan a las producidas en máquinas de rectificado. Por ejemplo, en algunos casos específicos se ha demostrado que el torneado duro es tres veces más rápido que el rectificado, requiere pocas operaciones para acabar la parte y utiliza cinco veces menos energía. En el ejemplo 26.4 se presenta un modelo comparativo detallado del torneado duro contra el rectificado.

25.7 Maquinado de ultraprecisión

A principios de la década de 1960, se incrementó la demanda de manufactura de precisión de componentes para aplicaciones en computadoras, electrónicas, nucleares y de defensa. Algunos ejemplos incluyen espejos ópticos, discos de memoria para computadoras y tambores para fotocopiadoras. Los requisitos de acabado superficial se encuentran en el intervalo de las decenas de *nanómetros* (10^{-9} m, 0.001 μm, o 0.04 μpulg) y las tolerancias dimensionales y precisiones de forma están en el intervalo de los μm y sub-μm.

Esta tendencia a la manufactura de ultraprecisión continúa creciendo. Las modernas **máquinas herramienta de ultraprecisión**, con controles avanzados por computadora, pueden posicionar una herramienta de corte con una precisión aproximada a 1 nm, como se puede notar en la figura 25.17. En ésta se observa además que en hoy en día están obteniendo precisiones mayores mediante procesos como el maquinado abrasivo, maquinado por haz de iones y manipulación molecular. En los capítulos 26 y 27 se describen los *procesos de maquinado abrasivo* y *maquinado avanzado*, respectivamente. En los capítulos 28 y 29 se cubren los temas de *micromaquinado*, *fabricación de sistemas microelectrónicos* y *microelectromecánicos* (MEMS) y *nanomanufactura*.

La herramienta de corte para aplicaciones de *maquinado de ultraprecisión* es casi exclusivamente un diamante monocristalino; el proceso se conoce como **torneado con diamante**. La herramienta de diamante tiene un filo de corte pulido con un radio muy pequeño, de unos cuantos nm. El desgaste del diamante puede ser un problema significativo

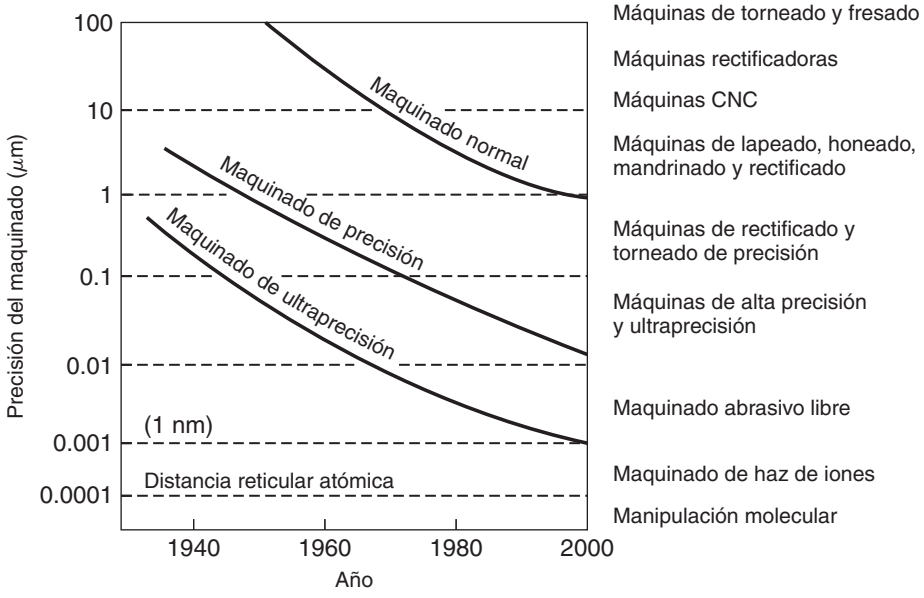


FIGURA 25.17 Mejoras en la precisión del maquinado a través de los años, utilizando tecnologías de maquinado de ultraprecisión. *Fuente*: C. J. McKeown, N. Taniguchi, G. Byrne, D. Dornfeld y B. Denkena.

y los avances recientes incluyen el *torneado criogénico con diamante*, en el que el sistema de herramientas se enfría con nitrógeno líquido a una temperatura aproximada de −120 °C (−184 °F).

Los materiales de la pieza de trabajo para maquinado de ultraprecisión incluyen aleaciones de cobre y de aluminio, plata, oro, níquel no electrolítico, materiales infrarrojos y plásticos (acrílicos). Con profundidades de corte en el nivel de los nm, los materiales duros y frágiles generan virutas continuas en un proceso conocido como **corte a régimen dúctil**. (Ver también *rectificado a régimen dúctil* en la sección 26.3.4). Los cortes más profundos en materiales frágiles producen virutas discontinuas.

Las máquinas herramienta para estas aplicaciones se construyen con una precisión muy alta y rigidez elevada de la máquina, el husillo y los dispositivos de sujeción del trabajo. Estas máquinas de ultraprecisión (partes de las cuales se fabrican con materiales estructurales de baja dilatación térmica y buena estabilidad dimensional, ver sección 25.3) se encuentran en un ambiente libre de polvo (*cuartos limpios*), en el que se controla la temperatura dentro de una fracción de grado.

Hasta donde sea posible, deben evitarse las vibraciones de las fuentes internas de la máquina (y de las externas, como las máquinas cercanas en el mismo piso). Se utiliza metrología láser para controlar el avance y la posición, y las máquinas son equipadas con sistemas altamente avanzados de control computarizado y con características de compensación de errores térmicos y geométricos.

Consideraciones generales para maquinado de precisión. Existen diversos factores importantes en el maquinado y en las máquinas herramienta de precisión y ultraprecisión, hasta cierto punto similares a los del maquinado de alta velocidad:

1. Diseño, construcción y ensamble de las máquinas herramienta, que proporcionan rigidez, amortiguamiento y precisión geométrica.
2. Control del movimiento de diversos componentes, tanto lineales como rotacionales.
3. Tecnología del husillo.
4. Crecimiento térmico de la máquina herramienta, compensación de dicho crecimiento y control del ambiente de las máquinas herramienta.
5. Selección y aplicación de las herramientas de corte.
6. Parámetros de maquinado.
7. Desempeño y control en tiempo real de la máquina herramienta e implantación de un sistema de supervisión de las condiciones de la herramienta.

25.8 Economía del maquinado

En la Introducción a la parte IV, se indicó que las limitaciones importantes de las operaciones de maquinado incluyen *(a)* tiempo relativamente más largo para maquinar una parte, en comparación con el formado y moldeado; *(b)* la necesidad de reducir el tiempo sin corte, y *(c)* el hecho de que el material se desperdicia de manera inevitable. A pesar de estas desventajas, el maquinado es indispensable, en particular para producir formas complejas en piezas de trabajo, con características externas e internas, y para obtener una alta precisión dimensional y acabado superficial.

Ya se indicaron los parámetros de los materiales y procesos que son importantes para lograr operaciones de maquinado eficientes. Sin embargo, al analizar la *economía* del maquinado, se deben considerar muchos otros factores. Como se describe con mayor detalle en el capítulo 40, estos factores incluyen los costos comprendidos en *(a)* máquinas herramienta, dispositivos y aditamentos de sujeción de las piezas y herramientas de corte; *(b)* mano de obra y gastos generales; *(c)* tiempo invertido en preparar la máquina para una operación en particular; *(d)* manejo y movimiento del material, como carga de la pieza en bruto y descarga de la pieza maquinada; *(e)* calibrado de la precisión dimensional y acabado superficial, y *(f)* tiempos de corte y tiempos sin corte.

Es importante considerar el tiempo real de maquinado. También recuérdese lo tratado en la sección 25.5 sobre la importancia del tiempo sin corte para evaluar la economía del maquinado de alta velocidad. A menos que el tiempo sin corte sea una parte significativa del tiempo de piso a piso, no debe considerarse el maquinado de alta velocidad, excepto cuando sus demás beneficios sean importantes.

Minimización del costo unitario de maquinado. Como en todos los procesos y operaciones de manufactura, los parámetros importantes del maquinado se pueden seleccionar y especificar de manera que se minimice el *costo unitario de maquinado* (así como el *tiempo unitario de maquinado*). Para lograr este objetivo, se han desarrollado diversos métodos y estrategias. Con el uso creciente de *software* y computadoras de fácil manejo, hoy en día esta tarea se ha vuelto más sencilla. Sin embargo, para que los resultados sean confiables, es fundamental que los datos ingresados sean precisos y actualizados. A continuación se describe uno de los métodos más simples y comunes para analizar los costos de maquinado en una operación de torneado.

En el maquinado de una parte mediante torneado, el costo unitario total del maquinado (C_p) consiste en:

$$C_p = C_m + C_s + C_l + C_t \tag{25.1}$$

donde

C_m = Costo de maquinado.
C_s = Costo de la preparación para el maquinado; montaje del cortador, preparación de los soportes y de la máquina herramienta para la operación.
C_l = Costo de carga, descarga y manejo de la máquina.
C_t = Costo del herramental, con frecuencia sólo alrededor de 5% de la operación total de corte. Por consiguiente, usar la herramienta menos costosa no siempre es una manera eficaz de reducir los costos de maquinado.

El **costo del maquinado** se obtiene mediante la fórmula:

$$C_m = T_m(L_m + B_m) \tag{25.2}$$

donde T_m es el tiempo unitario de maquinado, L_m el costo por mano de obra del operador de producción por hora y B_m la carga fiscal o cargo por gastos generales de la máquina, incluyendo depreciación, mantenimiento, mano de obra indirecta y similares. El **costo de preparación** por pieza es una cifra determinada en dólares. El **costo de carga, descarga** y **manejo de la máquina** es:

$$C_l = T_l(L_m + B_m) \tag{25.3}$$

donde T_l es el tiempo comprendido en la carga y descarga de la parte, el cambio de velocidades, las velocidades de avance y así sucesivamente. El **costo de las herramientas** es:

$$C_t = \frac{1}{N_p}\left[T_c(L_m + B_m) + T_g(L_g + B_g) + D_c\right] \tag{25.4}$$

donde N_p es el número de partes maquinadas por rectificado de herramienta, T_c el tiempo requerido para cambiar la herramienta, T_g el tiempo requerido para rectificar herramientas, L_g el costo por hora de mano de obra del operador del rectificador de herramientas, B_g el cargo fiscal por hora del rectificador de herramientas y D_c la depreciación en dólares de la herramienta por rectificado.

El **tiempo** necesario para producir una parte es

$$T_p = T_l + T_m + \frac{T_c}{N_p} \tag{25.5}$$

donde T_m debe calcularse para una operación específica. Por ejemplo, considérese una operación de torneado; el tiempo de maquinado es:

$$T_m = \frac{l}{fN} = \frac{\pi ld}{fV} \tag{25.6}$$

donde l es la longitud de corte, f el avance, N son las rpm de la pieza de trabajo, d es el diámetro de la pieza y V la velocidad de corte. Obsérvese que se deben utilizar las unidades apropiadas en todas estas ecuaciones. Con base en la ecuación de Taylor de vida útil de la herramienta (ecuación 21.20a), tenemos que:

$$VT^n = \mathrm{C}$$

Por lo que,

$$T = \left(\frac{\mathrm{C}}{V}\right)^{1/n} \tag{25.7}$$

donde T es el tiempo (en minutos) requerido para sufrir un desgaste del flanco de cierta dimensión, después del cual la herramienta tiene que rectificarse de nuevo o cambiarse. Por lo tanto, la cantidad de piezas por rectificado de herramienta es simplemente:

$$N_p = \frac{T}{T_m} \tag{25.8}$$

La combinación de las ecuaciones 25.6, 25.7 y 25.8 da

$$N_p = \frac{f\mathrm{C}^{1/n}}{\pi l d V^{(1/n)-1}} \tag{25.9}$$

Ahora el **costo unitario** (C_p) en la ecuación 25.1 puede definirse en términos de diversas variables. Con el fin de obtener la velocidad óptima de corte y también la vida óptima de la herramienta para **costo mínimo**, se tiene que diferenciar C_p respecto de V e igualar a cero. Por lo que,

$$\frac{\partial C_p}{\partial V} = 0 \tag{25.10}$$

Así encontramos que la velocidad óptima de corte (V_o) es:

$$V_o = \frac{C(L_m + B_m)^n}{\{[(\frac{1}{n}) - 1][T_c(L_m + B_m) + T_g(L_g + B_g) + D_c]\}^n} \tag{25.11}$$

y la vida óptima de la herramienta (T_o) es:

$$T_o = [(\tfrac{1}{n}) - 1]\frac{T_c(L_m + B_m) + T_g(L_g + B_g) + D_c}{L_m + B_m} \tag{25.12}$$

Para encontrar la velocidad óptima de corte y la vida óptima de la herramienta para **máxima producción**, se tiene que diferenciar T_p respecto de V e igualar a cero. Por lo que

$$\frac{\partial T_p}{\partial V} = 0 \tag{25.13}$$

Ahora, la **velocidad óptima de corte** es:

$$V_o = \frac{C}{\{[(\frac{1}{n}) - 1]T_c\}^n} \tag{25.14}$$

y la **vida óptima de la herramienta** es:

$$T_o = [(\tfrac{1}{n}) - 1]T_c \tag{25.15}$$

En la figura 25.18 se proporciona un diagrama cualitativo del costo unitario y tiempo unitario mínimo (es decir, la máxima velocidad de producción). El costo de una superficie maquinada también depende del acabado requerido; el costo de maquinado aumenta rápidamente con un acabado superficial más fino.

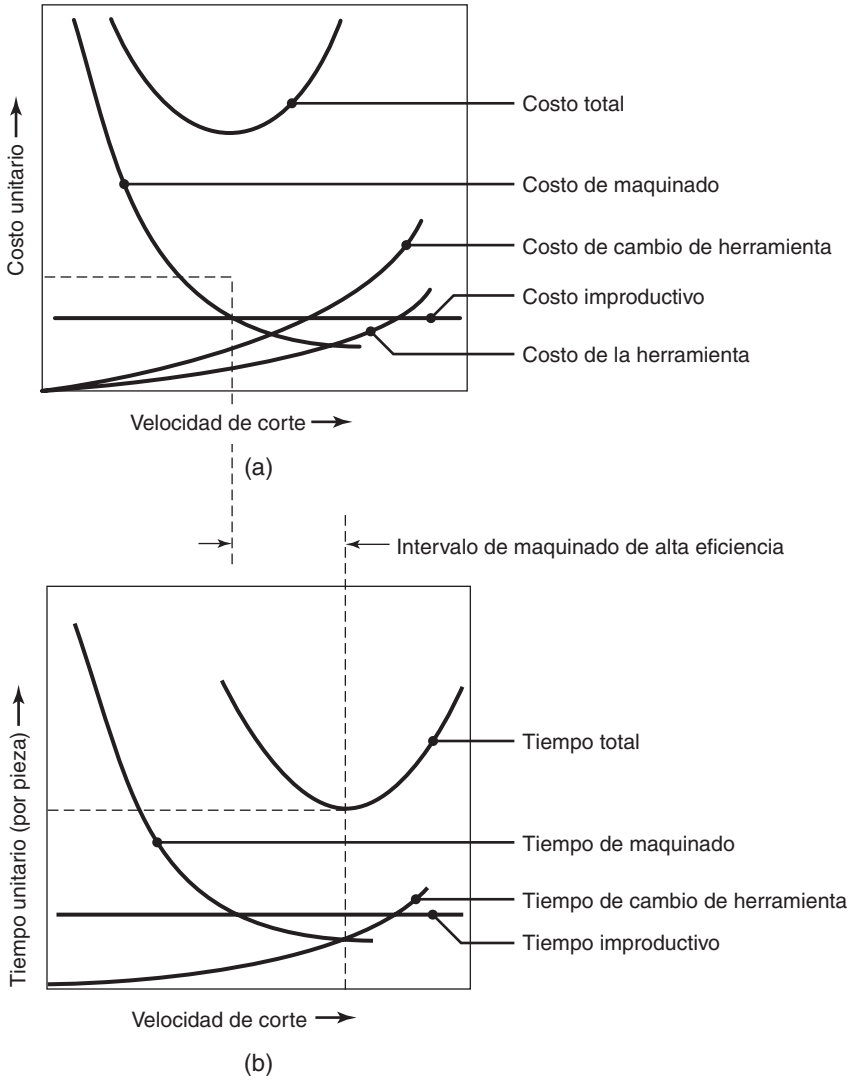


FIGURA 25.18 Gráficos que muestran: *(a)* costo unitario, y *(b)* tiempo unitario (por pieza) en maquinado. Obsérvese las velocidades óptimas para costo y tiempo. El intervalo entre las dos se conoce como intervalo de maquinado de alta eficiencia.

Este análisis indica la importancia de identificar todos los parámetros relevantes en una operación de maquinado, determinar diversos factores de costo, obtener curvas relevantes de la vida de la herramienta para la operación específica y medir en forma adecuada los diversos intervalos de tiempo comprendidos en toda la operación. La importancia de obtener datos precisos se muestra con claridad en la figura 25.18, ya que los cambios pequeños en la velocidad de corte pueden tener un efecto significativo en el costo o tiempo unitarios mínimos.

RESUMEN

- Por su versatilidad y capacidad de efectuar varias operaciones de maquinado en piezas de trabajo pequeñas y grandes de diversas formas, los centros de maquinado se encuentran hoy en día entre las máquinas herramienta más importantes. Su selección depende de factores como la complejidad de la parte, la cantidad y el tipo de operaciones de maquinado por realizar, la cantidad de herramientas de corte requeridas y la precisión dimensional y velocidad de producción necesarias.

- La vibración y el traqueteo en el maquinado son elementos que deben considerarse por lo que respecta a la precisión dimensional y el acabado superficial de la pieza de trabajo, así como en la vida útil de la herramienta. La rigidez y capacidad de amortiguamiento de las máquinas herramienta son factores importantes en el control de la vibración y el traqueteo. Continuamente se desarrollan nuevos materiales para utilizarse en la construcción de estructuras de máquinas herramienta.
- La economía de los procesos de maquinado depende de costos como los siguientes: improductivos, de maquinado, por cambio de herramienta y de las herramientas. Las velocidades óptimas de corte pueden determinarse para tiempos y costos unitarios mínimos de maquinado.

TÉRMINOS CLAVE

Amortiguamiento
Brazo de intercambio de herramientas
Cambiador automático de herramientas
Cambiador automático de tarimas (pallets)
Centro de maquinado
Centro de torneado
Centro universal de maquinado
Construcción modular
Envolvente de trabajo
Estación de verificación de herramientas y partes
Hexápodas
Intervalo de maquinado de alta eficiencia
Máquinas reconfigurables
Recolección de virutas
Rigidez
Rigidez dinámica
Sondas o palpadores de contacto
Tarimas (pallets)
Transmisión de motor lineal
Traqueteo
Traqueteo regenerativo
Vibración autoexcitada
Vibración forzada

BIBLIOGRAFÍA

ASM Handbook, Vol. 16, *Machining*, ASM International, 1989.
Boothroyd, G. y Knight, W. A., *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, 2a. ed., Marcel Dekker, 1989.
Brown, J., *Advanced Machining Technology Handbook*, McGraw-Hill, 1998.
Erdel, B., *High-Speed Machining*, Society of Manufacturing Engineers, 2003.
Krar, S. F. y Check, A. F., *Technology of Machine Tools*, 5a. ed., Glencoe/Macmillan McGraw-Hill, 1996.
Nakazawa, H., *Principles of Precision Engineering*, Oxford, 1994.
Reshetov, D. N. y Portman, V. T., *Accuracy of Machine Tools*, American Society of Mechanical Engineers, 1989.
Rivin, E. I., *Stiffness and Damping in Mechanical Design*, Marcel Dekker, 1999.
Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4a. ed., Vol. 1, *Machining*, Society of Manufacturing Engineers, 1983.
Weck, M., *Handbook of Machine Tools*, 4 vols., Wiley, 1984..

PREGUNTAS DE REPASO

25.1 Describa las características distintivas de los centros de maquinado y explique por qué son tan versátiles estas máquinas.
25.2 ¿Por qué los cambiadores de tarimas (pallets) y de herramientas son partes integrales de los centros de maquinado?
25.3 Explique cómo opera el sistema de herramientas en un centro de maquinado.
25.4 Explique las tendencias en los materiales utilizados para las estructuras de las máquinas herramienta.
25.5 ¿Existe alguna diferencia entre traqueteo y vibración? Explique su respuesta.
25.6 Explique la importancia de las cimentaciones para instalar las máquinas herramienta.
25.7 ¿Cuáles son los tiempos comunes de cambio de herramienta en un centro de maquinado?
25.8 ¿Con qué tipos de materiales se fabrican las bases de las máquinas herramienta? ¿Por qué?
25.9 ¿Qué factores contribuyen a los costos en las operaciones de maquinado?
25.10 ¿Qué significa construcción "modular" de las máquinas herramienta?
25.11 ¿Cuál es el intervalo de maquinado de alta eficiencia? ¿Por qué se le llama así?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

25.12 Explique los factores técnicos y económicos que llevaron al desarrollo de los centros de maquinado.
25.13 Ya se indicó que las velocidades de husillo en los centros de maquinado varían en una amplia variedad. Explique las razones, proporcionando aplicaciones específicas.
25.14 Explique la importancia de la rigidez y el amortiguamiento de las máquinas herramienta. ¿Cómo se obtienen?
25.15 ¿Existen operaciones de maquinado descritas en los capítulos 23 y 24 que no puedan efectuarse en centros de maquinado y torneado? Explique con ejemplos específicos.
25.16 Describa cómo funcionan las sondas o palpadores de contacto mostradas en la figura 25.6.
25.17 ¿Cuál es la importancia del control de temperatura del fluido de corte en las operaciones realizadas en los centros de maquinado? Explique su respuesta.
25.18 Revise la figura 25.10 sobre centros de maquinado modulares y explique las piezas de trabajo y operaciones que serían adecuadas en dichas máquinas.
25.19 Describa los efectos adversos de la vibración y el traqueteo en el maquinado en relación con la pieza de trabajo y la herramienta de corte.
25.20 Se sabe que es posible disminuir los costos de maquinado cambiando la velocidad de corte. Explique qué costos tienen la probabilidad de cambiar y cómo, conforme se modifica la velocidad de corte.
25.21 Explique las diferencias entre las funciones de una torreta y un husillo en los centros de torneado.
25.22 Explique cómo se harían funcionar los arreglos de tarimas (pallets) mostrados en la figura 25.4a y b en el uso de estas máquinas.
25.23 Revise el cambiador de herramientas mostrado en la figura 25.5 y explique cualquier restricción para realizar sus operaciones más rápidamente, reduciendo así el tiempo de cambio de herramienta.
25.24 Además de la cantidad de uniones en una máquina herramienta (ver fig. 25.15), ¿qué otros factores influyen en la proporción en que aumenta el amortiguamiento?
25.25 Describa las piezas de trabajo que no serían apropiadas para maquinado en un centro de maquinado. Proporcione ejemplos específicos.
25.26 Además de que cada una de ellas tiene un mínimo, ¿son importantes las formas y pendientes generales de las curvas de costo total y tiempo total en la figura 25.18? Explique su respuesta.
25.27 En la sección 21.3 se indicó que la fuerza de empuje en el corte puede ser negativa, con altos ángulos de ataque o baja fricción en la interfaz de la viruta y la herramienta. Puede tener un efecto adverso en la estabilidad del proceso de corte. Explique por qué.
25.28 Explique las ventajas y desventajas de las estructuras de las máquinas herramienta fabricadas con hierros fundidos grises.
25.29 ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de las estructuras de acero soldado? ¿Y de las estructuras de acero atornillado? ¿Y utilizando uniones adhesivas para ensamblar los componentes de máquinas herramienta?
25.30 ¿Por qué se han utilizado concreto o concretos de polímero en algunas máquinas herramienta?
25.31 Describa las consideraciones económicas implícitas en la selección de los centros de maquinado y de torneado.
25.32 Proporcione ejemplos de vibración forzada y vibración autoexcitada en la práctica general de ingeniería.
25.33 Explique situaciones específicas en las que sería importante la distorsión térmica de los componentes de las máquinas herramienta.
25.34 ¿Cuáles son los requisitos de las piezas de trabajo que harían que un centro de maquinado fuera preferible a las fresadoras, tornos y taladros de columna?
25.35 Explique cómo haría para reducir cada uno de los factores de costo en las operaciones de maquinado. ¿Qué dificultades encontraría para hacerlo?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

25.36 El husillo y la herramienta de un centro de maquinado se extienden 12 pulgadas desde la estructura de su máquina herramienta. ¿Qué cambio de temperatura se puede tolerar para mantener una tolerancia de 0.0001 pulgada en el maquinado? ¿Y una tolerancia de 0.001 pulgada? Suponga que el husillo está hecho de acero.
25.37 Calcule el tiempo para manufacturar las partes en el ejemplo 25.1 mediante maquinado convencional y maquinado de alta velocidad, empleando los datos del estudio de caso 25.1.
25.38 En la producción de una válvula maquinada, la tarifa de la mano de obra es de $19.00 dólares por hora, la de mano de obra del rectificado de herramientas es de $25.00 dólares por hora y la tarifa de gastos generales es de $15.00 dólares por hora. La herramienta está fabricada con acero de alta velocidad y cuesta $25.00 dólares; se requieren cinco minutos para cambiarla, 10 minutos para rectificarla y puede hacerse cuatro veces más antes de necesitar su reemplazo. La pieza de trabajo es un aluminio de libre maquinado. Calcule la velocidad óptima de corte desde la perspectiva de los costos. Utilice $C = 100$ para V_0 en m/min.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

25.39 Si fuera el jefe de ingenieros a cargo del diseño de centros de maquinado y torneado, ¿qué cambios y mejoras recomendaría a los modelos existentes?

25.40 Estudie la bibliografía técnica e indique las tendencias en el diseño de máquinas herramienta modernas. Explique por qué existen esas tendencias.

25.41 Liste los componentes de máquinas herramienta que se puedan fabricar con material cerámico y explique por qué serían adecuados los cerámicos.

25.42 Estudie la bibliografía de varios fabricantes de máquinas herramienta y elabore una tabla completa, indicando las capacidades, tamaños, potencia y costos de los centros de maquinado y torneado. Comente sus observaciones.

25.43 Como se puede ver, el costo de los centros de maquinado y torneado es considerablemente más alto que el de las máquinas herramienta tradicionales. Puesto que muchas operaciones realizadas en dichos centros también pueden hacerse en máquinas convencionales, ¿cómo justificaría el alto costo de los centros? Explique con ejemplos apropiados.

25.44 Investigue en la bibliografía o comuníquese con fabricantes para describir los detalles de la manera en que funcionan las máquinas hexápodas.

25.45 En la parte III de este texto se describieron los procesos de formado y moldeado para materiales metálicos y no metálicos. Con base en este conocimiento, explique si sería probable diseñar una máquina que se llamara "centro de formado", capaz de efectuar dos o más procesos diferentes de moldeado (para dar forma). Proporcione ejemplos específicos de partes que se puedan producir y diga lo que piensa sobre el diseño de dicha máquina o máquinas.

25.46 Explique si sería posible diseñar y construir centros de maquinado sin controles computarizados.

25.47 En su experiencia al usar herramientas u otros dispositivos, ¿ha llegado a situaciones en las que haya experimentado vibración y traqueteo? Si es así, proporcione detalles y explique cómo los minimizaría.

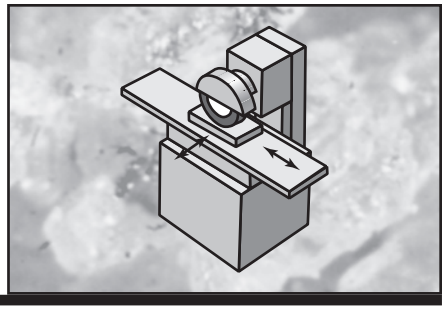
25.48 Diga si es probable o no incluir operaciones de rectificado (ver capítulo 26) en centros de maquinado. Explique la naturaleza de cualquier dificultad que pudiera presentarse.

25.49 El siguiente experimento está diseñado para demostrar de mejor manera el efecto del material saliente de la herramienta en la vibración y el traqueteo. Con una herramienta puntiaguda, raspe la superficie de una pieza de metal blando sosteniendo la herramienta con su brazo totalmente extendido. Repita el experimento sosteniendo la herramienta con la mano lo más cerca posible del metal. Describa sus observaciones sobre la tendencia a vibrar de la herramienta. Repita el experimento con diferentes tipos de materiales metálicos y no metálicos.

25.50 Se va a producir un perno grande a partir de material hexagonal extruido, colocándolo sobre un mandril o plato de sujeción y maquinando el zanco cilíndrico del perno mediante torneado. Liste las dificultades que se pueden presentar en esta operación.

CAPÍTULO

26 Operaciones de maquinado abrasivo y de acabado



26.1 Introducción 790
26.2 Abrasivos y abrasivos aglutinados 792
26.3 Proceso de rectificado 798
26.4 Operaciones de rectificado y rectificadoras 808
26.5 Consideraciones de diseño para el rectificado 818
26.6 Maquinado ultrasónico 818
26.7 Operaciones de acabado 820
26.8 Operaciones de rebabeo 825
26.9 Economía de las operaciones de maquinado abrasivo y de acabado 828

EJEMPLOS:

26.1 Fuerzas en el rectificado de superficies planas 802
26.2 Acción de un disco de rectificado 805
26.3 Patrones de ciclos en rectificado cilíndrico 812
26.4 Rectificado contra torneado duro 816
26.5 Rectificado por banda de álabes para tobera de turbinas 821

El maquinado abrasivo es uno de los pasos finales en la producción de partes. Consta de una serie importante de procesos debido a su capacidad para proporcionar alta precisión dimensional y acabado superficial. En este capítulo se describen:

- Fundamentos y capacidades del proceso de rectificado.
- Características de los abrasivos comunes.
- Estructura de los discos o piedras de rectificado y diversas herramientas abrasivas.
- Operaciones de rectificado y sus capacidades.
- Procesos de acabado que se basan en una acción abrasiva.
- La manera en que el maquinado abrasivo puede competir con otros procesos.

Partes comunes fabricadas: cualquier parte que requiera alta precisión dimensional y acabado superficial, como rodamientos de bolas y rodillos, anillos de pistones, válvulas, levas, engranes y matrices.

Procesos alternativos: maquinado de precisión, maquinado por descarga eléctrica o electroerosión, maquinado y rectificado electroquímico y maquinado por chorro de abrasivo.

26.1 Introducción

Existen muchas situaciones de manufactura en las que los procesos descritos hasta ahora no pueden proporcionar la precisión dimensional y el acabado superficial requeridos por una parte, o el material de la pieza de trabajo es demasiado duro o quebradizo para procesarlo. Por ejemplo, considérese la precisión y el fino acabado superficial de los rodamientos de bolas o rodillos, pistones, válvulas, cilindros, levas, engranes, matrices y diversos componentes utilizados en instrumentación. Uno de los mejores métodos para producir estas demandantes características en las partes es el maquinado abrasivo.

Un **abrasivo** es una pequeña partícula dura que posee aristas afiladas y forma irregular, a diferencia de las herramientas de corte ya descritas. Los abrasivos tienen la capacidad de remover pequeñas cantidades de material de una superficie mediante un proceso de corte que genera virutas diminutas. Muchos de nosotros estamos familiarizados con el uso de *discos o piedras abrasivas* (abrasivos aglutinados), como se muestra en la figura 26.1, para afilar cuchillos y herramientas, y con el uso de *lijas de papel* y *tela de esmeril* para alisar superficies y eliminar esquinas puntiagudas. Como se describe en este capítulo, los abrasivos también sirven para honear, lapear, abrillantar y pulir piezas de trabajo. Con el empleo de máquinas controladas por computadora, en la actualidad los procesos abrasivos tienen la capacidad de producir *(a)* una amplia variedad de geometrías



FIGURA 26.1 Variedad de abrasivos aglutinados que se utilizan en los procesos de maquinado abrasivo. *Fuente*: Cortesía de Norton Company.

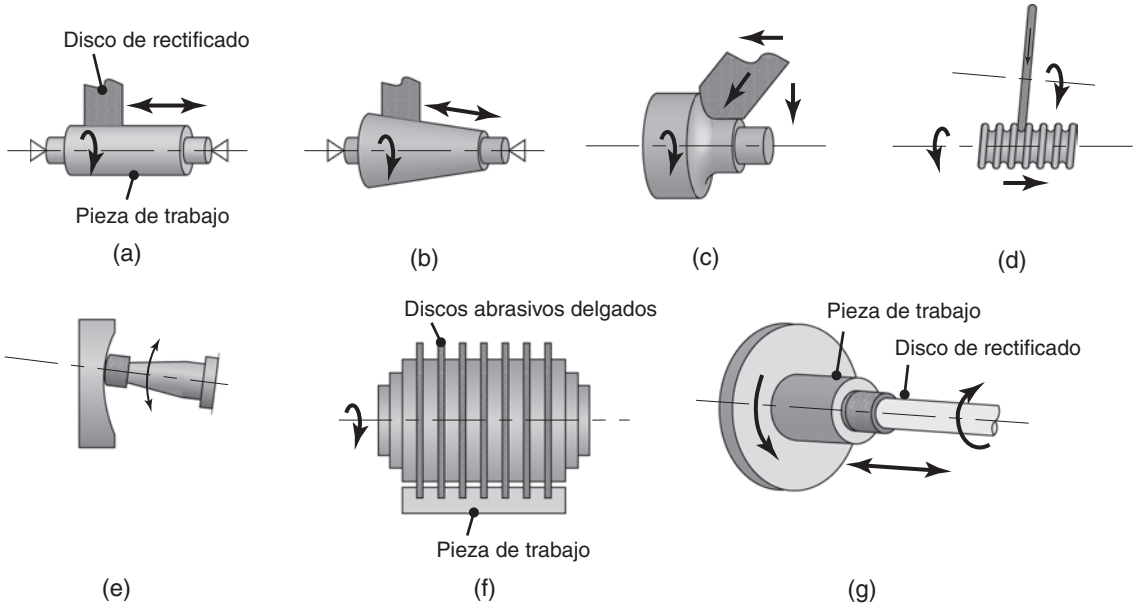


FIGURA 26.2 Tipos de piezas de trabajo y operaciones comunes de rectificado: *(a)* superficies cilíndricas; *(b)* superficies cónicas; (c) filetes en una flecha; *(d)* perfiles helicoidales; *(e)* forma cóncava; *(f)* corte o ranurado con discos delgados, y *(g)* rectificado interno.

en las piezas, como se puede ver en la figura 26.2, y *(b)* precisión dimensional y acabados superficiales muy finos, como se muestra en las figuras 23.13, 23.14 y 27.4. Por ejemplo, las tolerancias dimensionales pueden ser menores a 1 μm (40 μpulg) y las rugosidades superficiales pueden ser tan finas como 0.025 μm (1 μpulg).

Debido a su dureza, los abrasivos también se usan en *procesos de acabado* para metales y aleaciones tratadas térmicamente y para partes muy duras en aplicaciones como *(a)* acabado de cerámicos y vidrios; *(b)* corte de tramos de barras, formas estructurales, albañilería y concreto; *(c)* remoción de puntos de soldadura y salpicaduras no deseadas, y *(d)* limpieza de superficies con chorros de aire o agua que contienen partículas abrasivas.

En este capítulo se presentan las características de los abrasivos y su uso en diversos procesos de remoción de material. Como en las operaciones de corte, primero se describe la mecánica de las operaciones de maquinado abrasivo. Este conocimiento ayuda a establecer las relaciones entre las variables de los materiales y procesos de la pieza de trabajo y la precisión dimensional, el acabado superficial y la integridad de las superficies de las partes producidas.

26.2 Abrasivos y abrasivos aglutinados

Los abrasivos que más se utilizan en las operaciones de maquinado abrasivo son:

Abrasivos convencionales

- *Óxido de aluminio* (Al_2O_3)
- *Carburo de silicio* (SiC)

Superabrasivos

- *Nitruro de boro cúbico* (cBN)
- *Diamante*

Como se indica en el capítulo 8, estos abrasivos son mucho más duros que los materiales convencionales de las herramientas de corte, como se observa al comparar las tablas 22.1 y 26.1. Debido a que los dos últimos abrasivos arriba mencionados son los materiales más duros que se conocen, se les denomina *superabrasivos*.

Además de la dureza, una característica básica de los abrasivos es su **friabilidad**, que se define como la capacidad de los granos abrasivos para fracturarse (romperse) en piezas más pequeñas. Ésta es una propiedad importante y proporciona a los abrasivos sus cualidades de *autoafilado*, que son esenciales para mantener su filo durante el uso. La alta friabilidad indica baja resistencia o baja resistencia a la fractura del abrasivo. Por lo tanto, un grano abrasivo altamente friable se fragmenta con mayor rapidez bajo el efecto de las fuerzas de rectificado que uno con baja friabilidad. Por ejemplo, el óxido de aluminio tiene menos friabilidad que el carburo de silicio y, en consecuencia, menos tendencia a fragmentarse.

TABLA 26.1

Intervalos de dureza Knoop para diversos materiales y abrasivos			
Vidrio común	350–500	Nitruro de titanio	2000
Pedernal, cuarzo	800–1100	Carburo de titanio	1800–3200
Óxido de zirconio	1000	Carburo de silicio	2100–3000
Aceros endurecidos	700–1300	Carburo de boro	2800
Carburo de tungsteno	1800–2400	Nitruro de boro cúbico	4000–5000
Óxido de aluminio	2000–3000	Diamante	7000–8000

La *forma* y el *tamaño* del grano abrasivo también afectan su friabilidad. Por ejemplo, los granos con forma de bloque (similares a un ángulo de ataque negativo en las herramientas de corte de una sola punta, como se muestra en la fig. 21.3) son menos friables que los granos con forma de placa. Además, ya que la probabilidad de defectos es menor conforme los granos se vuelven más pequeños (debido al *efecto del tamaño*), estos granos son entonces más resistentes y menos friables que los más grandes.

Tipos de abrasivos. Los abrasivos comunes en la naturaleza son el *esmeril*, *corindón* (alúmina), *cuarzo, granate* y *diamante*. Debido a que estos abrasivos naturales suelen contener cantidades desconocidas de impurezas y poseen propiedades irregulares, su rendimiento es inconsistente y poco confiable. Por lo tanto, durante muchos años se han fabricado abrasivos sintéticos, como se describe a continuación:

- El **óxido de aluminio** se preparó por primera vez en 1893 y se produce fundiendo bauxita, limaduras de hierro y coque. Los óxidos de aluminio fundido se clasifican en *cristal oscuro* (menos friable), *blanco* (muy friable) y *simple*.
- El **gel sembrado** se introdujo por primera vez en 1987 y es la forma más pura de *óxido de aluminio sin fundir*. También se conoce como *óxido de aluminio cerámico*. Tiene un tamaño de grano de 0.2 μm, que es mucho más pequeño que otros tipos de granos abrasivos de uso común. Estos granos se sinterizan a fin de obtener tamaños más grandes. Debido a que son más duros que la alúmina fundida y su friabilidad es relativamente alta, el gel sembrado mantiene su filo y se usa en particular para materiales difíciles de rectificar.
- El **carburo de silicio** se descubrió en 1891 y se fabrica con arena de sílice y coque de petróleo. Los carburos de silicio se dividen en *negros* (menos friables) y *verdes* (más friables). Tienen mayor friabilidad que los óxidos de aluminio y, por lo tanto, mayor tendencia a fracturarse y permanecer afilados.
- El **nitruro de boro cúbico** se desarrolló por primera vez en la década de 1970. Sus propiedades y características se describen en las secciones 8.2.3 y 22.7.
- El **diamante** (también conocido como diamante sintético o industrial) se utilizó por primera vez como abrasivo en 1955. Sus propiedades y características se describen en las secciones 8.7 y 22.9.

Tamaño de los granos abrasivos. En las operaciones de manufactura, los abrasivos son por lo general más pequeños que las herramientas de corte e insertos que describimos en los capítulos 21 y 22. Además, tienen aristas afiladas, que permiten remover cantidades mínimas de material de la superficie de la pieza de trabajo. Por lo tanto, se pueden obtener acabado superficial y precisión dimensional muy finos utilizando abrasivos como herramientas.

El tamaño de un *grano* abrasivo se identifica por el **número de grano**, que es una función de tamaño de tamiz: cuanto más pequeño es el tamaño del grano, más grande será su número. Por ejemplo, el grano número 10 se considera muy grueso; el 100, fino, y el 500, muy fino. La lija y la tela de esmeril también se identifican de esta manera, como se puede descubrir de inmediato al observar el número de grano impreso en la parte posterior del papel o tela abrasiva.

Compatibilidad entre la pieza de trabajo y el material abrasivo. Como sucede en la selección de los materiales para herramientas de corte para maquinar materiales específicos de piezas de trabajo, la afinidad de un grano abrasivo con el material de la pieza es un factor que debe considerarse. Cuanto menor sea la reactividad de los dos materiales, menor será el desgaste y desafilado de los granos durante el rectificado, que en ambos casos volvería menos eficaz la operación y dañaría la superficie de la pieza (ver sección 26.3.1 para detalles). Recuérdese que, debido a su afinidad química, el diamante no puede utilizarse para rectificar aceros porque se disuelve en el hierro a las altas temperaturas encontradas en el rectificado.

Por lo general, se hacen las siguientes recomendaciones para la selección de abrasivos:

- *Óxido de aluminio*: aceros al carbono, aleaciones ferrosas y aceros de aleación.
- *Carburo de silicio*: metales no ferrosos, hierros fundidos, carburos, cerámicos, vidrio y mármol.
- *Nitruro de boro cúbico*: aceros e hierros fundidos con dureza superior a 50 HRC y aleaciones de alta temperatura.
- *Diamante*: cerámicos, carburos cementados y algunos aceros endurecidos.

26.2.1 Discos o piedras de rectificado

Debido a que, en general, cada grano abrasivo sólo retira una cantidad muy pequeña de material a la vez, se pueden lograr altas velocidades de remoción de material sólo si una gran cantidad de estos granos actúan juntos. Esto se realiza utilizando **abrasivos aglutinados**, por lo común en forma de *disco de rectificado*, en la que los granos abrasivos se distribuyen y orientan de manera aleatoria.

Como se muestra de manera esquemática en la figura 26.3, los granos abrasivos en un disco de rectificado se mantienen juntos mediante un **material aglutinante** (sección 26.2.2) que actúa como poste o tirante de soporte entre los granos. En los abrasivos aglutinados, la *porosidad* es fundamental para proporcionar holgura a las virutas que se generan y ayudar al enfriamiento; de otra manera, las virutas interferirían severamente en la operación de rectificado. La porosidad se puede observar mirando de cerca la superficie de cualquier disco de rectificado. Como se aprecia, es imposible utilizar un disco de rectificado sin porosidad, que sea denso y sólido por completo; simplemente no hay espacio para la formación de virutas.

Hoy en día se fabrica una amplia variedad de tipos y tamaños de piedras abrasivas. En la figura 26.4 se muestran algunos ejemplos de discos de rectificado, utilizados más comúnmente para abrasivos convencionales. En la figura 26.5 se presentan los discos superabrasivos. Debido a su alto costo, sólo un pequeño volumen de estos discos contiene superabrasivos.

Los abrasivos aglutinados están marcados con un sistema estandarizado de letras y números que indican tipo de abrasivo, tamaño de grano, grado, estructura y tipo de aglutinante. En la figura 26.6 se muestra el sistema de marca para abrasivos aglutinados con óxido de aluminio y carburo de silicio, y en la figura 26.7 el sistema de marca para abrasivos aglutinados con diamante y nitruro de boro cúbico.

El *costo* de las piedras de rectificado depende del tipo y tamaño del disco. Los discos pequeños (hasta de 25 mm [1 pulgada] de diámetro) cuestan entre $2 y $10 dólares para abrasivos convencionales, de $30 a $100 dólares para diamante y de $50 a $200 dólares para piedras de rectificado de nitruro de boro cúbico. En el caso de una piedra grande, de unos 500 mm de diámetro y 250 mm de anchura (20 pulgadas × 10 pulgadas), los

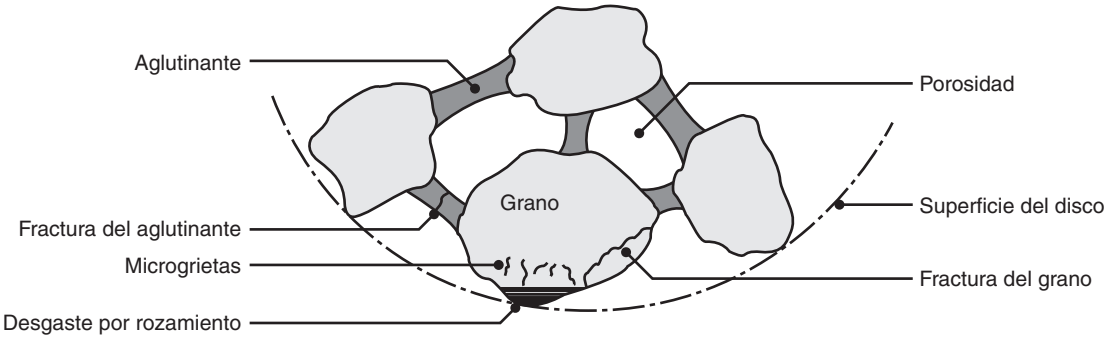


FIGURA 26.3 Esquema del modelo físico de una piedra o disco abrasivo rectificado que muestra su estructura y patrones de desgaste y fractura.

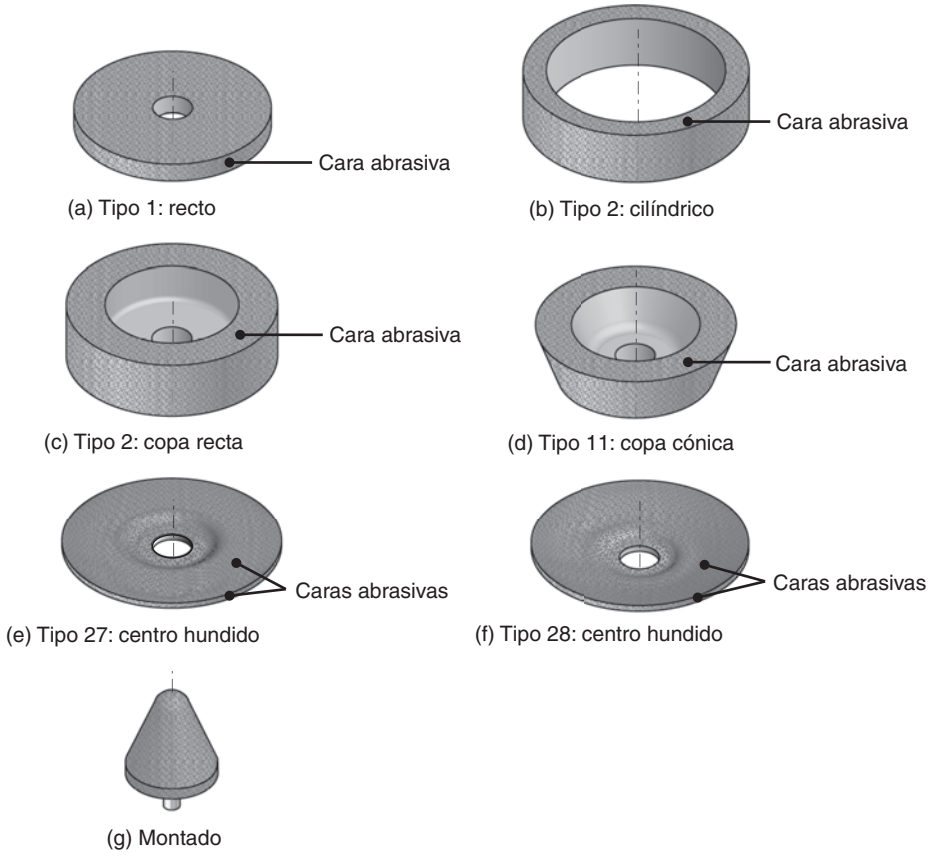


FIGURA 26.4 Tipos comunes de discos de rectificado fabricados con abrasivos convencionales. Obsérvese que cada disco tiene una superficie abrasiva específica; el rectificado en otras superficies es inadecuado e inseguro.

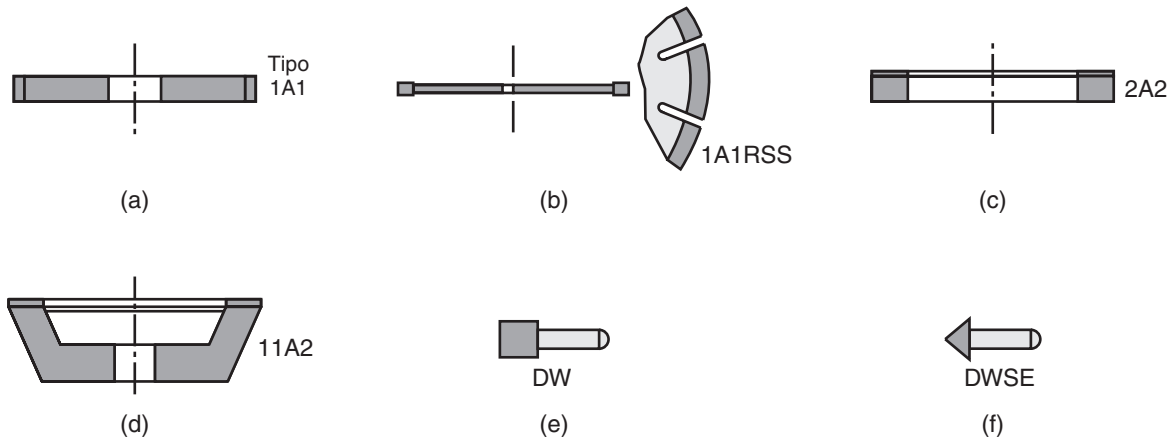


FIGURA 26.5 Ejemplos de configuraciones de discos superabrasivos. Las regiones anulares (rueda) son superficies de rectificado superabrasivas y, por lo general, el disco en sí (núcleo) se fabrica con metal o compósitos. Los materiales aglutinantes para los superabrasivos son: *(a); (d),* y *(e)* resinoide, metálico o vitrificado; *(b)* metálico; *(c)* vitrificado, y *(f)* resinoide.

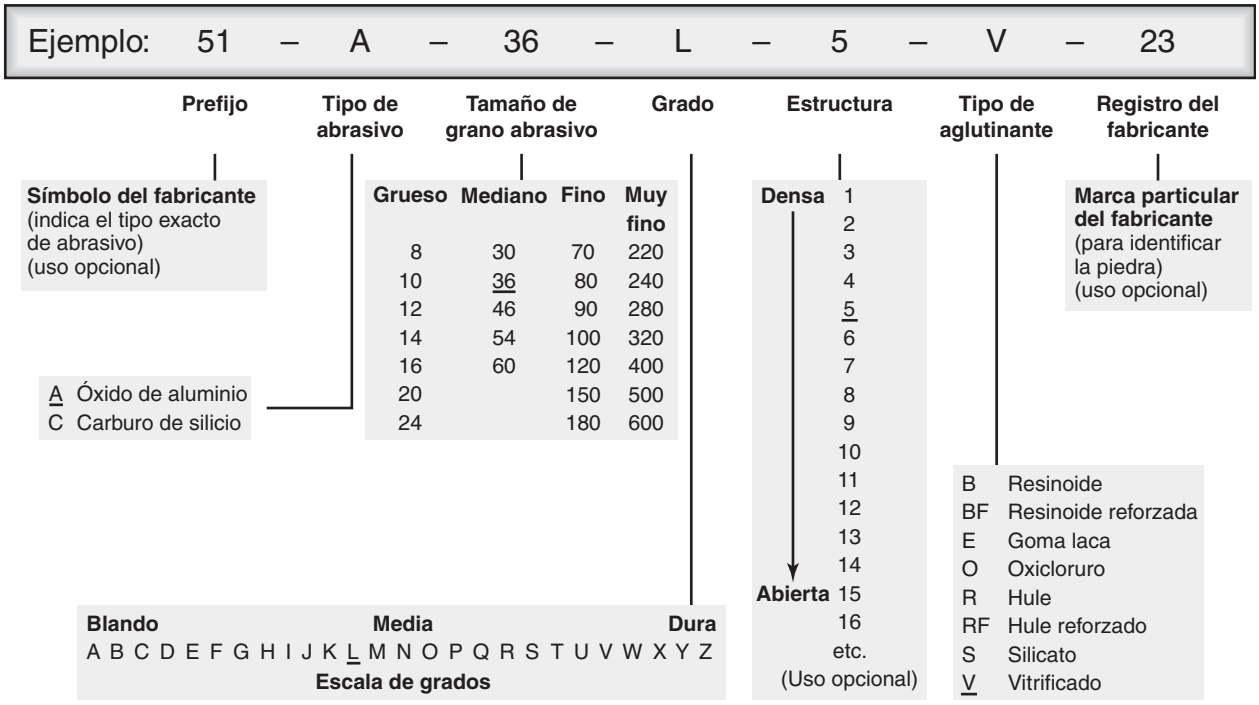


FIGURA 26.6 Sistema de marcado estándar para abrasivos aglutinados de óxido de aluminio y carburo de silicio.

costos de las piedras son de $500 dólares para abrasivos convencionales, de $5000 a $8000 dólares para diamante y de casi $20,000 dólares para nitruro de boro cúbico.

26.2.2 Tipos de aglutinantes

A continuación se describen los tipos comunes de aglutinantes utilizados en los abrasivos aglutinados.

Vitrificados. Es en esencia un vidrio, un *aglutinante vitrificado* (también conocido como *aglutinante cerámico*, sobre todo fuera de Estados Unidos); es el material de unión más común y utilizado. Sus materias primas son feldespato (un mineral cristalino) y arcillas. Se mezclan con los abrasivos, se humedecen y moldean a presión en forma de discos de rectificado. Estos discos "crudos", similares a las partes fabricadas con metalurgia de polvos (capítulo 17), se someten a cocción lentamente hasta una temperatura de casi 1250 °C (2300 °F) a fin de fundir el vidrio y desarrollar resistencia estructural. Después, las piedras se enfrían poco a poco (para evitar agrietamiento térmico), se terminan al tamaño adecuado, se inspeccionan para efectos de calidad y precisión dimensional y se someten a pruebas de defectos.

Los discos con aglutinantes vitrificados son resistentes, rígidos, porosos y resistentes a aceites, ácidos y agua. Sin embargo, son quebradizos y carecen de resistencia a choques mecánicos y térmicos. Para mejorar su resistencia durante el uso, las piedras vitrificadas también se fabrican con placas o copas de refuerzo de acero para mejorar el soporte estructural del abrasivo aglutinado. El color del disco de rectificado puede modificarse agregando diversos elementos durante su manufactura; de esta manera, las piedras se pueden codificar por colores para usarlas con materiales específicos de piezas de trabajo, como ferrosos, no ferrosos, cerámicos y así sucesivamente.

Resinoides. Los materiales aglutinantes resinoides son las *resinas termofijas* y existe una amplia variedad de composiciones y propiedades (secciones 7.4 y 7.7). Debido a que

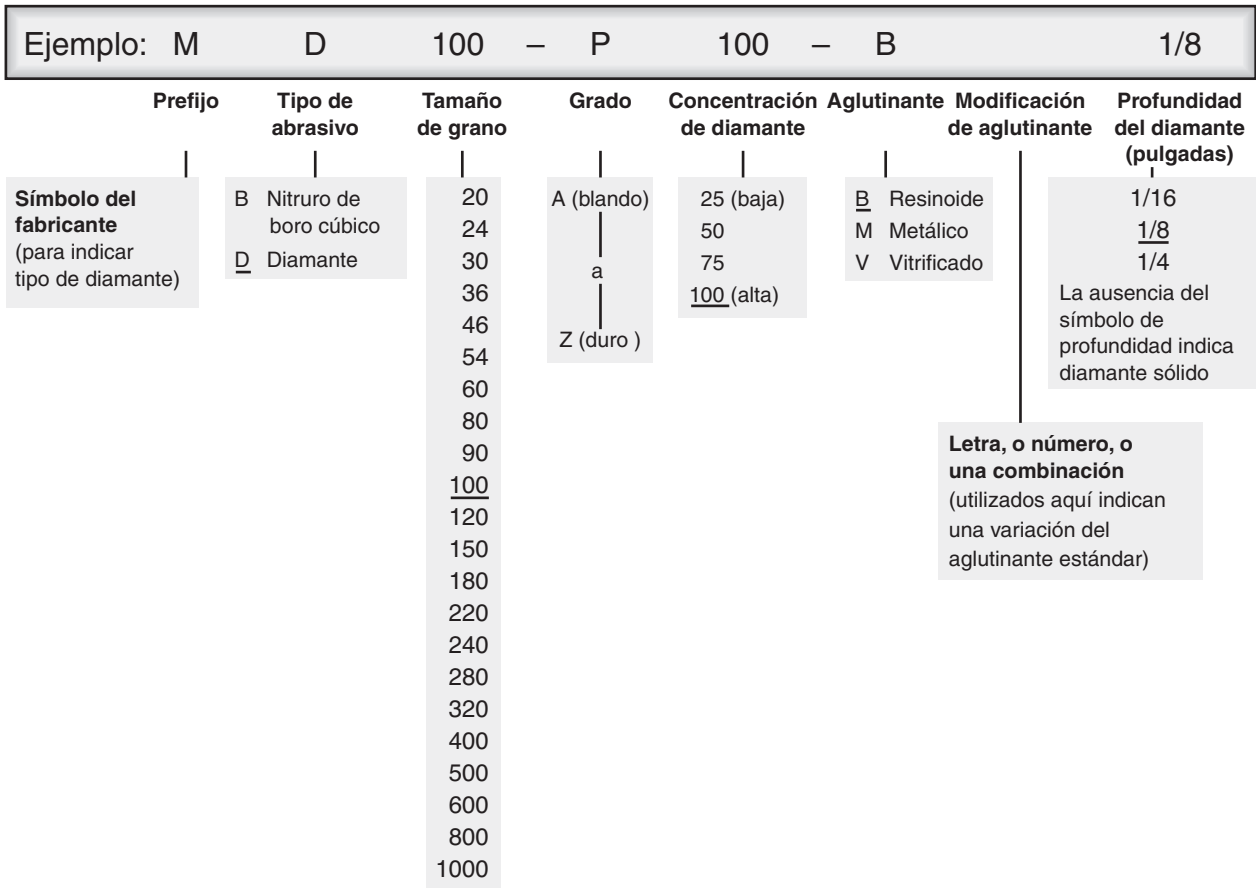


FIGURA 26.7 Sistema de marcado estándar para abrasivos aglutinados de nitruro de boro cúbico y diamante.

el aglutinante es un compuesto orgánico, los discos con *aglutinantes resinoides* también se conocen como **discos orgánicos.** La técnica de manufactura para producirlos consiste básicamente en *(a)* mezclar el abrasivo con resinas y aditivos fenólicos líquidos o en polvo; *(b)* prensar la mezcla en forma de piedra de rectificado, y *(c)* curarla a temperaturas de unos 175 °C (350 °F).

Debido a que el módulo elástico de las resinas termofijas es inferior al de los vidrios, las piedras resinoides son más flexibles que las vitrificadas. Un desarrollo más reciente es el uso de *poliamida* (sección 7.7) como sustituto del fenólico en las piedras resinoides, ya que es más tenaz y resistente a altas temperaturas. Además de prensarlas, estas piedras de rectificado se manufacturan mediante el *moldeo por inyección* (ver secciones 17.3 y 19.3).

Discos o piedras reforzadas. Estos discos o piedras constan generalmente de una o más capas de *malla de fibra de vidrio* de diversos tamaños. La fibra de vidrio en esta estructura laminada refuerza los discos resinoides retardando su desintegración en caso de que se rompan por alguna razón durante el uso, en lugar de mejorar su resistencia. A los discos resinoides de diámetro grande se les puede dar soporte adicional con uno o más anillos internos fabricados de barras redondas de acero que se insertan durante el moldeo del disco.

Termoplástico. Además de las resinas termofijas, los aglutinantes termoplásticos se utilizan en los discos de rectificado. Existen discos con abrasivos de sol-gel aglutinados con termoplásticos.

Hule. La matriz más flexible utilizada en los discos de rectificado es el hule. El proceso de manufactura consiste en *(a)* mezclar hule crudo, azufre y los granos abrasivos; *(b)* laminar la mezcla en hojas; *(c)* cortar círculos, y *(d)* calentarlos bajo presión para vulcanizar el hule. Los discos delgados se pueden fabricar de esta manera y se usan como sierras para operaciones de corte (*hojas de corte*).

Aglutinantes metálicos. Por medio de técnicas de metalurgia de polvos, los granos abrasivos (por lo general, diamante o nitruro de boro cúbico) se aglutinan en la periferia de un disco metálico a profundidades de 6 mm (0.25 pulgada) o menos, como se muestra en la figura 26.5. La unión al metal se efectúa bajo alta presión y temperatura. El disco en sí (el núcleo) se puede fabricar de aluminio, bronce, acero, cerámicos o materiales compósitos, dependiendo de si requiere resistencia, rigidez o estabilidad dimensional. Los discos superabrasivos se pueden *recubrir con capas*, de manera que una sola capa abrasiva se deposita o suelda con soldadura fuerte a un disco metálico con una forma particular deseada. Estos discos son de menor costo y se emplean para pequeñas cantidades de producción.

26.2.3 Grado y estructura de los discos

El *grado* de un abrasivo aglutinado es una medida de su resistencia de unión, por lo que incluye tanto el *tipo* como la *cantidad* de aglutinante en el disco. Puesto que la resistencia y dureza están directamente relacionadas (ver sección 2.6.2), el grado también se conoce como la *dureza* de un abrasivo aglutinado. Por lo tanto, un disco duro tiene una unión más resistente o una cantidad más grande de material aglutinante entre los granos que un disco blando. La *estructura* de un abrasivo aglutinado es una medida de su *porosidad* (es decir, el espaciado entre los granos; ver fig. 26.3). La estructura de los abrasivos aglutinados va de *densa* a *abierta*, como se muestra en la figura 26.6. Ya se indicó que cierta porosidad es fundamental para proporcionar holgura a las virutas de rectificado; de lo contrario, interferirían en la operación de rectificado.

26.3 Proceso de rectificado

El *rectificado* es un proceso de remoción de virutas que utiliza un grano abrasivo individual como herramienta de corte (fig. 26.8a). Las diferencias principales entre la acción de un grano abrasivo y la de una herramienta de corte de un solo punto se pueden resumir de la siguiente manera:

- Los granos abrasivos individuales tienen *formas irregulares* y están espaciados de manera *aleatoria* en la periferia del disco (fig. 26.9).
- El ángulo de ataque promedio de los granos es altamente negativo, por lo común de $-60°$ o incluso menos. En consecuencia, las virutas de rectificado se someten a una deformación plástica mucho mayor que la de otros procesos de maquinado. (Ver sección 21.2).
- Las posiciones radiales de los granos sobre la superficie periférica de un disco varían, por lo que no todos los granos están activos durante el rectificado.
- Las velocidades superficiales (es decir, velocidades de corte) en el rectificado son muy altas, por lo general de 20 a 30 m/s (4000 a 6000 pies/min) y pueden ser hasta de 150 m/s (30,000 pies/min) en el rectificado de alta velocidad, usando discos diseñados y manufacturados especialmente.

El proceso de rectificado y sus parámetros se pueden observar mejor en la operación de *rectificado de superficies planas*, que se muestra de manera esquemática en la figura 26.10. Un disco de rectificado recto (fig. 26.4a) con un diámetro D retira una capa de metal a una profundidad d (**profundidad de corte del disco**). Un grano individual en la periferia del disco se mueve a una velocidad tangencial (V), en tanto que la pieza de trabajo se mueve a una velocidad (v). Cada grano abrasivo remueve una pequeña viruta

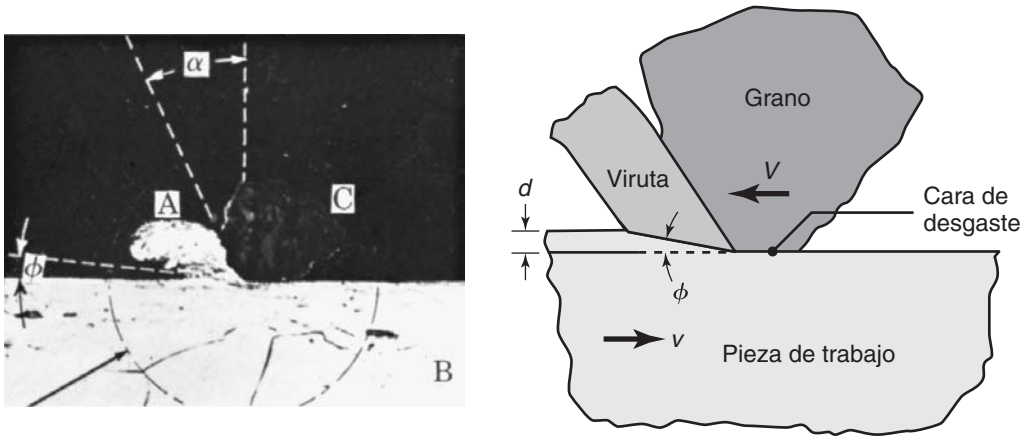


FIGURA 26.8 *(a)* Viruta de rectificado que se produce mediante un solo grano abrasivo: (A) viruta, (B) pieza de trabajo, (C) grano abrasivo. Obsérvese el ángulo de ataque negativo del grano. El círculo inscrito tiene 0.065 mm (0.0025 pulgada) de diámetro. *(b)* Esquema de la formación de virutas mediante un grano abrasivo con cara de desgaste. Nótese el ángulo de ataque negativo del grano y el pequeño ángulo de cizallamiento. *Fuente: (a)* M. E. Merchant.

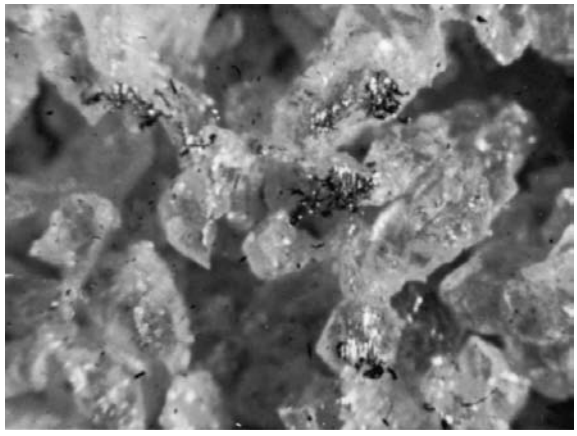


FIGURA 26.9 Superficie de un disco de rectificado (A46-J8V) que muestra los granos abrasivos, la porosidad del disco, caras de desgaste en los granos y virutas metálicas de la pieza de trabajo que se adhiere a los granos. Obsérvese la distribución aleatoria y forma de los granos abrasivos. Ampliación: 50×. *Fuente*: S. Kalpakjian.

que tiene un *espesor sin deformación* (**profundidad de corte del grano**), *t*, y una *longitud sin deformación*, *l*.

A partir de las relaciones geométricas, se puede demostrar que la longitud de la viruta sin deformación (*l*) en el rectificado de superficies planas (fig. 26.10) se obtiene mediante la expresión

$$l = \sqrt{Dd} \tag{26.1}$$

y el espesor de la viruta sin deformación (*t*) mediante la expresión

$$t = \sqrt{\left(\frac{4v}{VCr}\right)\sqrt{\left(\frac{d}{D}\right)}} \tag{26.2}$$

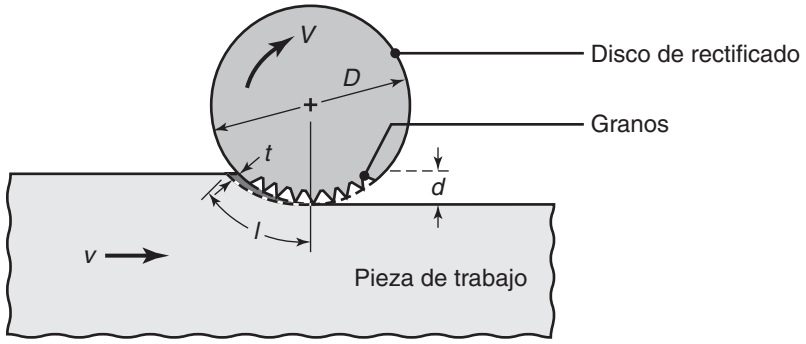


FIGURA 26.10 Esquema del proceso de rectificado de superficie plana, que muestra diversas variables del proceso. La figura ilustra el rectificado convencional.

donde C es la cantidad de puntos de corte por unidad de área de la periferia del disco; en general, se estima que es de 0.1 a 10 por mm^2 (10^2 a 10^3 por pulg^2). La cantidad r es la relación de la anchura de la viruta al espesor promedio de la viruta sin deformación y tiene un valor estimado que por lo común se encuentra entre 10 y 20.

Como ejemplo, l y t se pueden calcular para los siguientes parámetros del proceso. Digamos que $D = 200$ mm, $d = 0.05$ mm, $v = 30$ m/min y $V = 1800$ m/min. Utilizando las fórmulas anteriores,

$$l = \sqrt{(200)(0.05)} = 3.2 \text{ mm} = 0.13 \text{ pulgadas}$$

Suponiendo que $C = 2$ por mm^2 y que $r = 15$,

$$t = \sqrt{\frac{(4)(30)}{(1800)(2)(15)}}\sqrt{\frac{0.05}{200}} = 0.006 \text{ mm} = 0.00023 \text{ pulgadas}$$

Debido a la deformación plástica, la viruta real es más corta y gruesa que los valores calculados. (Ver fig. 26.8). Se puede ver que las virutas de rectificado son mucho más pequeñas que las comúnmente obtenidas en las operaciones de corte de metal, como se describe en el capítulo 21.

Fuerzas de rectificado. Es fundamental conocer las fuerzas de rectificado para:

- Calcular los requerimientos de potencia.
- Diseñar las máquinas rectificadoras y los soportes y dispositivos de sujeción de la pieza de trabajo.
- Determinar las deflexiones que pueden sufrir la pieza de trabajo y la máquina rectificadora. Obsérvese que las deflexiones, a su vez, afectan de manera adversa la precisión dimensional y son particularmente críticas en el rectificado de precisión y ultraprecisión.

Si se supone que la fuerza de corte en el grano es proporcional al área transversal de la viruta sin deformación, se puede demostrar que la **fuerza del grano** (tangencial al disco) es proporcional a las variables del proceso.

$$\text{Fuerza del grano} \propto \left(\frac{v}{V}\sqrt{\frac{d}{D}}\right)(\text{resistencia del material}) \qquad (26.3)$$

Por lo general, las fuerzas en el rectificado son menores que las de las operaciones de maquinado que se describen en los capítulos 23 y 24, debido a las pequeñas dimensiones comprendidas. Las fuerzas de rectificado deben mantenerse bajas para evitar distorsión y mantener una alta precisión dimensional de la pieza de trabajo.

Energía específica. La *energía* disipada al generar una viruta de rectificado consiste en la energía requerida para las siguientes acciones:

- Formación de la viruta.
- Surcado, como se muestra por los pliegues formados en la figura 26.11.
- Fricción, causada por el rozamiento del grano a lo largo de la superficie de la pieza de trabajo.

Obsérvese que después de cierto uso, los granos en la periferia del disco se desgastan y desarrollan una **cara de desgaste** (fig. 26.8b), fenómeno similar al *desgaste de flanco* en las herramientas de corte (fig. 21.15). La cara de desgaste roza continuamente a lo largo de la superficie rectificada, disipa energía (debido a la fricción) y hace que la operación de rectificado sea menos eficaz.

Los requisitos de **energía específica** para el rectificado se definen como la energía por unidad de volumen del material rectificado de la superficie de la pieza de trabajo y se muestran en la tabla 26.2. Nótese que estos niveles de energía específica son mucho mayores que los de las operaciones de maquinado proporcionadas en la tabla 21.2. Esta diferencia se ha atribuido a factores como la presencia de una cara de desgaste, altos ángulos de ataque negativos de los granos (que requieren más energía) y posible contribución del efecto del tamaño (cuanto más pequeña es la viruta, más alta será la energía requerida para producirla). También se ha observado que con lubricación efectiva, se pueden reducir las energías específicas en el rectificado por un factor de cuatro o más.

Como se muestra en el ejemplo 26.1, la *fuerza de rectificado* y la *fuerza de empuje* en el rectificado pueden calcularse con base en los datos de la energía específica.

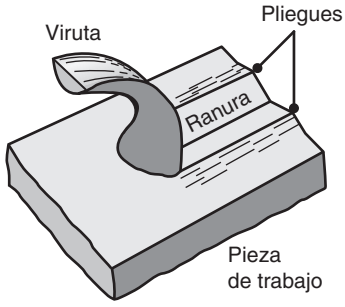


FIGURA 26.11 Formación de virutas y surcado de la superficie de la pieza de trabajo mediante un grano abrasivo.

TABLA 26.2

Requerimientos aproximados de energía específica para rectificado de superficies

		Energía específica	
Material de la pieza de trabajo	Dureza	$W \cdot s/mm^3$	$hp \cdot min/pulg^3$
Aluminio	150 HB	7–27	2.5–10
Hierro fundido (clase 40)	215 HB	12–60	4.5–22
Acero al bajo carbono (1020)	110 HB	14–68	5–25
Aleación de titanio	300 HB	16–55	6–20
Acero para herramientas (T15)	67 HRC	18–82	6.5–30

EJEMPLO 26.1 Fuerzas en el rectificado de superficies planas

Se realiza una operación de rectificado de superficies planas en acero al bajo carbono con un disco de diámetro $D = 10$ pulgadas que está girando a $N = 4000$ rpm y una anchura de corte de $w = 1$ pulgada. La profundidad de corte es $d = 0.002$ pulgada y la velocidad de avance de la pieza de trabajo (v) es 60 pulgadas/min. Calcule la fuerza de corte (fuerza tangencial al disco), F_c, y la fuerza de empuje (normal a la superficie de la pieza de trabajo), F_n.

Solución Primero se determina la velocidad de remoción de material (MRR) de la siguiente manera:

$$\text{MRR} = dwv = (0.002)(1)(60) = 0.12 \text{ pulg}^3/\text{min}$$

La potencia consumida se obtiene mediante:

$$\text{Potencia} = (u)(\text{MRR})$$

donde u es la energía específica, obtenida de la tabla 26.2. (Ver también la sección 21.3). Para acero al bajo carbono, se calcula que es 1.5 hp · min/pulg^3. Por lo que:

$$\text{Potencia} = (15)(0.12) = 1.8 \text{ hp}$$

Considerando que 1 hp = 33,000 pies · libras/min = 396,000 pulgadas · libras/min,

$$\text{Potencia} = (1.8)(396{,}000) = 712{,}800 \text{ pulgadas} \cdot \text{libras/min}$$

Puesto que la potencia se define como

$$\text{Potencia} = T\omega$$

donde T es el torque y es igual a $T = F_cD/2$ y ω es la velocidad rotacional del disco en radianes por minuto ($\omega = 2\pi N$). Se deduce que

$$712{,}800 = (F_c)\left(\frac{10}{2}\right)(2\pi)\ (4000)$$

y, por lo tanto, $F_c = 5.7$ libras.

La fuerza de empuje (F_n) puede calcularse directamente; sin embargo, también es posible hacerlo observando, con base en datos experimentales de la bibliografía técnica, que es aproximadamente 30% más alta que la fuerza de corte (F_c). Por consiguiente,

$$F_n = (1.3)(5.7) = 7.4 \text{ libras}$$

Temperatura. El aumento de temperatura en el rectificado es un factor que debe considerarse, por lo siguiente:

- Puede afectar de manera adversa las propiedades superficiales, incluyendo cambios metalúrgicos.
- El aumento de temperatura puede provocar esfuerzos residuales en la pieza de trabajo.
- Los gradientes de temperatura en la pieza de trabajo provocan distorsiones debido a la dilatación y contracción térmica de su superficie, lo que dificulta el control de la precisión dimensional.

Se ha descubierto que el *aumento de temperatura superficial* en el rectificado se relaciona con las variables del proceso mediante la siguiente expresión:

$$\text{Aumento de temperatura} \propto D^{1/4} d^{3/4} \left(\frac{V}{\nu} \right)^{1/2} \tag{26.4}$$

Por lo tanto, la temperatura se eleva al aumentar la profundidad de corte (d), el diámetro del disco (D) y la velocidad del disco (V), y disminuye al incrementarse la velocidad de la pieza de trabajo (ν). En esta ecuación se observa que la profundidad de corte tiene el exponente más grande, por lo que posee la mayor influencia sobre la temperatura.

Las *temperaturas pico* durante el rectificado pueden alcanzar 1600 °C (3000 °F). Sin embargo, el tiempo que tarda generar una viruta es extremadamente corto (microsegundos), así que la viruta puede fundirse o no. Debido a que las virutas transfieren gran parte del calor producido (como lo hacen las formadas en los procesos de maquinado de alta velocidad, sección 25.5), sólo se transfiere a la pieza de trabajo una fracción del calor producido en el rectificado. Si éste no fuera el caso, sería muy difícil rectificar piezas con suficiente precisión dimensional.

Chispas. Las chispas generadas al rectificar metales son en realidad virutas que se encienden, debido a la reacción *exotérmica* (producción de calor) de las virutas calientes con el oxígeno de la atmósfera. Las chispas no aparecen si el rectificado se realiza en un ambiente sin oxígeno. El color, la intensidad y la forma de las chispas dependen de la composición del metal que se rectifica. Existen gráficos que ayudan a identificar el tipo de metal que se rectifica por la apariencia de sus chispas. Si el calor generado por la reacción exotérmica es suficientemente alto, las virutas pueden fundirse, adquirir una forma esférica (debido a la tensión superficial) y solidificarse como partículas metálicas.

Revenido. El aumento excesivo de temperatura en el rectificado puede provocar el *revenido* y *ablandamiento* de la superficie de la pieza de trabajo. Deben seleccionarse con cuidado las variables del proceso a fin de evitar una elevación excesiva de la temperatura. El uso de fluidos para rectificación es un medio efectivo para controlar la temperatura.

Quemado. La temperatura excesiva durante el rectificado puede quemar la superficie que se rectifica. Si ésta es de acero, la *quemadura* se caracteriza por un color azuloso, señal de que la alta temperatura produjo oxidación. Se puede detectar mediante técnicas de ataque y metalúrgicas. Quizá una quemadura no sea objetable en sí, a menos que las capas de la superficie sufran *transformaciones de fase* (capítulo 4). Por ejemplo, al formado de martensita en los aceros con mayor contenido de carbono, debido al enfriamiento rápido, se le conoce como *quemadura metalúrgica*. Esta condición afecta de manera adversa las propiedades superficiales de las partes rectificadas, reduciendo la ductilidad y tenacidad de la superficie.

Agrietamiento por calor. Las altas temperaturas del rectificado pueden provocar grietas en la superficie de trabajo; esta condición se conoce como *agrietamiento por calor*. En general, las grietas son perpendiculares a la dirección de rectificado. Sin embargo, en condiciones severas también pueden aparecer grietas paralelas. Como se esperaba, dicha superficie carece de tenacidad y tiene baja resistencia a la fatiga y corrosión. (Obsérvese que el agrietamiento por calor también ocurre en las matrices para fundición a presión, como se indica en la sección 11.3.5).

Esfuerzos residuales. Los gradientes de temperatura en el interior de la pieza de trabajo durante el rectificado son los principales responsables de los *esfuerzos residuales*. Los fluidos de rectificado, su método de aplicación, además de los parámetros del proceso, como la profundidad de corte y las velocidades, afectan de manera significativa la magnitud y el tipo de esfuerzos residuales desarrollados (a tensión o compresión). Debido al efecto adverso que los esfuerzos residuales de tensión tienen sobre la resistencia a la

fatiga, deben seleccionarse con cuidado las variables del proceso. Por lo general, los esfuerzos residuales se pueden reducir disminuyendo la velocidad del disco o piedra y aumentando la velocidad de la pieza de trabajo (**rectificado de bajo esfuerzo** o *rectificado sutil*). También pueden utilizarse discos de grado más blando (conocidos como **discos de corte libre**).

26.3.1 Desgaste de los discos de rectificado

El desgaste de los discos de rectificado es un factor que debe considerarse, porque afecta de manera adversa la forma y precisión dimensional de las superficies rectificadas, similar al desgaste en las herramientas de corte. El desgaste de dichos discos es provocado por tres mecanismos: desgaste por rozamiento del grano (atrición), fractura del grano y fractura del aglutinante.

Desgaste por rozamiento del grano (atrición). En el *desgaste por rozamiento del grano*, las aristas de corte de un grano originalmente puntiagudo se desafilan y desarrollan una *cara de desgaste* (fig. 26.8b), que es similar al desgaste del flanco en las herramientas de corte. El desgaste es provocado por la interacción del grano con el material de la pieza de trabajo, que incluye reacciones físicas y químicas. Estas reacciones son complejas y comprenden difusión, degradación química o descomposición del grano, fractura a escala microscópica, deformación plástica y fusión.

El desgaste por atrición es bajo cuando los dos materiales (grano y pieza de trabajo) son *químicamente inertes* de manera recíproca, muy similar a lo que se observa en las herramientas de corte. Cuanto más inertes sean los materiales, más baja será la tendencia a que ocurran reacción y adhesión entre el grano y la pieza de trabajo. Por ejemplo, dado que el óxido de aluminio es inerte respecto del hierro, su valor de desgaste por atrición cuando se utiliza para rectificar aceros es mucho menor que el del carburo de silicio y el del diamante. Por otro lado, el carburo de silicio puede disolverse en hierro, así que no resulta conveniente para rectificar aceros. El nitruro de boro cúbico es más inerte respecto de los aceros, de ahí que sea adecuado para su uso como abrasivo.

Por lo tanto, la selección del tipo de abrasivo para el desgaste por atrición se basa en la *reactividad* del grano con la pieza de trabajo y en sus propiedades mecánicas relativas, como dureza y tenacidad. El ambiente y tipo de fluido de rectificado que se utiliza también afectan las interacciones del grano y la pieza de trabajo.

Fractura del grano. Los granos abrasivos son quebradizos, y estas características de fractura son importantes en el rectificado. Si es excesiva la cara de desgaste por rozamiento de grano (atrición), éste se desafila, en tanto que el rectificado se vuelve ineficaz y produce temperaturas inconvenientemente altas.

Lo ideal es que el grano se fracture o fragmente a una velocidad moderada, de manera que las nuevas aristas afiladas de corte se produzcan continuamente durante el rectificado. Esto equivale a romper un pedazo desafilado de gis o una piedra en dos o más piezas para exponer nuevos bordes filosos. En la sección 26.2 se describió la *friabilidad* de los abrasivos (la medida en que se afilan por sí mismos) como un factor importante en el rectificado efectivo.

La selección del tipo y tamaño de grano para una aplicación en particular también depende de la velocidad de desgaste por rozamiento del grano (atrición). Una combinación de materiales del grano y de la pieza de trabajo con alto desgaste por atrición y baja friabilidad del grano desafila los granos y desarrolla caras de desgaste grandes. Así, el rectificado se vuelve ineficaz y es probable que se dañe la superficie (como si se hubiera quemado).

Fractura del aglutinante. La resistencia del aglutinante (grado) es un parámetro significativo en el rectificado. Si el aglutinante es demasiado fuerte, los granos desafilados no se pueden desalojar. Esto evita que otros granos afilados a lo largo de la circunfe-

rencia del disco de rectificado establezcan contacto con la pieza de trabajo para retirar virutas, por lo que el proceso de rectificado se vuelve ineficaz. Por otro lado, si el aglutinante es demasiado débil, los granos se sueltan fácilmente y aumenta la velocidad de desgaste del disco. En este caso, se vuelve difícil mantener la precisión dimensional.

En general, se recomiendan los aglutinantes más blandos para los materiales más duros y para reducir los esfuerzos residuales y el daño térmico a la pieza de trabajo. Los discos de grado duro se utilizan en materiales más blandos y para retirar grandes cantidades de material a altas velocidades.

26.3.2 Relación del rectificado

Por lo general, el desgaste de los discos de rectificado se relaciona con la cantidad de material retirado de la pieza de trabajo mediante un parámetro conocido como *relación de rectificado* (G), que se define como:

$$G = \frac{\text{Volumen del material retirado}}{\text{Volumen de desgaste del disco}} \tag{26.5}$$

En la práctica, las relaciones de rectificado varían ampliamente: van desde 2 hasta 200, e incluso más altas, dependiendo del tipo de disco, el material de la pieza de trabajo, el fluido de rectificado y los parámetros del proceso (como la profundidad de corte y las velocidades del disco y de la pieza). Se ha demostrado que los fluidos efectivos de rectificado pueden aumentar la velocidad de rectificado en un factor de diez o más, mejorando en gran medida la vida del disco.

Durante el rectificado, un disco en particular puede **actuar blando** (el desgaste del disco es alto) o **actuar duro** (el desgaste es bajo), sin considerar el grado del disco. Por ejemplo, obsérvese cómo un lápiz ordinario *actúa* blando al escribir sobre papel rugoso y actúa duro al hacerlo sobre papel liso, aunque sea el mismo lápiz. La actuación dura o blanda es una función de la fuerza sobre el grano individual en la periferia del disco. A mayor fuerza, mayor tendencia de los granos a fracturarse o soltarse de la superficie del disco y menor relación de rectificado. En la ecuación 26.3, nótese que la fuerza del grano aumenta con la resistencia del material de la pieza de trabajo, la velocidad de trabajo y la profundidad del corte, y disminuye con el incremento de la velocidad y el diámetro del disco. Por lo tanto, un disco de rectificado actúa blando cuando v y d aumentan, o cuando V y D disminuyen.

En la práctica, no siempre es deseable tratar de obtener una alta relación de rectificado (como para ampliar la vida del disco), ya que las relaciones elevadas pueden indicar granos desafilados y, por lo tanto, posible daño a la superficie de la pieza de trabajo. Una relación inferior puede ser aceptable cuando un análisis técnico y económico general lo justifican.

EJEMPLO 26.2 Acción de un disco de rectificado

Se realiza una operación de rectificado de una superficie, con el disco funcionando a una velocidad constante del husillo. ¿El disco actúa blando o duro conforme se desgasta durante cierto periodo? Supóngase que la profundidad de corte (d) permanece constante y el disco se afila periódicamente (ver sección 26.3.3).

Solución De acuerdo con la ecuación 26.3, los parámetros que cambian con el tiempo en esta operación son el diámetro del disco (D) y la velocidad de su superficie (V). Conforme D se vuelve más pequeña, la fuerza relativa del grano aumenta y el disco actúa más blando. Para dar cabida a los cambios producidos por la reducción del diámetro del disco a lo largo del tiempo, o para considerar el uso de discos de diferentes diámetros, algunas máquinas de rectificado están equipadas con motores de husillos de velocidad variable.

26.3.3 Afilado, ajuste y formado de piedra abrasivas

El *afilado* es el proceso de:

- *Acondicionar* los granos desgastados en la superficie de un disco de rectificado produciendo *nuevos bordes afilados* en ellos, de manera que corten con mayor eficacia.
- *Ajuste*, que es producir un círculo real en un disco que dejó de ser redondo.

El afilado es necesario cuando el desgaste por rozamiento del grano (atrición) desafila el disco (conocido como **satinado** por la apariencia brillante de la superficie del disco) o cuando éste se tapa. Para discos más blandos, el afilado y ajuste se efectúan por separado; en cambio, para discos más duros (como el cBN), ambos se efectúan en una sola operación.

El **tapado** de un disco de rectificado ocurre cuando las porosidades en las superficies del disco (fig. 26.9) se llenan o atascan con virutas de la pieza de trabajo. Puede suceder en materiales blandos de rectificado o por la selección inapropiada de los discos o de los parámetros del proceso. Un disco tapado corta de manera deficiente y genera mucho calor por fricción, lo que daña la superficie y ocasiona pérdida de precisión dimensional en la pieza.

Las técnicas empleadas para afilar los discos de rectificado son:

- Se hace pasar una *herramienta con punta de diamante* o *conjunto de diamante* con una forma especial a lo ancho de la cara de rectificado de un disco rotatorio, que con cada pase retira una pequeña capa de la superficie del disco. Este método se puede aplicar en seco o en húmedo, dependiendo de si el disco va a utilizarse en seco o en húmedo, respectivamente. Sin embargo, en la práctica, el desgaste del diamante puede ser significativo con discos más duros, en cuyo caso se puede emplear un disco o copa de diamante.
- Se prensa manualmente un conjunto de *discos de acero con forma de estrella* contra el disco. El material se retira de la superficie del disco triturando los granos. Como resultado, se produce una superficie áspera en el disco y se utiliza sólo para operaciones de rectificado de desbaste en rectificadoras de banco o pedestal.
- Se pueden utilizar *barras abrasivas* para afilar los discos de rectificado, en particular los más blandos. Sin embargo, esta técnica no es apropiada para operaciones de rectificado de precisión.
- Las técnicas de afilado de discos de diamante con aglutinante metálico comprenden el uso de técnicas de *maquinado por descarga eléctrica* y *electroquímico*, como se indica en el capítulo 27. Estos procesos erosionan capas muy delgadas de aglutinante metálico y, por lo tanto, exponen nuevas aristas de corte de diamante.
- El afilado de rectificado de formas comprende *afilado y formado por compresión*. El proceso consiste en oprimir un rodillo metálico sobre la superficie del disco de rectificado, que por lo general es un disco vitrificado. El rodillo (que suele fabricarse con acero de alta velocidad, carburo de tungsteno o carburo de boro) tiene un perfil (forma) maquinado o rectificado en su periferia. Por lo tanto, reproduce una réplica de este perfil en la superficie del disco de rectificado que se está afilando. (Ver sección 26.4).

Las técnicas de afilado y su frecuencia son importantes en materia de calidad, porque afectan las fuerzas de rectificado y el acabado superficial de la pieza de trabajo. Las rectificadoras modernas controladas por computadora están equipadas con características de afilado automático, que afilan el disco de manera continua conforme avanza el rectificado. El primer contacto de la herramienta de afilado en el disco de rectificado es muy importante, ya que determina la naturaleza de la nueva superficie producida. Por lo general, esta acción se supervisa de manera precisa mediante detectores piezoeléctricos o de emisiones acústicas (sección 38.8). También se utilizan mecanismos como detectores de vibración, indicadores de potencia y medidores de deformación en la configuración de afilado de las máquinas rectificadoras de alta precisión.

Para un disco común de óxido de aluminio, la profundidad retirada durante el afilado es de 5 a 15 μm (200 a 600 μpulg), pero para un disco de cBN, sería de 2 a 10 μm (80 a 400 μpulg). Por consiguiente, los sistemas modernos de afilado tienen una resolución tan baja como 0.25 a 1 μm (10 a 40 μpulg).

A los discos de rectificado se les puede dar la **forma** que van a rectificar en la pieza de trabajo (sección 26.4). La cara abrasiva en el disco recto tipo 1 mostrado en la figura 26.4a es cilíndrica; por lo tanto, produce una superficie plana. Sin embargo, a esta superficie se le pueden dar diversas formas afilándola (fig. 26.12a). Aunque se han utilizado plantillas para este propósito, las rectificadoras grandes están equipadas comúnmente con características de moldeado controlado por computadora. A menos que ya tenga la forma deseada, la herramienta de afilado de diamante recorre la superficie del disco de modo automático a lo largo de cierta trayectoria prescrita (fig. 26.12b) y produce superficies muy precisas. En la figura 26.12b se observa que el eje de la herramienta de afilado de diamante permanece normal a la superficie del disco de rectificado en el punto de contacto.

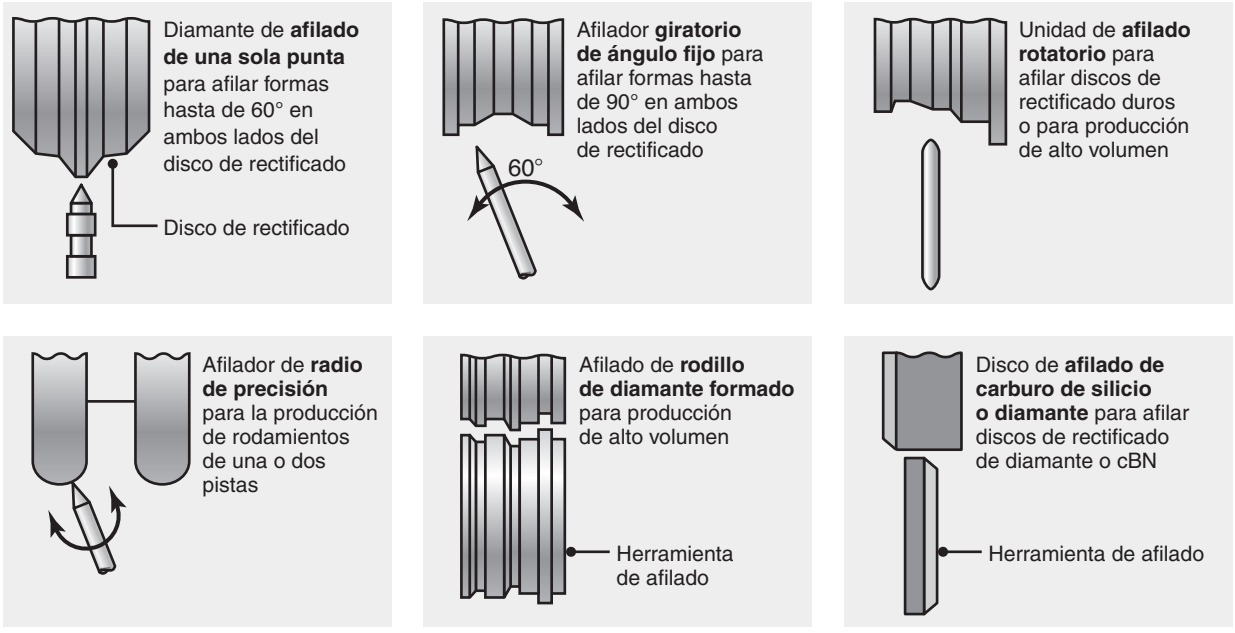


FIGURA 26.12 *(a)* Formas de afilado de discos de rectificado. *(b)* Producción de forma de la superficie de rectificado de un disco afilándolo mediante control por computadora. Obsérvese que la herramienta de afilado de diamante es normal a la superficie en el punto de contacto con el disco. *Fuente*: Cortesía de Okuma Machinery Works Ltd.

TABLA 26.3

Intervalos característicos de velocidades y avances para procesos abrasivos

Variable del proceso	Rectificado, convencional	Rectificado, avance lento	Pulido	Abrillantado
Velocidad de disco (m/min)	1500–3000	1500–3000	1500–2400	1800–3500
Velocidad de trabajo (m/min)	10–60	0.1–1	—	—
Avance (mm/pase)	0.01–0.05	1–6	—	—

26.3.4 Rectificabilidad de los materiales y selección de discos

La *rectificabilidad* de los materiales es (como la *maquinabilidad* descrita en la sección 21.7) difícil de definir con precisión. La rectificabilidad es un indicador general de lo fácil que es rectificar un material e incluye consideraciones como calidad de la superficie producida, acabado e integridad de la superficie, desgaste del disco, tiempo del ciclo y economía general de la operación. Como en la maquinabilidad, la rectificabilidad de un material puede mejorarse en gran medida mediante la selección adecuada de los parámetros del proceso (tabla 26.3), los discos de rectificado y los fluidos de rectificado, así como por medio de las características de la máquina, los métodos de fijación y los dispositivos de sujeción de la pieza de trabajo.

En la actualidad, las prácticas de rectificado están bien establecidas para una amplia variedad de materiales metálicos y no metálicos, incluyendo materiales aeroespaciales recién desarrollados, como los compósitos. Se pueden encontrar recomendaciones específicas para seleccionar discos y parámetros de proceso apropiados en diversos manuales, instructivos de fabricantes y referencias en la bibliografía de este capítulo.

La selección de discos comprende no sólo las formas del disco y de la parte a producir, sino también las características del material de la pieza de trabajo. Con base en lo tratado hasta ahora, se puede ver que las propiedades físicas y mecánicas de dicho material son importantes en la selección de un tipo de abrasivo y un aglutinante.

Rectificado en régimen dúctil. Los cerámicos pueden rectificarse con relativa facilidad por medio de discos de diamante y utilizando con cuidado los parámetros seleccionados del proceso. Por ejemplo, se ha demostrado que con pases leves y máquinas con alta rigidez y capacidad de amortiguamiento es posible producir virutas continuas y buena integridad superficial al rectificar materiales frágiles (fig. 26.11) en un proceso conocido como *rectificado en régimen dúctil*. Sin embargo, dado que las virutas de cerámico son comúnmente de 1 a 10 μm (40 a 400 μpulg) de tamaño, son más difíciles de retirar de los fluidos de rectificado que las virutas metálicas y requieren filtros finos y técnicas especiales.

26.4 Operaciones de rectificado y rectificadoras

La selección del proceso de rectificado y de la rectificadora para una aplicación en particular depende de la forma y las peculiaridades de la pieza de trabajo, tamaño, facilidad de sujeción y capacidad de producción requeridos (tabla 26.4). Las rectificadoras modernas se controlan por computadora y tienen características como carga y descarga automática de la pieza, sujeción de la parte, afilado y formado del disco. Las rectificadoras también se pueden equipar con sondas y calibradores, a fin de determinar la posición relativa del disco y las superficies de la pieza de trabajo (ver también fig. 25.6), así como con características de detección al tacto, mediante las cuales se puede detectar de inmediato (por ejemplo) la ruptura de una herramienta de afilado de diamante durante el ciclo de afilado. En esta sección se describen los tipos básicos de operaciones de rectificado.

El movimiento relativo del disco puede ser a lo largo de la superficie de la pieza de trabajo (rectificado *transversal*, rectificado *de paso completo*, *avance transversal*) o se puede mover radialmente hacia la pieza (rectificado *por penetración*). Las rectificadoras de superfi-

TABLA 26.4

Características generales de los procesos y máquinas para el maquinado abrasivo

Proceso	Características	Dimensiones máximas características, longitud y diámetro (m)*
De superficies planas	Superficies planas en la mayoría de los materiales; la capacidad de producción depende del tamaño de la mesa y el nivel de automatización; la calificación de la mano de obra depende de la complejidad de la parte; la capacidad de producción es alta en máquinas de mesa rotatoria de husillo vertical.	Mesa alternativa *L*:6 Mesa rotatoria *D*: 3
Cilíndrico	Piezas de trabajo redondas con diámetros escalonados; baja capacidad de producción, a menos que se automatice; calificación media a baja de la mano de obra.	Pieza de trabajo *D*: 0.8, rectificadoras de rodillos *D*: 1.8, rectificadoras universales *D*: 2.5
Sin centros	Piezas de trabajo redondas y esbeltas; alta capacidad de producción; calificación media a baja de la mano de obra.	Pieza de trabajo *D*: 0.8
Interiores	Orificios en la pieza de trabajo; baja capacidad de producción; calificación media a baja de la mano de obra.	Orificio *D*: 2
Honeado	Orificios en la pieza de trabajo; baja capacidad de producción; calificación baja de la mano de obra.	Husillo *D*: 1.2
Lapeado	Plano, cilíndrico o curvado; alta capacidad de producción, calificación baja de la mano de obra.	Mesa *D*: 3.7
Maquinado ultrasónico	Orificios y cavidades con diversas formas; adecuado para materiales duros y frágiles; calificación media de la mano de obra.	—

*Existen capacidades grandes para aplicaciones especiales.

cies comprenden el porcentaje más grande de rectificadoras utilizadas en la industria, seguidas de las de banco (generalmente con dos discos en cada extremo del husillo), las cilíndricas y las de herramientas y cortadores; las menos comunes son las rectificadoras de interiores.

Rectificado de superficies planas. El *rectificado plano* es una de las operaciones más comunes (fig. 26.13), y por lo regular comprende el rectificado de superficies planas. Es común asegurar la pieza de trabajo en un *plato magnético* sujeto a la mesa de trabajo de la *rectificadora* (fig. 26.14); los materiales no magnéticos se sujetan con prensas de banco, platos de vacío o algún otro soporte. Se monta un disco recto en el husillo horizontal de la rectificadora de superficies. El rectificado transversal ocurre conforme la mesa se mueve alternativamente en la dirección longitudinal y se hace avanzar en forma lateral (en la dirección del eje del husillo) después de cada carrera. En el *rectificado de penetración*, el disco se mueve de modo radial *hacia* la pieza de trabajo, como sucede cuando se rectifica una ranura (fig. 26.13b).

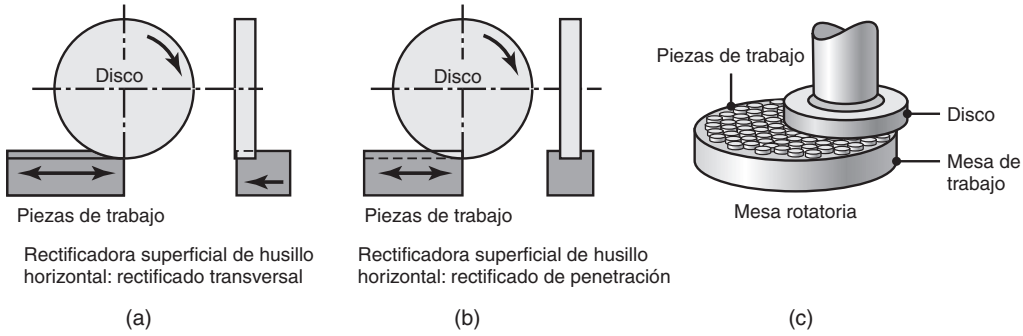


FIGURA 26.13 Esquemas de diversas operaciones de rectificado superficial. *(a)* Rectificado transversal con una rectificadora superficial de husillo horizontal. *(b)* Rectificado de penetración con una rectificadora superficial de husillo horizontal, produciendo una ranura en la pieza de trabajo. *(c)* Rectificadora de mesa giratoria de husillo vertical (también conocida como tipo *Blanchard*).

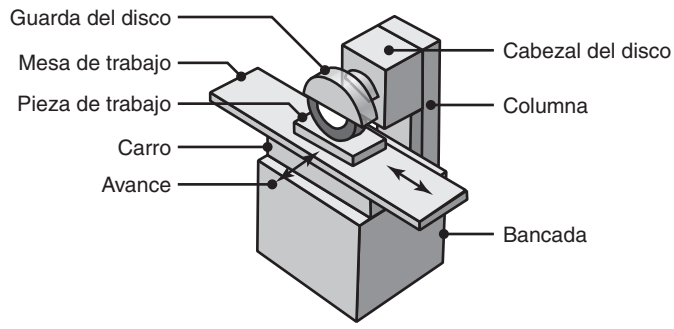


FIGURA 26.14 Esquema de una rectificadora de superficies planas de husillo horizontal.

Además de la rectificadora de superficies planas mostrada en la figura 26.14, otros tipos incluyen *husillos verticales* y *mesas rotatorias* (conocidas como tipo *Blanchard*, fig. 26.13c). Estas configuraciones permiten rectificar numerosas piezas en una sola operación. Por ejemplo, las bolas de acero para rodamientos de bolas se rectifican en configuraciones especiales y a grandes capacidades de producción (fig. 26.15).

Rectificado cilíndrico. En el *rectificado cilíndrico* (conocido asimismo como *rectificado con centros*, fig. 26.16; ver también fig. 26.2), se rectifican las superficies y los hombros cilíndricos externos de la pieza de trabajo, además de los apoyos de los cigüeñales, husillos, pernos y pistas de rodamientos. La pieza de trabajo cilíndrica rotatoria se mueve alternativamente de manera lateral a lo largo de su eje para cubrir la anchura a rectificar. En las *rectificadoras de rodillo* utilizadas para piezas de trabajo grandes y largas, como los molinos de laminación (ver fig. 13.1), el disco de rectificado se mueve en forma alternativa. Estas máquinas tienen la capacidad de rectificar rodillos hasta de 1.8 m (72 pulgadas) de diámetro.

En el rectificado cilíndrico, la pieza de trabajo se sujeta entre centros o en un plato, o se monta en un plato frontal en el cabezal de la rectificadora. Para superficies cilín-

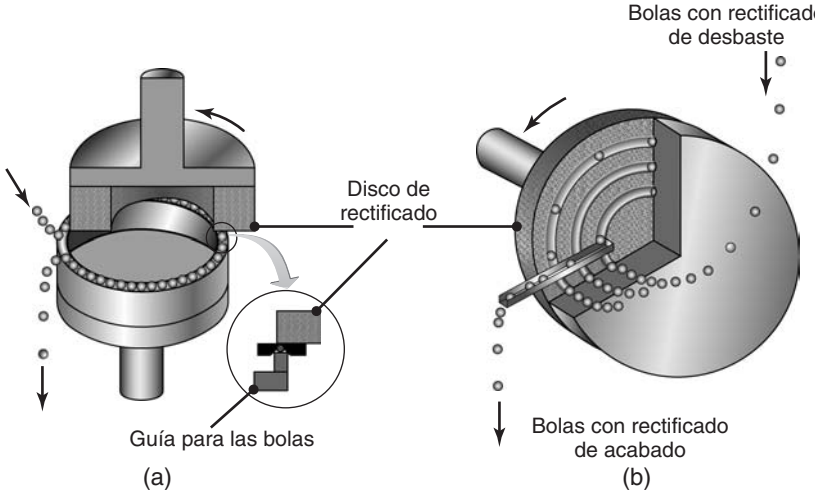


FIGURA 26.15 *(a)* Rectificado de desbaste de bolas de acero en una rectificadora de husillo vertical. Las bolas se guían mediante un soporte rotatorio especial. *(b)* Rectificado de acabado de bolas en un soporte de canales múltiples. Las bolas se rectifican hasta 0.013 mm (0.0005 pulgada) de su tamaño final.

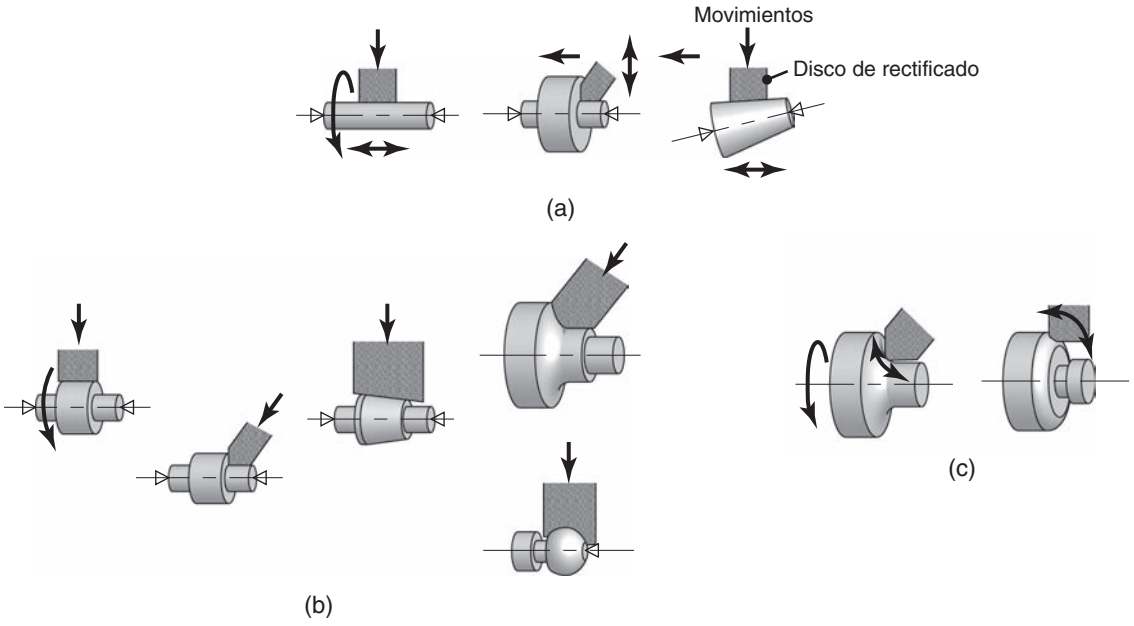


FIGURA 26.16 Ejemplos de diversas operaciones de rectificado cilíndrico: *(a)* rectificado transversal; *(b)* rectificado por penetración, y *(c)* rectificado de perfiles. *Fuente*: Cortesía de Okuma Machinery Works Ltd.

dricas rectas, los ejes de rotación del disco y la pieza de trabajo son paralelos. El disco y la pieza se accionan cada uno mediante motores separados y a diferentes velocidades. Las piezas de trabajo largas, con dos o más diámetros, también se pueden rectificar en rectificadoras cilíndricas. El rectificado cilíndrico puede producir asimismo formas (*rectificado de formas* y *rectificado por penetración*) en donde el disco se afila dándole la forma de la pieza a rectificar (fig. 26.17).

Las rectificadoras cilíndricas se identifican por el diámetro y la longitud máximos de la pieza de trabajo que pueden rectificar, en forma similar a los tornos mecánicos. En las *rectificadoras universales*, tanto el eje de la pieza como el eje del disco pueden moverse y girar alrededor de un plano horizontal, permitiendo así el rectificado de conicidades y otras formas.

Con las características de control por computadora, las partes *no cilíndricas*, como las levas, se pueden rectificar en piezas de trabajo giratorias. Como se ilustra en la figura 26.18, la velocidad del husillo de la pieza se sincroniza de tal manera que la distancia radial entre la pieza y los ejes del disco varía de modo continuo para producir una forma particular, como la que se muestra.

El **rectificado de roscas** se realiza en rectificadoras cilíndricas mediante discos especialmente afilados que coinciden con la forma de las roscas, como se muestra en la figu-

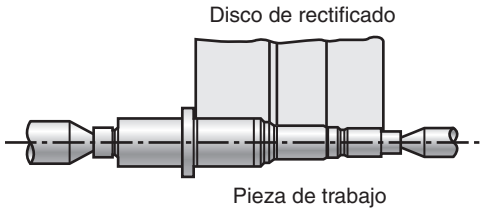


FIGURA 26.17 Rectificado por penetración de una pieza de trabajo en una rectificadora cilíndrica con el disco afilado en forma escalonada.

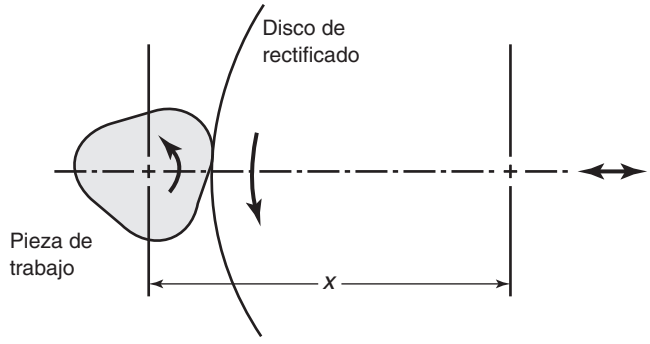


FIGURA 26.18 Esquema de rectificado de una parte no cilíndrica en una rectificadora cilíndrica con controles computarizados para producir la forma. La rotación de la parte y la distancia *x* entre los centros se varía y sincroniza para rectificar la forma particular de la pieza de trabajo.

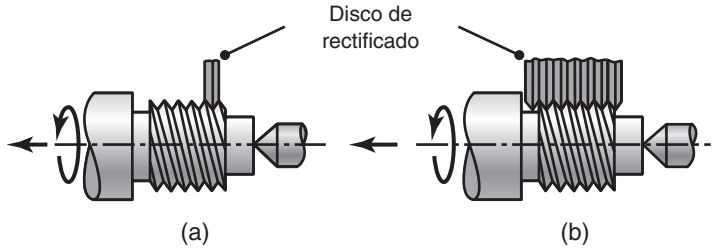


FIGURA 26.19 Rectificado de roscas mediante rectificado: *(a)* transversal, y *(b)* de penetración.

ra 26.19. (Ver también *rectificado sin centros*). Aunque costosas, las roscas producidas por rectificado son las más precisas de los procesos de manufactura y tienen un acabado superficial fino, con aplicaciones como los mecanismos de tornillo esférico utilizados para el movimiento preciso de los componentes de máquinas. Los movimientos de la pieza de trabajo y del disco se sincronizan a fin de producir el paso de la rosca, por lo general, en alrededor de seis pases.

EJEMPLO 26.3 Patrones de ciclos en rectificado cilíndrico

Como en la mayoría de las operaciones de rectificado, el disco de rectificado en el rectificado cilíndrico suele hacer varios pases a lo largo de una trayectoria para producir la geometría final en la pieza de trabajo. En la figura 26.20 se ilustran los patrones de los ciclos a fin de elaborar diversas formas en una rectificadora de precisión, multifuncional, controlada por computadora. Las flechas hacia abajo con números indican el inicio del ciclo de rectificado.

La determinación del patrón óptimo y más económico para el tiempo mínimo del ciclo depende de la cantidad de material a remover, la forma de la parte y los parámetros elegidos del proceso. Estos patrones se generan automáticamente con el *software* en los controles por computadora de la rectificadora.

Fuente: Cortesía de Toyoda Machinery.

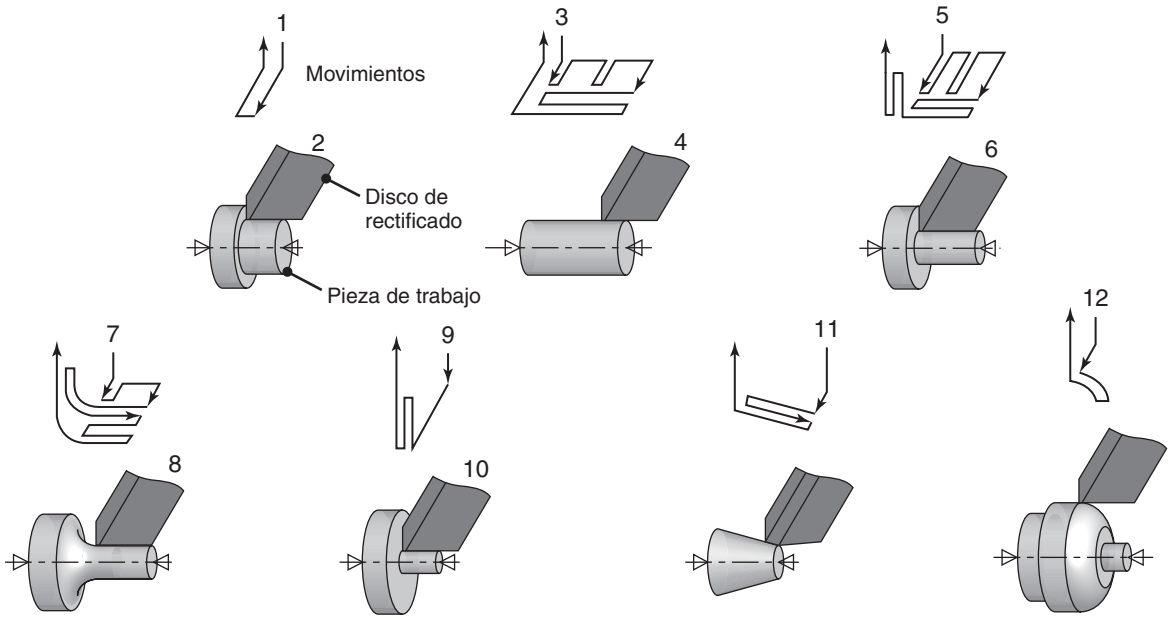


FIGURA 26.20

Rectificado interno. En el *rectificado interno* (fig. 26.21) se utiliza un pequeño disco para rectificar el diámetro interno de la parte, como en los bujes y las pistas para rodamientos. La pieza de trabajo se sujeta en un plato rotatorio y el disco rota a 30,000 rpm o más. Los perfiles internos también pueden rectificarse con discos de afilado de perfiles que se mueven radialmente en la pieza. El cabezal de las rectificadoras internas puede inclinarse en un plano horizontal para rectificar orificios cónicos.

Rectificado sin centros. El *rectificado sin centros* es un proceso de alta producción para rectificar de manera continua superficies cilíndricas donde la pieza de trabajo no se sostiene entre centros (de ahí el concepto "sin centros") ni platos, sino por una *cuchilla* (fig. 26.22a y b). Las partes comunes fabricadas por rectificado sin centros son los rodamientos de rodillos, pernos de pistones, válvulas para motores, cigüeñales y componentes similares. Se pueden rectificar partes con diámetros hasta de 0.1 mm (0.004 pulgada). Las rectificadoras sin centros (fig. 26.22d) tienen capacidad para velocidades superficiales del disco de 10,000 m/min (35,000 pies/min), utilizando comúnmente discos abrasivos de nitruro de boro cúbico.

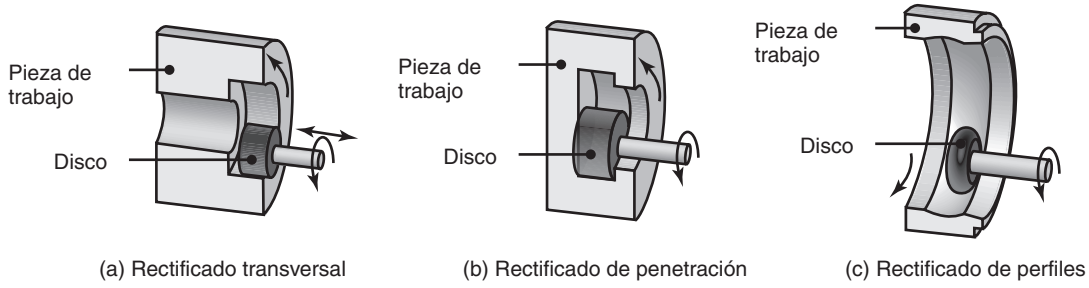


FIGURA 26.21 Esquemas de operaciones de rectificado interno: *(a)* rectificado transversal; *(b)* rectificado por penetración, y *(c)* rectificado de perfiles.

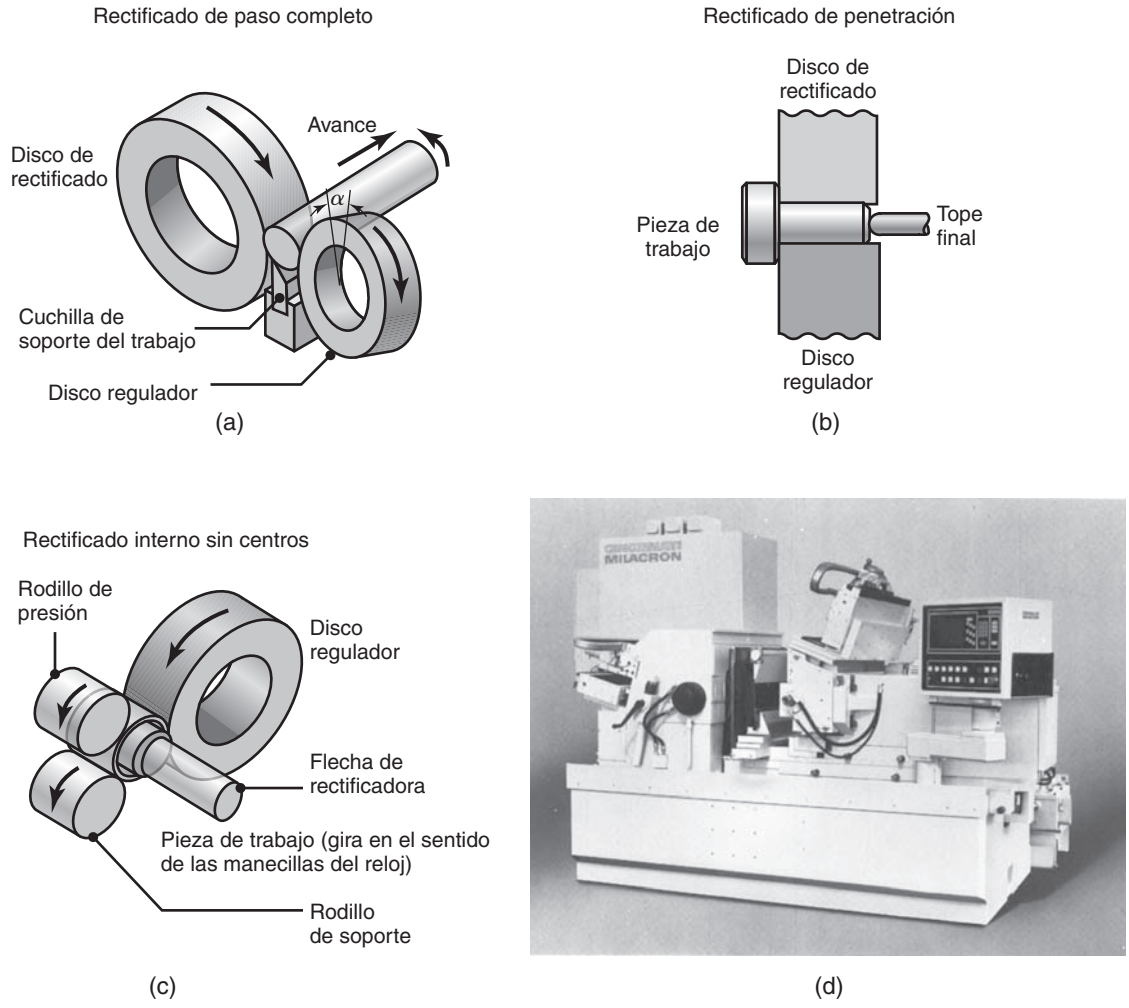


FIGURA 26.22 Esquemas de operaciones de rectificado sin centros: *(a)* rectificado de paso completo; *(b)* rectificado de penetración; *(c)* rectificado interno y *(d)* rectificadora cilíndrica de control numérico computarizado. *Fuente*: Cortesía de Cincinnati Milacron, Inc.

En el *rectificado de paso completo*, la pieza de trabajo se soporta en una cuchilla de soporte y se rectifica entre dos discos. El rectificado se efectúa con el disco más grande, en tanto que el más pequeño regula el movimiento axial de la pieza. El *disco regulador* (aglomerado con hule) se inclina y opera a sólo una vigésima parte de la velocidad del disco de rectificado.

Las partes con diámetros variables (como tornillos, buzos de válvulas y flechas de diámetros múltiples) se pueden rectificar con rectificado sin centros en un proceso llamado *rectificado de avance* o *de penetración* (fig. 26.22b). Esta operación es similar al rectificado de penetración o de forma en las rectificadoras cilíndricas. Las piezas cónicas se rectifican sin centros mediante el *rectificado de avance al extremo*. El rectificado de roscas de alta velocidad de producción también se puede realizar con rectificadoras sin centros mediante discos especialmente afilados. En el *rectificado interno sin centros,* la pieza de trabajo se soporta entre tres rodillos y se rectifica de modo interno; las aplicaciones comunes son partes y anillos en forma de camisa (fig. 26.22c).

Rectificado de avance lento. Tradicionalmente, el rectificado se ha asociado con pequeñas velocidades de remoción de material (tabla 26.4) y operaciones de acabado fino. Sin embargo, también se puede utilizar en operaciones de remoción de metal a gran escala, similares y en competencia con el fresado, brochado y cepillado de mesa móvil. En el *rectificado de avance lento*, la profundidad de corte (d) del disco es hasta de 6 mm (0.25 pulgada) y la velocidad de la pieza de trabajo es baja (fig. 26.23). Para mantener bajas las temperaturas de la pieza y mejorar el acabado superficial, los discos se aglutinan con una resina de grado más blando y tienen una estructura abierta.

Las máquinas utilizadas en el rectificado de avance lento tienen características especiales, como potencia hasta de 225 kW (300 hp), alta rigidez (debido a las elevadas fuerzas por la gran profundidad del material retirado), alta capacidad de amortiguamiento, velocidades variables del husillo y la mesa de trabajo y amplia capacidad para fluidos de rectificado. Las rectificadoras están equipadas con características para afilar continuamente el disco por medio de un rodillo de diamante como herramienta de afilado.

El rectificado de avance lento puede ser competitivo con otros procesos de maquinado, y económico en aplicaciones específicas, como el rectificado de punzones con forma, asientos para chavetas, ranuras para brocas helicoidales, raíces de los álabes de las turbinas (fig. 26.23c) y diversas partes complejas de superaleación. Puesto que el disco se afila dándole la forma de la pieza de trabajo a producir, ésta no tiene que formarse antes por fresado, moldeo o brochado. Por lo tanto, las fundiciones y forjas de forma casi neta son apropiadas para el rectificado de avance lento. Aunque por lo general basta un solo pase de rectificado, un segundo pase puede ser necesario para mejorar el acabado superficial.

Remoción de grandes cantidades de material mediante rectificado. El rectificado también puede utilizarse para retirar mucho material aumentando los parámetros del proceso. Esta operación puede ser económica en aplicaciones específicas y competir favorablemente con los procesos de maquinado, en particular el fresado, torneado y brochado. En esta operación, el acabado superficial es de importancia secundaria y el disco de rectificado (o banda) se usa en su totalidad, minimizando así el costo unitario. Las tolerancias dimensionales en este proceso son del mismo orden que las obtenidas por la mayoría de los procesos de maquinado. La remoción de grandes cantidades de material mediante rectificado también se efectúa en soldaduras, fundiciones y forjas para alisar los puntos de soldadura y eliminar rebabas.

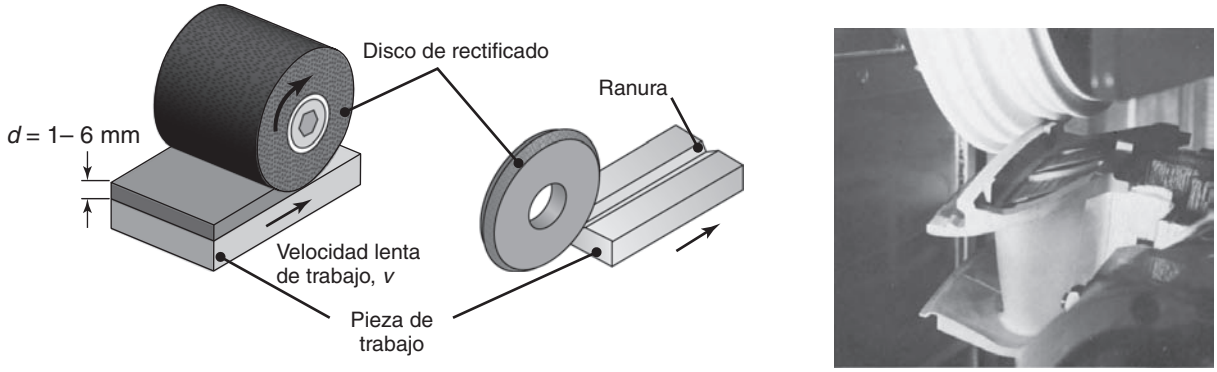


FIGURA 26.23 *(a)* Esquema del proceso de rectificado de avance lento. Obsérvese la profundidad de corte grande del disco, d. *(b)* Ranura producida en una superficie plana por rectificado de avance lento en un pase. Comúnmente, la profundidad de la ranura es de unos cuantos milímetros. *(c)* Ejemplo de rectificado de avance lento con disco moldeado. Esta operación también puede realizarse mediante alguno de los procesos descritos en el capítulo 27. *Fuente*: Cortesía de Blohm, Inc.

EJEMPLO 26.4 Rectificado contra torneado duro

En la sección 25.6 se describió el *torneado duro*. Un ejemplo de esto es el maquinado de aceros tratados térmicamente (por lo general, arriba de 45 HRC) mediante una herramienta de corte de nitruro de boro cúbico policristalino. En vista de lo tratado hasta ahora, es evidente que el rectificado y el torneado duro pueden ser competitivos en aplicaciones específicas. Por ello, ha habido un debate considerable en cuanto a los méritos respectivos de los dos procesos.

El torneado duro es cada vez más competitivo contra el rectificado y tanto las tolerancias dimensionales como el acabado superficial están empezando a aproximarse a los obtenidos mediante el rectificado. Como se ve en las tablas 21.2 y 26.2, el torneado requiere mucho menos energía que el rectificado. Además, es menos probable que ocurra daño térmico y de otros tipos en la superficie de la pieza de trabajo; tal vez no se requieran fluidos de corte y las máquinas herramienta son menos costosas. Asimismo, la posibilidad de darle acabado a la parte mientras sigue sujeta en el plato del torno elimina la necesidad del manejo de materiales y de colocar la parte en la rectificadora.

Sin embargo, los dispositivos de sujeción para piezas de trabajo grandes y delgadas durante el torneado duro pueden presentar problemas significativos, debido a que las fuerzas de corte utilizadas son superiores a las fuerzas de rectificado. Además, el desgaste de las herramientas y su control representaría un problema importante al compararlos con el afilado automático de los discos de rectificado. Es evidente que la posición competitiva del torneado duro contra el rectificado debe evaluarse por separado para cada aplicación en términos de acabado superficial, integridad, calidad y economía general del producto.

Otras operaciones de rectificado. A continuación se resumen diversas operaciones que se efectúan en rectificadoras de propósitos especiales.

- Las *rectificadoras universales de herramientas y cortadores* se utilizan para rectificar herramientas y cortadores de una sola punta o de puntas múltiples, incluyendo brocas. Están equipadas con dispositivos de sujeción del trabajo especiales para el posicionamiento preciso de las herramientas a rectificar. En la actualidad existe una gran variedad de rectificadoras de herramientas de CNC, lo que hace que la operación sea más sencilla, rápida y con resultados consistentes. Sin embargo, el costo de estas rectificadoras es de entre $150,000 y $400,000 dólares.
- Las *rectificadoras de torno, o de aditamentos de rectificar,* son unidades independientes y, por lo general, se sujetan al portaherramientas del torno (como en la fig. 23.2). La pieza de trabajo se monta en el cabezal y se rectifica moviendo el portaherramientas. Estas rectificadoras son versátiles, pero los componentes del torno deben protegerse contra residuos abrasivos.
- Las *rectificadoras de bastidor pendular* se utilizan en talleres de fundición para rectificar fundiciones grandes. El proceso de rectificado burdo de las fundiciones se conoce como **esmerilado de desbaste** y, por lo general, se realiza en *rectificadoras de piso* mediante discos hasta de 0.9 m (36 pulgadas) de diámetro.
- Las *rectificadoras portátiles* se accionan neumática o eléctricamente, con una flecha flexible conectada a un motor eléctrico o de gasolina. Se utilizan para operaciones como rectificado de puntos de soldadura y operaciones de *corte* mediante discos abrasivos delgados.
- Las *rectificadoras de banco y pedestal* se utilizan para el rectificado manual de rutina en herramientas y partes pequeñas. Por lo general, están equipadas con dos discos montados en los dos extremos de la flecha de un motor eléctrico. Un disco suele ser grueso, para el rectificado de desbaste, y el otro fino, para el rectificado de acabado.

Fluidos de rectificado. Las funciones de los fluidos de rectificado son similares a las de los fluidos de corte, como se indica en la sección 22.12. Aunque el rectificado y otros procesos de remoción mediante abrasivos se pueden realizar en seco, es importante el uso de un fluido debido a que:

- Evita el aumento de temperatura en la pieza de trabajo.
- Mejora el acabado superficial y la precisión dimensional de la parte.
- Mejora la eficiencia de la operación reduciendo el desgaste y tapado del disco y disminuyendo el consumo de energía.

Por lo general, los fluidos de rectificado son emulsiones acuosas para rectificado general y aceites para rectificado de roscas (tabla 26.5). Pueden aplicarse como un chorro (inundación) o como niebla (mezcla de fluido y aire). Debido a las altas velocidades superficiales implicadas, una corriente de aire (*cortina de aire*) en la periferia del disco suele evitar que el fluido alcance la interfaz del disco y la pieza de trabajo. Se han diseñado boquillas especiales que se adaptan a la forma de la superficie de corte del disco de rectificado, en las que el fluido de rectificado se aplica a alta presión.

Puede haber un aumento significativo de la temperatura de los fluidos de rectificado acuosos conforme se extrae el calor de la zona de rectificado. Esto puede dilatar la pieza de trabajo, dificultando el control de las tolerancias dimensionales. Un método común para mantener uniforme la temperatura en la pieza consiste en utilizar sistemas de refrigeración (enfriadores), por medio de los cuales se hace circular fluido de rectificado de manera continua y se mantiene a la misma temperatura. Como se indica en la sección 22.12, los aspectos biológicos y ecológicos de los fluidos para trabajo de los metales, relacionados con su disposición, tratamiento y reciclaje, son factores que deben considerarse en su selección y uso. Las prácticas empleadas deben cumplir las leyes y reglamentos federales, estatales y locales.

Traqueteo en el rectificado. El *traqueteo* es muy importante en las operaciones de rectificado, debido a que afecta de manera adversa el acabado superficial y el comportamiento del disco. Con frecuencia, el estudio de las **marcas de traqueteo** en las superficies rectificadas permite identificar su fuente, que incluiría *(a)* los rodamientos y husillos de la rectificadora; *(b)* irregularidades en el disco de rectificado (originadas en su manufactura); *(c)* desgaste disparejo del disco; *(d)* técnicas deficientes de afilado; *(e)* uso de discos de rectificado que no están adecuadamente balanceados, y *(f)* fuentes externas (como maquinaria cercana). La operación de rectificado puede causar *traqueteo regenerativo*, como sucede en el maquinado.

Los factores importantes en el control del traqueteo son la rigidez de la rectificadora, la rigidez de los dispositivos de sujeción del trabajo y el amortiguamiento. Se han establecido lineamientos generales para reducir la tendencia al traqueteo en el rectificado, en particular *(a)* utilizando discos de grado blando; *(b)* afilando los discos con frecuencia; *(c)* cambiando las técnicas de afilado; *(d)* reduciendo la velocidad de remoción de material, y *(e)* soportando la pieza de trabajo con rigidez.

TABLA 26.5

Recomendaciones generales para fluidos para rectificado

Material	Fluido para rectificado
Aluminio	E, EP
Cobre	CSN, E, MO + FO
Magnesio	D, MO
Níquel	CSN, EP
Metales Refractarios	EP
Aceros	CSN, E
Titanio	CSN, E

D = Seco; E = Emulsión; EP = Presión extrema; CSN = Químicos y sintéticos; MO = Aceite mineral; FO = Aceite graso.

Seguridad en las operaciones de rectificado. Puesto que los discos de rectificado son frágiles y giran a altas velocidades, deben seguirse ciertos procedimientos cuidadosos durante su manejo, almacenamiento y uso. El incumplimiento de estos procedimientos y de las instrucciones y advertencias impresas en las etiquetas de los discos individuales puede provocar lesiones graves o decesos. Los discos de rectificado deben almacenarse de manera adecuada y protegerse contra ambientes extremos, como alta temperatura o humedad. Tienen que inspeccionarse en forma visual en cuanto a grietas y daños antes de instalarlos en las rectificadoras. Los discos vitrificados deben probarse *haciéndolos sonar* antes de utilizarlos (es decir, sujetándolos del orificio, golpeándolos levemente y escuchando cómo suenan). Un disco dañado tiene un sonido llano, similar a un plato de cocina agrietado.

El daño a un disco de rectificado puede reducir su **velocidad de explosión** en forma severa. Definida como la velocidad superficial a la que explota (estalla) un disco que gira libremente, la velocidad de explosión se calcula en términos de las rpm de explosión para un disco en particular y depende del tipo de disco, su aglutinante, grado y estructura. En los discos de diamante y cBN (fig. 26.5), que operan a altas velocidades superficiales, el tipo de material del núcleo del disco afecta la velocidad de explosión. Por ejemplo, los núcleos metálicos tienen la velocidad de explosión más alta: 250 m/s (800 pies/s).

26.5 Consideraciones de diseño para el rectificado

Las consideraciones de diseño para las operaciones de rectificado son similares a las del maquinado que se describieron en diversas secciones de los capítulos 23 y 24. Además, es necesario poner atención específicamente en lo siguiente:

- Las partes a rectificar deben diseñarse de manera que puedan montarse con firmeza en platos, mesas magnéticas o aditamentos y dispositivos adecuados de sujeción del trabajo. Las piezas de trabajo delgadas, rectas o tubulares pueden distorsionarse durante el rectificado, lo que requiere atención especial.
- Si se requiere alta precisión dimensional, deben evitarse las superficies interrumpidas (como orificios y ranuras de chavetas), ya que pueden provocar vibraciones y traqueteo.
- Las partes para rectificado cilíndrico deben balancearse y evitar los diseños largos y delgados, a fin de minimizar deflexiones. Los filetes y radios de esquinas deben ser tan grandes como sea posible, o se les tiene que proporcionar alivio mediante maquinado previo.
- En el rectificado sin centros puede ser difícil rectificar con precisión las piezas cortas, debido a la falta de soporte en la cuchilla. En el rectificado de paso completo, sólo puede rectificarse el diámetro más grande de las partes.
- Los diseños que requieren rectificado preciso de forma deben ser sencillos para evitar el frecuente afilado de la forma del disco.
- Deben evitarse orificios profundos y pequeños, así como orificios ciegos que requieran rectificado interno, o tienen que incluir un alivio.

En general, los diseños deben requerir una cantidad mínima de remoción de material, excepto en el rectificado de avance lento. Además, para mantener una buena precisión dimensional, los diseños deben permitir de preferencia que todo el rectificado se realice sin tener que volver a colocar la pieza de trabajo. (Este lineamiento también es aplicable a todos los procesos y operaciones de manufactura).

26.6 Maquinado ultrasónico

En el *maquinado ultrasónico* (UM, por sus siglas en inglés), se retira material de una superficie mediante microastillado y erosión con granos abrasivos, finos, sueltos en lodo de

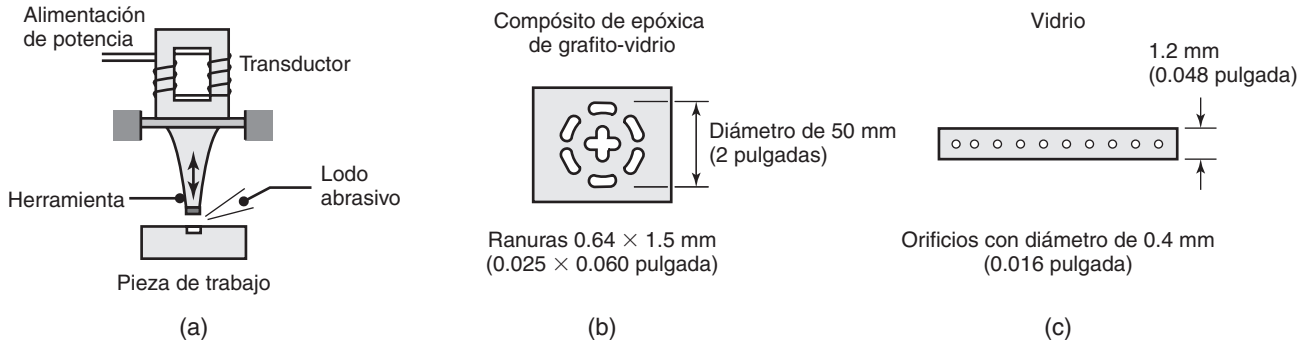


FIGURA 26.24 *(a)* Esquema del proceso de maquinado ultrasónico. *(b)* y *(c)* Tipos de partes fabricadas por este proceso. Obsérvese el pequeño tamaño de los orificios producidos.

agua (fig. 26.24a). La punta de la herramienta (*sonotrodo*) vibra a una frecuencia de 20 kHz y a una baja amplitud de 0.0125 mm a 0.075 mm (0.0005 a 0.003 pulgada). A su vez, esta vibración proporciona una alta velocidad a los granos abrasivos entre la herramienta y la pieza de trabajo. El esfuerzo producido por el impacto de las partículas abrasivas sobre la superficie de la pieza es alto porque *(a)* el tiempo de contacto entre la partícula y la superficie es muy corto (10 a 100 μs), y *(b)* el área de contacto es muy pequeña. En materiales frágiles, estos esfuerzos de impacto son suficientemente altos para causar microastillado y erosión de la superficie de la pieza de trabajo.

El maquinado ultrasónico es más adecuado para materiales que son duros y frágiles, como cerámicos, carburos, piedras preciosas y aceros endurecidos. En la figura 26.24b y c se muestran dos aplicaciones del maquinado ultrasónico. Se requiere una herramienta especial para cada forma a producir, de ahí que se conozca como *herramienta de forma*. Por lo general, la punta de la herramienta (que se sujeta a un transductor a través del portaherramientas) se fabrica con acero dulce.

Por lo común, los granos abrasivos son de carburo de boro, aunque también se utilizan óxido de aluminio y carburo de silicio, con tamaños de granos que van del número de grano 100 para desbaste hasta el número 1000 para operaciones de acabado. Los granos se transportan en un lodo de agua con concentraciones de 20% a 60% en volumen; el lodo también desaloja los desechos de la zona de corte.

Maquinado ultrasónico rotatorio (RUM, por sus siglas en inglés). En este proceso, el lodo abrasivo se reemplaza con una herramienta que tiene abrasivos de diamante aglutinados con metal impregnado o electrodepuesto sobre la superficie de la herramienta. La herramienta se hace vibrar mediante ultrasonido y se gira al mismo tiempo que se oprime contra la superficie de la pieza de trabajo a una presión constante. El proceso es similar a una operación de fresado frontal (fig. 24.5), reemplazando los insertos con abrasivos. Las virutas generadas se desechan mediante un refrigerante bombeado a través del núcleo de la herramienta rotatoria. El proceso de maquinado ultrasónico rotatorio es muy efectivo en la producción de orificios profundos y altas velocidades de remoción de material en partes de cerámicos.

Consideraciones de diseño para el maquinado ultrasónico. Los lineamientos básicos de diseño para el UM incluyen los siguientes:

- Evitar perfiles, esquinas y radios agudos, porque se erosionan con el lodo abrasivo.
- Los orificios producidos tienen cierta conicidad.

- Dada la tendencia de los materiales frágiles a astillarse en el extremo de salida de los orificios maquinados, la parte inferior de las partes debe tener una placa de respaldo.

26.7 Operaciones de acabado

Además de los ya descritos, también se utilizan diversos procesos que emplean granos abrasivos finos en piezas de trabajo como operación final de acabado. Sin embargo, dichas operaciones pueden contribuir de manera significativa al tiempo de producción y costo del producto, por lo que deben especificarse con la debida consideración a sus costos y beneficios.

Abrasivos recubiertos. Ejemplos comunes de *abrasivos recubiertos* son las lijas de papel y la tela de esmeril. La mayoría de los abrasivos recubiertos se fabrican con óxido de aluminio. El resto ha sido elaborado con carburo de silicio y alúmina de zirconio. Por lo general, tienen una estructura mucho más abierta que los abrasivos en los discos de rectificado y poseen granos que son más afilados. Los granos se depositan electrostáticamente sobre materiales de refuerzo, como papel, algodón, poliéster de rayón, polinailon y diversas mezclas de estos materiales. Como se muestra en la figura 26.25, por lo común el material aglutinante (matriz) es resina, que primero se aplica al refuerzo (*recubrimiento de cierre*); después los granos se aglutinan con una segunda capa (*recubrimiento de tamaño*). Los granos tienen sus ejes largos perpendiculares al plano del refuerzo, mejorando así su acción de corte.

Existen abrasivos recubiertos en forma de hojas, bandas y discos. Se utilizan en gran medida para dar acabado a superficies planas o curvadas de partes metálicas y no metálicas, especimenes metalográficos y en trabajos de madera. La precisión del acabado superficial obtenido depende del tamaño del grano.

Rectificado por banda. Los abrasivos recubiertos también se utilizan como *bandas* para remoción de material a alta velocidad con buen acabado superficial. El *rectificado por banda* se ha convertido en un proceso de producción importante, que en algunos casos reemplaza las operaciones de rectificado convencional. Existen bandas con números de grano que van de 16 a 1500. Las velocidades de las bandas van de 700 a 1800 m/min (2500 a 6000 pies/min). Las máquinas para operaciones por banda abrasiva requieren un soporte de banda apropiado y tienen una construcción rígida a fin de minimizar vibraciones.

Los abrasivos convencionales recubiertos tienen abrasivos colocados de manera aleatoria sobre su superficie y pueden constar de capas simples o múltiples de abrasivos. Otra técnica es la *microrréplica*, en la que los abrasivos se colocan en un orden predeterminado sobre la superficie de la banda en forma de diminutas pirámides de óxido de aluminio. Utilizadas en aceros inoxidables y superaleaciones, su desempeño es más consistente y las temperaturas correspondientes son inferiores. Sus aplicaciones comunes incluyen rectificado por banda de implantes quirúrgicos, palos de golf, armas de fuego e instrumentos médicos y dentales.

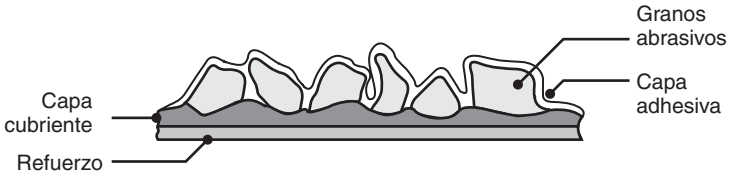


FIGURA 26.25 Esquema de la estructura de un abrasivo recubierto. La lija de papel (desarrollada en el siglo XVI) y la tela de esmeril son ejemplos comunes de abrasivos recubiertos.

EJEMPLO 26.5 Rectificado por banda de álabes para tobera de turbinas

El álabe para tobera de turbina mostrado en la figura 26.26 se fabricó mediante fundición por revestimiento (sección 11.8) de una superaleación de base cobalto. Para re-

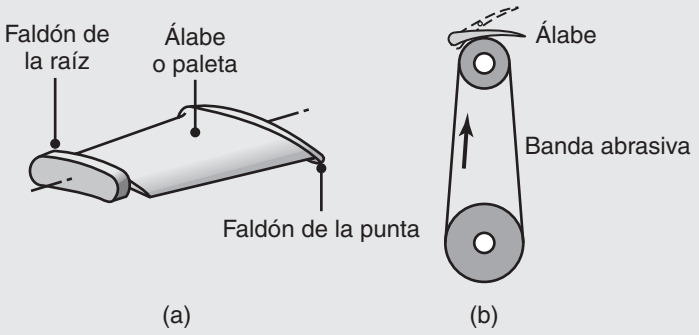


FIGURA 26.26

mover una delgada capa de difusión de las secciones del faldón de la raíz y el faldón de la punta del álabe, se rectificó en una banda abrasiva con refuerzo de tela (óxido de aluminio de grano 60). Los álabes se montaron en un soporte y se rectificaron en seco a una velocidad de banda de 1800 m/min (6000 pies/min). La velocidad de producción fue de 93 segundos por pieza. Cada álabe pesaba 21.65 g antes y 20.25 g después del rectificado por banda, una reducción en peso de casi 6.5%.

Fuente: Cortesía de ASM International.

Cepillado con alambre. En este proceso, también conocido como *cepillado de potencia*, la pieza de trabajo se sujeta contra un cepillo de alambre circular que gira a velocidades que van de 1750 rpm para discos grandes hasta 3500 rpm para discos pequeños. Al frotar, las puntas del alambre producen raspados longitudinales sobre la superficie de la pieza. El cepillado con alambre se utiliza para producir una textura superficial fina o controlada; si se realiza en las condiciones adecuadas, también se puede considerar un proceso ligero de remoción de material. Además de los alambres metálicos, pueden usarse de manera efectiva alambres poliméricos (nailon) embebidos con abrasivos. (Ver también *sierras de alambre de diamante*, sección 24.5).

Honeado. El *honeado o asentado* es una operación que se utiliza principalmente para mejorar el acabado superficial producido por procesos como el mandrinado, el taladrado y el rectificado interno. La herramienta de honeado consta de un juego de barras, por lo general conocidas como *piedras* (fig. 26.27). Se montan en un mandril que gira dentro del orificio a velocidades superficiales de 45 a 90 m/min (150 a 300 pies/min), aplicando una fuerza radial. La herramienta tiene un movimiento axial alternativo que produce un patrón cruzado en la superficie del orificio. Las piedras pueden ajustarse en forma radial

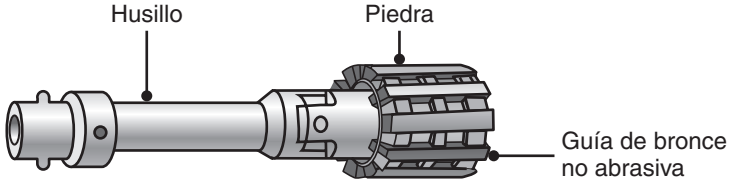


FIGURA 26.27 Esquema de una herramienta de honeado utilizada para mejorar el acabado superficial de orificios mandrinados o esmerilados.

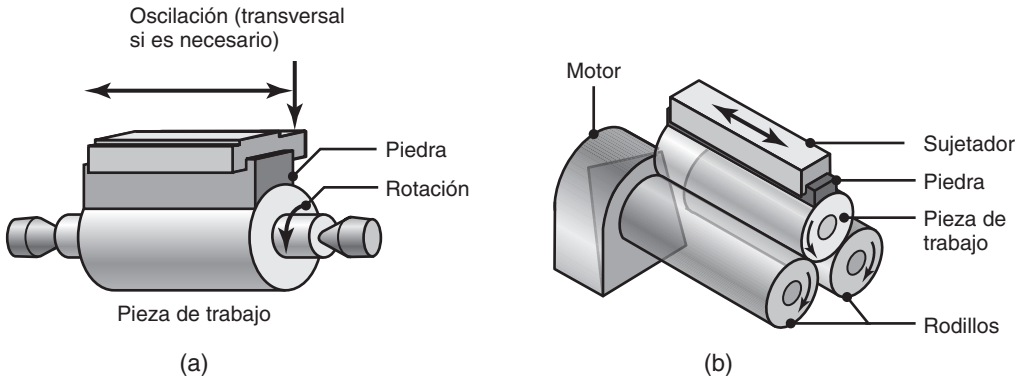


FIGURA 26.28 Esquemas del proceso de superacabado de una parte cilíndrica. *(a)* Microhoneado cilíndrico. *(b)* Microhoneado sin centros.

para diferentes tamaños de orificios. Por lo regular, se utilizan fluidos de honeado, que son base agua o aceite y ayudan a limpiar los residuos. El honeado se efectúa en superficies externas cilíndricas o planas y para eliminar aristas afiladas en herramientas de corte e insertos. (Ver fig. 22.5).

Se puede controlar la calidad del acabado superficial producido por honeado mediante el tipo y tamaño de abrasivo utilizado, la presión aplicada y la velocidad. Se emplea un fluido para retirar las virutas y mantener bajas las temperaturas. Si no se realiza de manera apropiada, el honeado puede producir orificios que no sean rectos ni cilíndricos, sino con forma abocinada, ondulada, abarrilada o cónica.

Superacabado. En este proceso, la presión aplicada es muy leve y el movimiento de la piedra de honeado tiene un recorrido corto. Su movimiento se controla de manera que los granos no se desplacen a lo largo de la misma trayectoria sobre la superficie de la pieza de trabajo. En la figura 26.28 se muestran ejemplos de superacabado externo de una parte redonda.

Lapeado. Esta operación sirve para dar acabado a las superficies planas, cilíndricas o curvadas. La *piedra de lapeado* (fig. 26.29a) es relativamente blanda y porosa, y por lo

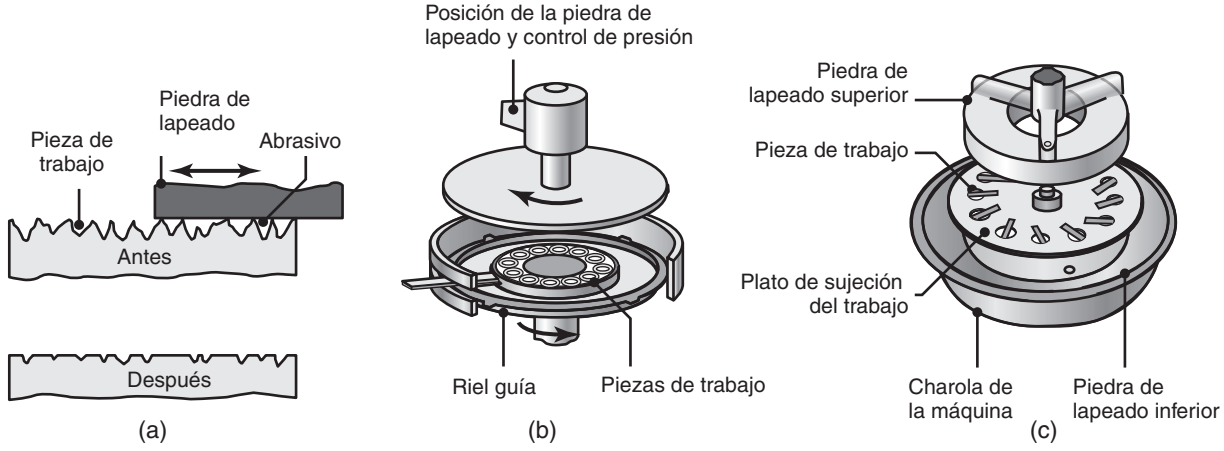


FIGURA 26.29 *(a)* Esquema del proceso de lapeado. *(b)* Lapeado de producción sobre superficies planas. *(c)* Lapeado de producción sobre superficies cilíndricas.

general se fabrica con hierro fundido, cobre, piel o tela. Las partículas abrasivas se embuten en la piedra de lapear o pueden transportarse mediante un lodo. El lapeado de objetos esféricos y lentes de vidrio se realiza mediante piedras moldeadas especialmente. El *asentado* de los engranes coincidentes se puede efectuar por lapeado, como en los engranes hipoides para ejes traseros. Dependiendo del tipo y la dureza del material de la pieza de trabajo, las presiones de lapeado van de 7 a 140 kPa (1 a 20 psi).

En el lapeado se pueden obtener tolerancias dimensionales de ± 0.0004 mm (0.000015 pulgada) utilizando abrasivos finos hasta de tamaño de grano 900 y el acabado superficial puede ser hasta de 0.025 a 0.1 μm (1 a 4 μpulg). El lapeado de producción en piezas planas o cilíndricas se efectúa en máquinas similares a las mostradas en la figura 26.29b y c.

Pulido. El *pulido* es un proceso que produce un acabado superficial liso y lustroso. Su mecanismo básico es el ablandamiento y extendido de las capas superficiales debido a calentamiento por fricción, que se desarrolló durante el pulido y la remoción a escala muy fina mediante abrasivos de la superficie de la pieza de trabajo. La apariencia brillante de las superficies pulidas se produce por la acción de extendido.

El pulido se realiza por medio de discos o bandas fabricadas con textiles, cuero o fieltro, que comúnmente se recubren con polvos finos de óxido de aluminio o diamante. En el *pulido de dos caras* se fijan pares de almohadillas en las caras de los platos que giran en forma horizontal y en direcciones opuestas. Las partes con formas irregulares, esquinas afiladas, recesos profundos y proyecciones puntiagudas pueden ser difíciles de pulir.

Pulido químico-mecánico. El *pulido químico-mecánico* (CMP, por sus siglas en inglés) es de gran importancia en la industria de los semiconductores. El proceso se muestra en la figura 26.30 y utiliza una suspensión de partículas abrasivas en una solución acuosa con una química seleccionada para generar una corrosión controlada. Por lo tanto, este proceso retira material de la pieza de trabajo mediante los efectos de abrasión y corrosión combinados. Los resultados son una superficie de acabado superficial excepcionalmente fino y una pieza de trabajo muy plana. Por esta razón, es frecuente hacer referencia a dicho proceso como **planarización química-mecánica**.

Una aplicación importante de este proceso es el pulido de obleas de silicio (sección 28.4). En este caso, la función principal del CMP consiste en pulir una oblea a nivel micro. Por lo tanto, para retirar material de manera uniforme de toda la oblea, ésta se sujeta sobre un soporte giratorio con la cara hacia abajo y se presiona contra un paño de pulido montado en un disco rotatorio, como se muestra en la figura 26.30. Se puede demostrar que la velocidad relativa del paño es constante a través del disco, ya que si la

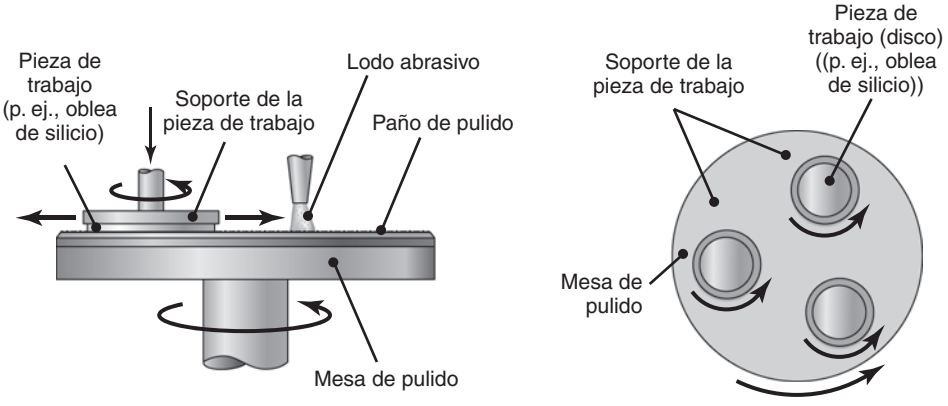


FIGURA 26.30 Esquema del proceso de pulido químico-mecánico (CMP). Este proceso se utiliza ampliamente en la manufactura de obleas de silicio y circuitos integrados y también se conoce como *planarización química-mecánica*. Para otros materiales y aplicaciones, es posible utilizar más soportes y más discos por soporte.

oblea no estuviera girando, la velocidad cambiaría con el radio. El paño contiene ranuras cuyo objetivo es suministrar lodo de manera uniforme a todas las obleas. Además, la rotación del paño asegura que no se desarrolle una capa lineal (ver sección 33.3).

Se han desarrollado combinaciones específicas de abrasivos y soluciones químicas para el pulido de cobre, silicio, dióxido de silicio, aluminio, tungsteno y otros materiales. Por ejemplo, para pulir dióxido de silicio o silicio, se alimenta continuamente un lodo alcalino de sílice coloidal (partículas de SiO_2 en una solución de KOH o NH4OH) a la interfaz del paño-oblea.

Electropulido. Mediante el *electropulido* se pueden obtener acabados a espejo sobre superficies metálicas; este proceso es el inverso de la electrodeposición (que se describe en la sección 34.9). Debido a que no hay contacto mecánico con la pieza de trabajo, el proceso es apropiado en particular para pulir formas irregulares. El electrolito ataca proyecciones y picos sobre la superficie de la pieza a una velocidad más alta que el resto de la superficie, produciendo una superficie lisa. El electropulido también se utiliza en operaciones de rebabeo.

Pulido con campos magnéticos. En esta técnica, los lodos abrasivos se sostienen con campos magnéticos. Existen dos métodos básicos.

En el *pulido de flotación magnética* de las bolas de cerámica, esquematizado en la figura 26.31a, se llena la cámara con un fluido magnético (que contiene granos abrasivos y partículas ferromagnéticas muy finas en un fluido transportador, como agua o queroseno) por medio de un anillo guía. Las bolas cerámicas se localizan entre una flecha impulsora y un flotador. Los granos abrasivos, las bolas cerámicas y el flotador (que se fabrica con un material no magnético) se suspenden mediante fuerzas magnéticas. Las bolas se presionan contra la flecha de accionamiento rotatorio y se pulen mediante la acción abrasiva. Las fuerzas aplicadas por las partículas abrasivas sobre las bolas son extremadamente pequeñas y controlables, de ahí que la acción de pulido sea muy fina. Debido a que los tiempos de pulido son muy inferiores a los comprendidos en otros métodos de pulido, este proceso es muy económico y las superficies producidas tienen pocos defectos significativos, en caso de que existan.

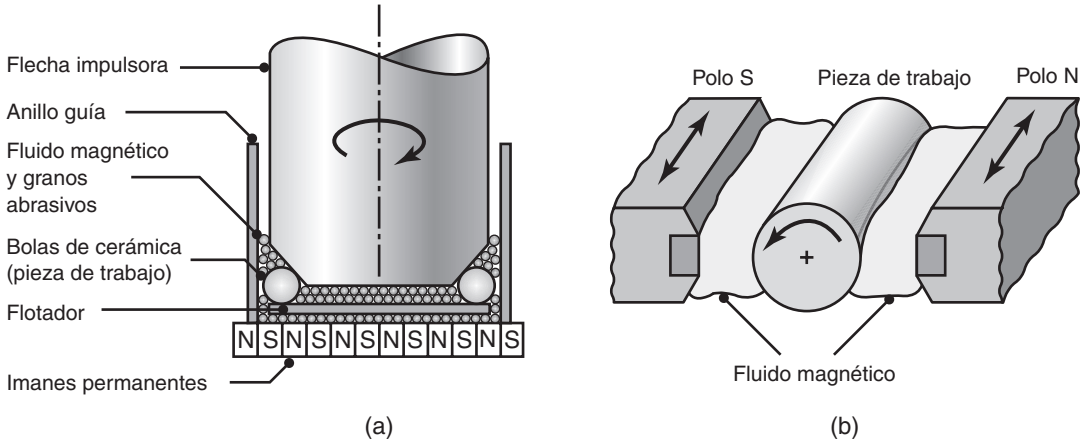


FIGURA 26.31 Esquema del pulido de bolas y rodillos utilizando campos magnéticos. *(a)* Pulido de flotación magnética de bolas cerámicas. *(b)* Pulido asistido por campo magnético de rodillos. *Fuente*: R. Komanduri, M. Doc y M. Fox.

En la figura 26.31b se ilustra el *pulido asistido por campo magnético* de rodillos de cerámicos. Un rodillo de cerámicos o metálico (como la pieza de trabajo) se sujeta y gira en un husillo. Se oscilan los polos magnéticos introduciendo un movimiento vibratorio al conglomerado abrasivo-magnético. Esta acción pule la superficie cilíndrica del rodillo. Mediante este proceso se les ha dado acabado de espejo a los aceros para rodamientos de 63 HRC en 30 segundos.

Abrillantado. El *abrillantado* es similar al pulido (excepto porque se obtiene un acabado superficial uniforme aún más fino) utilizando abrasivos muy finos en discos blandos, que por lo común se fabrican con tela o cuero. El abrasivo se suministra externamente de una varilla de compuesto abrasivo.

26.8 Operaciones de rebabeo

Las **rebabas** son rebordes delgados, por lo general de forma triangular, que se desarrollan a lo largo de los bordes de una pieza de trabajo debido a operaciones como maquinado, cizallamiento de láminas metálicas (como en las figs. 16.2 y 16.3) y recorte de forjas y fundiciones. Las rebabas se pueden detectar por medios simples, como el dedo, un palillo o un hisopo. La inspección visual de las rebabas incluye el uso de lupas y microscopios. Aunque se están realizando esfuerzos, no existen estándares ampliamente aceptados para definir las rebabas, en parte porque puede existir una variedad de rebabas que se desarrollan en las partes.

Las rebabas tienen diversas desventajas: *(a)* pueden interferir en el ensamble mecánico de las partes y provocar su atascamiento, desalineación y cortos circuitos en componentes eléctricos. *(b)* Debido a que generalmente son puntiagudas, pueden representar un riesgo de seguridad para el personal. *(c)* Las rebabas reducen la vida a la fatiga de los componentes. Por otro lado, las rebabas en componentes taladrados o roscados (como las partes diminutas en relojes y mecanismos mecánicos) pueden aportar un espesor adicional y mejorar, por lo tanto, el torque de sujeción de los tornillos.

Existen diversos **procesos de rebabeo**. Su costo-efectividad depende de factores como el grado de rebabeo requerido, la complejidad de la parte y la ubicación de la rebaba, el número de partes a rebabear, el espacio de piso disponible, los costos de mano de obra y las consideraciones de seguridad y ambientales. Las operaciones de rebabeo incluyen:

1. Rebabeo manual con limas y rasquetas. Se calcula que el rebabeo manual puede sumar hasta 10% del costo de manufactura de la parte.
2. Rebabeo mecánico mediante el maquinado de partes cilíndricas en un husillo rotatorio.
3. Cepillado con alambre o utilizando cepillos rotatorios de nailon, que constan de filamentos embebidos con arenillas abrasivas.
4. Bandas abrasivas.
5. Maquinado ultrasónico.
6. Electropulido.
7. Maquinado electroquímico.
8. Acabado magnético-abrasivo.
9. Acabado vibratorio.
10. Limpieza con chorro de granalla o de abrasivo.

11. Maquinado de flujo abrasivo (como la extrusión de un lodo abrasivo semisólido sobre los bordes de la parte).
12. Maquinado por energía térmica utilizando láser o plasma.

A continuación, se describen los últimos cuatro procesos; otros se tratan más adelante en este libro.

Acabado vibratorio y en tambor. Estos procesos se utilizan para retirar rebabas de grandes cantidades de piezas relativamente pequeñas. En esta operación tipo lote, se colocan *partículas abrasivas* moldeadas de manera particular, fabricadas con medios metálicos y no metálicos (bolas o piedras) en un contenedor junto con las partes a rebabear. Se hace *vibrar* o se *sacude* el contenedor mediante diversos medios mecánicos. El impacto de los abrasivos individuales y de las partículas metálicas retira las rebabas y las aristas agudas de las partes. Dependiendo de la aplicación, este puede ser un proceso *seco* o *húmedo*. Se pueden agregar compuestos líquidos con objeto de disminuir o aumentar la resistencia a la corrosión de la parte que se rebabea. Cuando se usan fluidos y abrasivos químicamente activos, se convierte en una forma de pulido químico-mecánico.

Limpieza con chorro de abrasivo. También conocido como **chorro de granos**, éste comprende partículas abrasivas (por lo general, arena) que se impulsan mediante un chorro de aire a alta velocidad, o mediante un disco rotatorio, sobre la superficie de la pieza de trabajo. La limpieza con chorro de abrasivos es particularmente útil en el rebabeo de materiales metálicos y no metálicos y en el descostrado, limpieza y remoción de óxidos de la superficie. Las superficies producidas tienen un acabado mate, pero se puede producir un daño superficial si los parámetros del proceso no se controlan en forma apropiada. La limpieza con **chorro microabrasivo** consiste en un pulido a pequeña escala y ataque, utilizando abrasivos muy finos, en unidades tipo banco.

Maquinado de flujo abrasivo. Éste comprende el uso de granos abrasivos, como carburo de silicio o diamante, que se mezclan en una matriz tipo masilla y después se fuerzan hacia delante y hacia atrás a través de aperturas y pasajes en la pieza de trabajo. El movimiento de la matriz abrasiva bajo presión erosiona rebabas y esquinas puntiagudas y pule la parte. Este proceso es muy apropiado para piezas con cavidades internas, como las producidas por fundición, que son inaccesibles por otros medios. Las presiones aplicadas van de 0.7 a 22 MPa (100 a 3200 psi). Las superficies externas también pueden rebabearse con este método, conteniendo la pieza de trabajo dentro de un aditamento que dirige los medios abrasivos a los bordes y las áreas a rebabear. En la figura 26.32 se ilustra el rebabeado del propulsor de una turbina por maquinado de flujo abrasivo.

Rebabeo por energía térmica. Este proceso consiste en colocar la parte en una cámara, donde después se inyecta una mezcla de gas natural y oxígeno. Al incendiarse la mezcla, se produce una explosión de calor a una temperatura de unos 3300 °C (6000 °F). Las rebabas se calientan y funden de modo instantáneo, en tanto que la temperatura de la parte alcanza tan sólo alrededor de 150 °C (300 °F). Sin embargo, existen desventajas para este proceso: *(a)* las rebabas más grandes tienden a formar perlas después de fundirse, *(b)* las partes delgadas y esbeltas se pueden distorsionar, y *(c)* no pule ni abrillanta las superficies de la pieza de trabajo, como lo hacen muchos otros procesos de rebabeo.

Rebabeo robótico. El rebabeo y la remoción de rebabas de productos terminados se efectúan cada vez más mediante *robots programables* (sección 37.6), utilizando un sistema de retroalimentación de fuerzas para controlar la trayectoria y velocidad de la remoción de las rebabas. Este método elimina la mano de obra manual tediosa y costosa y

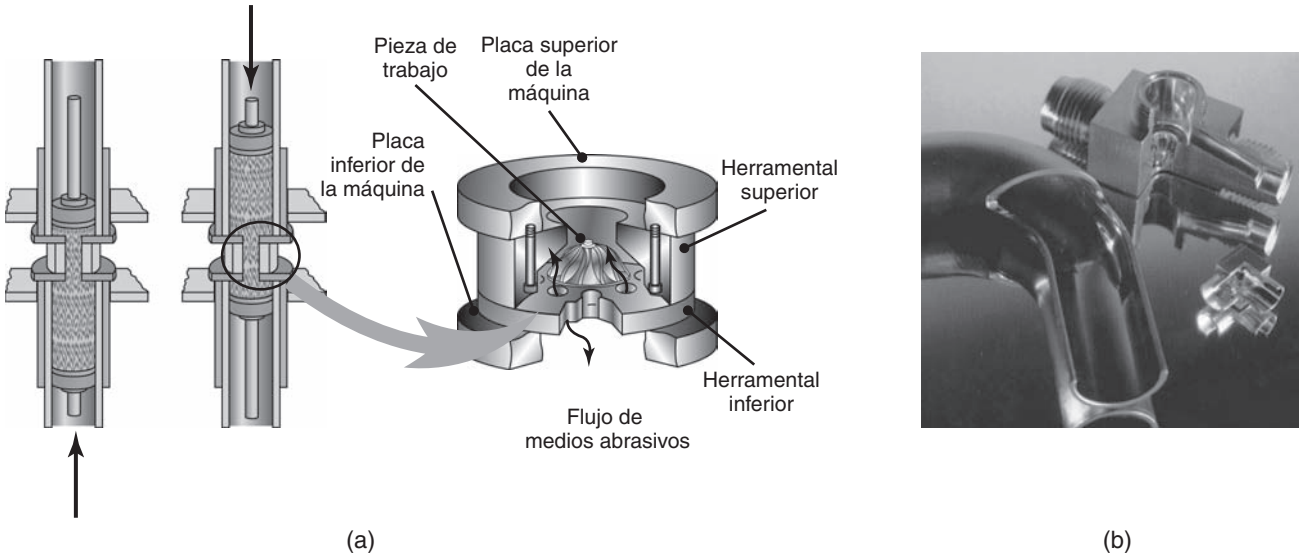


FIGURA 26.32 *(a)* Esquema del maquinado de flujo abrasivo para rebabeo de un propulsor de turbina. Las flechas indican el movimiento de los medios abrasivos. Obsérvese el soporte especial, que generalmente es diferente para el diseño de cada parte. *(b)* Accesorios de válvula tratados por maquinado de flujo abrasivo para eliminar rebabas y mejorar la calidad de la superficie. *Fuente*: Cortesía de Extrude Hone Corp.

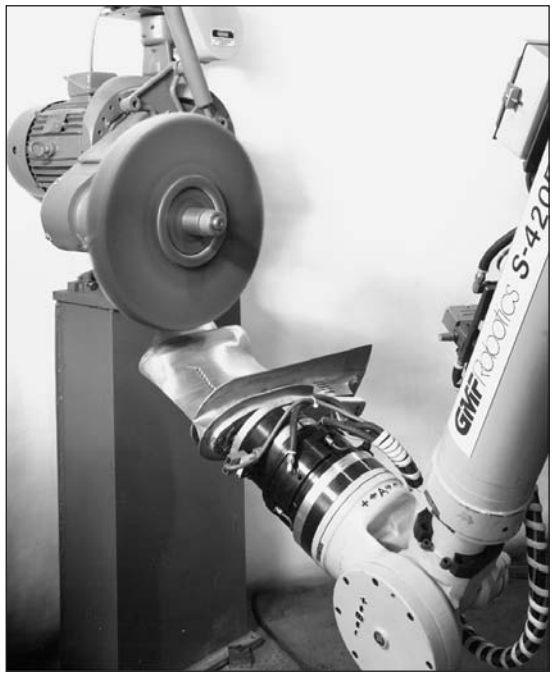


FIGURA 26.33 Operación de rebabeo en una parte fundida a presión para una carcasa de motor fuera de borda, sujeta por un robot y utilizando un disco de rectificado. También se pueden usar bandas abrasivas (fig. 26.26) o cepillos flexibles abrasivos de disco radial para dichas operaciones. *Fuente*: Cortesía de Acme Manufacturing Company

produce un rebabeo más consistente y repetible. Un ejemplo es el rebabeo robótico de una envolvente externa para motor fundido a presión que se muestra en la figura 26.33. En otra aplicación, el rebabeo manual de un engrane doble helicoidal para una caja de engranes de un helicóptero requirió 150 minutos, en tanto que el rebabeo robótico requirió 15 minutos.

26.9 Economía de las operaciones de maquinado abrasivo y de acabado

Con frecuencia son necesarias operaciones de maquinado abrasivo y acabado porque los procesos de formado, moldeado y maquinado, por sí solos, no logran una precisión dimensional suficientemente alta o una buena calidad de los acabados superficiales. Los procesos abrasivos pueden utilizarse como un proceso de acabado y como una operación de remoción de material a gran escala. Por ejemplo, el rectificado de avance lento es una alternativa económica para operaciones de maquinado (como el fresado), aunque el desgaste del disco es alto. También el rectificado y torneado duro se ha vuelto competitivo en ciertas aplicaciones específicas.

Se han realizado muchos avances en la automatización del equipo implicado en estas operaciones, incluyendo el uso de controles por computadora, optimización del proceso y manejo robótico de las partes. Por consiguiente, se han reducido los costos de la mano de obra y los tiempos de producción, aunque en general dicha maquinaria requiere una inversión significativa de capital.

Puesto que son operaciones adicionales, los procesos descritos en este capítulo pueden contribuir de manera significativa al costo de producción. Además, al aumentar el requisito de acabado superficial, son necesarias más operaciones, por lo que el costo

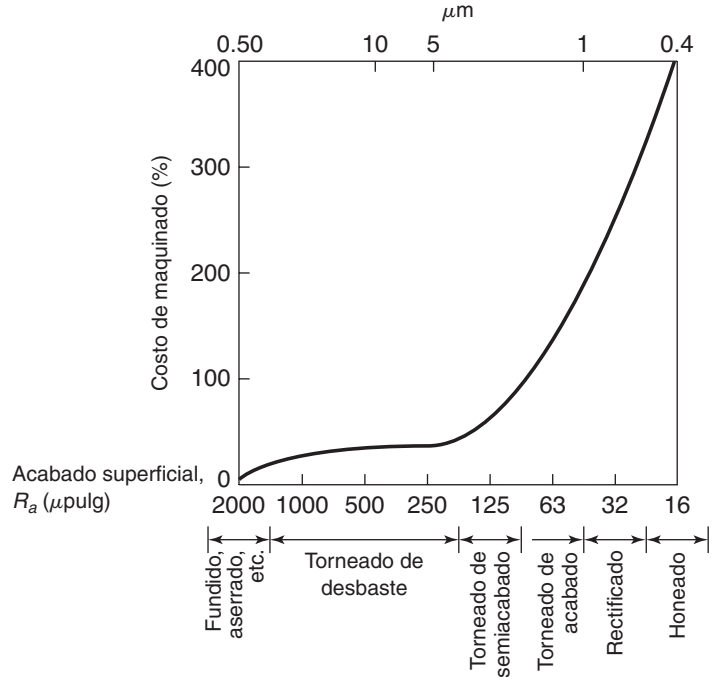


FIGURA 26.34 Aumento en el costo de maquinado y acabado de una parte en función del acabado superficial requerido. Esta es la razón principal por la que el acabado superficial especificado en partes no debe ser más fino de lo necesario para que la parte funcione apropiadamente.

aumenta más, como se muestra en la figura 26.34. Obsérvese la rapidez con que se incrementa el costo al mejorar el acabado superficial mediante procesos adicionales, como el rectificado y el honeado.

El costo de los componentes (como equipo, herramientas, mano de obra y experiencia del operador) en procesos abrasivos varía ampliamente. En tanto que para el rectificado los costos de la maquinaria pueden ser altos, para otros procesos de acabado son bastante bajos. Por lo general, los costos de los discos de rectificado son bajos en comparación con otros aspectos de la operación general de rectificado. Sin embargo, como ya se mencionó, el costo de los discos puede ser hasta de cientos o incluso miles de dólares, dependiendo de su composición y tamaño. Los costos de las herramientas de acabado, como las del honeado y lapeado, varían ampliamente. Los costos de mano de obra y experiencia del operador dependen en gran medida de cuán automatizado esté el equipo.

Si es posible que el acabado sea un factor importante en la manufactura de un producto en particular, las etapas conceptuales y de diseño deben comprender un análisis del nivel de acabado superficial y precisión dimensional requeridos y de si se pueden relajar. Además, debe examinarse la capacidad de todos los procesos que preceden a las operaciones de acabado para producir características de una superficie más aceptable. Como ya se describió en este libro, esto puede lograrse mediante la selección apropiada de herramientas, los parámetros de proceso, los fluidos para trabajo de los metales, las características de las máquinas herramienta y los dispositivos de sujeción de las piezas de trabajo implicadas.

RESUMEN

- El maquinado abrasivo suele ser necesario y económico cuando la dureza de la pieza de trabajo es alta, los materiales son frágiles y los requisitos de acabado superficial y tolerancia dimensional resultan elevados.
- Los abrasivos convencionales son el óxido de aluminio y el carburo de silicio. Los superabrasivos son el nitruro de boro cúbico y el diamante. La friabilidad de los granos abrasivos es un factor importante en su comportamiento, como lo son la forma y el tamaño de los granos.
- Los discos de rectificado consisten en una combinación de granos abrasivos y agentes aglutinantes. Las características importantes de los discos son el tipo de aglutinante y el grado y la dureza del grano abrasivo. Los discos también pueden reforzarse para mantener su integridad si se desarrolla una grieta durante su uso.
- El desgaste de los discos de rectificado es una consideración importante en la calidad de la superficie y la integridad del producto rectificado. El afilado y ajuste de los discos son operaciones básicas y se realizan mediante diversas técnicas.
- Existen varios procesos de maquinado abrasivo y maquinaria de rectificado superficial, externo e interno. El maquinado abrasivo también se utiliza para procesos de remoción de material a gran escala (como rectificado de avance lento), haciéndolo competitivo con procesos de maquinado como el fresado y torneado.
- La selección de abrasivos y variables del proceso, incluyendo fluidos para rectificado, es importante para obtener el acabado superficial y la precisión dimensional deseados. En caso contrario, pueden desarrollarse daños a las superficies (como quemado, agrietamiento por calor, esfuerzos residuales perjudiciales y traqueteo).
- Existen diversas operaciones de acabado para mejorar el acabado superficial. Sin embargo, dado que pueden contribuir en forma significativa al costo del producto, son importantes la selección e implantación adecuadas de estas operaciones.
- El rebabeo puede ser necesario para ciertos componentes acabados. Los métodos que se utilizan comúnmente son acabado vibratorio, acabado en tambor y chorro abrasivo, aunque también existen la energía térmica y otros métodos.

TÉRMINOS CLAVE

Abrasivos
Abrasivos aglutinados
Abrasivos recubiertos
Abrillantado
Acabado
Afilado
Aglutinante resinoide
Aglutinante vitrificado
Agrietamiento por calor
Ajuste
Caras de desgaste
Carburo de silicio
Cepillado con alambre
Chispas
Desgaste por rozamiento del grano (atrición)
Diamante
Discos de corte libre
Discos rectificado
Dureza del disco
Electropulido
Energía específica
Esmerilado de desbaste
Estructura del disco
Friabilidad
Gel sembrado
Grado
Honeado
Lapeado
Maquinado por flujo abrasivo
Maquinado ultrasónico
Maquinado ultrasónico rotatorio
Maquinado vibratorio
Marcas de traqueteo
Microrréplica
Nitruro de boro cúbico
Número de grano
Óxido de aluminio
Profundidad de corte del disco
Pulido
Pulido asistido por campo magnético
Pulido de flotación magnética
Pulido químico-mecánico
Quemado
Quemadura metalúrgica
Rebaba
Rebabeo
Rebabeo robótico
Rectificabilidad
Rectificado
Rectificado de avance lento
Rectificado de bajo esfuerzo
Rectificado por banda
Relación de rectificado
Revenido
Sonotrodo
Superabrasivos
Superacabado
Tamaño de grano
Tapado
Vidriado

BIBLIOGRAFÍA

Andrew, C., Howes, T. D. y Pearce, T. R. A., *Creep Feed Grinding*, Industrial Press, 1985.

ASM Handbook, Vol. 16: *Machining*, ASM International, 1989.

Brown, J., *Advanced Machining Technology Handbook*, McGraw-Hill, 1998.

Farago, F. T., *Abrasive Methods Engineering*, Vol. 1 y Vol. 2, Industrial Press, 1976 y 1980.

Gillespie, L. K., *Deburring and Edge Finishing Handbook*, Society of Manufacturing Engineers/American Society of Mechanical Engineers, 2000.

_____, *Hand Deburring—Increasing Shop Productivity*, Society of Manufacturing Engineers, 2003.

Hwa, L. S., *Chemical Mechanical Polishing in Silicon Processing*, Academic Press, 1999.

King, R. I. y Hahn, R. S., *Handbook of Modern Grinding Technology*, Chapman & Hall/Methuen, 1987.

Krar, S., *Grinding Technology*, 2a. ed., Delmar Publishers, 1995.

Krar, S. y Ratterman, E., *Superabrasives: Grinding and Machining with CBN and Diamond*, McGraw-Hill, 1990.

Machinery's Handbook, Industrial Press, actualizado periódicamente.

Machining Data Handbook, 3a. ed., 2 vols., Machinability Data Center, 1980.

Malkin, S., *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*, Wiley, 1989.

Marinescu, I. D. (ed.), *Handbook of Ceramics Grinding & Polishing*, Noyes, 1998.

Maroney, M. L., *A Guide to Metal and Plastic Finishing*, Industrial Press, 1991.

Metzger, J. L., *Superabrasive Grinding*, Butterworth, 1986.

Nachtman, E. S. y Kalpakjian, S., *Lubricants and Lubrication in Metalworking Operations*, Marcel Dekker, 1985.

Salmon, S. C., *Modern Grinding Process Technology*, McGraw-Hill, 1992.

Schneider, A. F., *Mechanical Deburring and Surface Finishing Technology*, Marcel Dekker, 1990.

Shaw, M. C., *Principles of Abrasive Processing*, Oxford, 1996.
Sluhan, C. (ed.), *Cutting and Grinding Fluids: Selection and Application*, Society of Manufacturing Engineers, 1992.
Szymanski, A. y Borkowski, J., *Technology of Abrasives and Abrasive Tools*, Ellis Horwood, 1992.
Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4a. ed., Vol. 1: *Machining*, Society of Manufacturing Engineers, 1983.
Webster, J. A., Marinescu, I. D. y Trevor, T. D., *Abrasive Processes*, Marcel Dekker, 1999.

PREGUNTAS DE REPASO

26.1 ¿Qué es un abrasivo? ¿Qué son los superabrasivos?
26.2 ¿Cómo es el tamaño de un grano abrasivo en relación con su número?
26.3 ¿Por qué la mayoría de los abrasivos se fabrican de forma sintética?
26.4 Describa la estructura de un disco de rectificado y sus características.
26.5 Explique las características de cada tipo de aglutinante utilizado en los abrasivos aglutinados.
26.6 Describa *(a)* el grado, y *(b)* la estructura, de los abrasivos aglutinados.
26.7 ¿Qué causa las chispas del rectificado? ¿Es útil observarlas? Explique su respuesta.
26.8 Defina quemadura metalúrgica.
26.9 Explique los mecanismos mediante los cuales se desgastan los discos de rectificado.
26.10 Defina *(a)* friabilidad; *(b)* cara de desgaste; *(c)* relación de rectificado, *(d)* ajuste, y *(e)* afilado.
26.11 Explique qué significa un disco de rectificado que actúa "blando" o que actúa "duro".
26.12 ¿Qué es el rectificado de avance lento y cuáles son sus ventajas?
26.13 ¿Cuál es el principio del maquinado ultrasónico?
26.14 Liste las operaciones de acabado que se utilizan comúnmente en las operaciones de manufactura. ¿Por qué son necesarias? Explique por qué deben minimizarse.
26.15 ¿En qué se diferencia el rectificado sin centros del rectificado cilíndrico?
26.16 ¿Cuáles son las diferencias entre los abrasivos recubiertos y los aglutinados?
26.17 ¿Qué es el agrietamiento por calor en el rectificado? ¿Cuál es su importancia?
26.18 ¿Cuál es el propósito del "lodo abrasivo" en el pulido químico-mecánico? ¿Qué pasa con el líquido?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

26.19 ¿Por qué las operaciones de rectificado son necesarias para los componentes que ya se han maquinado mediante los procesos descritos en los capítulos 23 y 24?
26.20 Explique por qué existen tantos tipos, formas y tamaños diferentes de discos de rectificado.
26.21 Explique las razones de la gran diferencia entre las energías específicas comprendidas en el maquinado (tabla 21.2) y en el rectificado (tabla 26.2).
26.22 Ya se indicó que el maquinado ultrasónico se adapta mejor para materiales duros y frágiles. Explique por qué.
26.23 Explique por qué las partes con formas irregulares, esquinas afiladas, recesos profundos y proyecciones puntiagudas pueden ser difíciles de pulir.
26.24 Explique las razones por las que se han desarrollado tantas operaciones de rebabeo con los años.
26.25 ¿Qué precauciones deben tomarse al rectificar con alta precisión? Comente sobre la máquina, los parámetros del proceso, el disco de rectificado y los fluidos de rectificado.
26.26 ¿Por qué disminuye la temperatura de rectificado con el aumento de la velocidad de trabajo (ecuación 26.4)? ¿Esto significa que para una velocidad de trabajo de cero, la temperatura es infinita? Explique su respuesta.
26.27 Describa las similitudes y diferencias en la acción de los fluidos para el trabajo de los metales entre el maquinado y el rectificado.
26.28 ¿Qué factores podrían contribuir al traqueteo en el rectificado? Explique por qué.
26.29 La relación de rectificado (G) depende de lo siguiente: el tipo de disco de rectificado, dureza de la pieza de trabajo, profundidad de corte del disco, velocidades de disco y pieza de trabajo y el tipo de fluido para rectificado. Explique por qué.

26.30 Por lo general se recomienda que, al rectificar aceros endurecidos, el disco de rectificado sea de un grado relativamente blando. Explique la razón.

26.31 En la figura 26.4, las caras abrasivas apropiadas se muestran con una flecha para cada tipo de disco. Explique por qué las demás caras de los discos no deben utilizarse para rectificado y qué consecuencias puede haber al hacerlo..

26.32 Explique los factores implicados en la selección del tipo apropiado de abrasivo para una operación particular de rectificado.

26.33 Describa los efectos de la cara de desgaste en la operación general de rectificado.

26.34 ¿Qué dificultades, en su caso, podrían encontrarse en el rectificado de termoplásticos? ¿Termofijos? ¿Cerámicos?

26.35 ¿Existen similitudes entre el rectificado, el honeado, el pulido y el abrillantado? Explique su respuesta.

26.36 ¿La relación de rectificado es importante en la evaluación de la economía de una operación de rectificado? Explique su respuesta.

26.37 Se sabe que el rectificado puede producir un acabado superficial muy fino en una pieza de trabajo. ¿Esto es necesariamente una indicación de la calidad de una parte? Explique su respuesta.

26.38 ¿Cuáles son las consecuencias de permitir que aumente la temperatura durante el rectificado?

26.39 Si no se hace apropiadamente, el honeado puede producir orificios abocinados, ondulados, abarrilados o cónicos. Explique por qué es posible que suceda esto.

26.40 Las aplicaciones de joyería requieren el rectificado de los diamantes a las formas deseadas. ¿Cómo se realiza, dado que el diamante es el material más duro que se conoce?

26.41 ¿Por qué las velocidades son mucho más altas en el rectificado que en el corte?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

26.42 Calcule las dimensiones de las virutas en el rectificado superficial para las siguientes variables del proceso: $D = 8$ pulgadas, $d = 0.001$ pulgada, $v = 100$ pies/min, $V = 6000$ pies/min, $C = 500$ por pulg^2 y $r = 20$.

26.43 Si se duplica la resistencia del material de la pieza de trabajo, ¿cuál sería el porcentaje de disminución de la profundidad de corte del disco (d) para mantener la misma fuerza de grano, manteniendo constantes todas las demás variables?

26.44 Supóngase que se está realizando una operación de rectificado superficial en las siguientes condiciones: $D = 200$ mm, $d = 0.1$ mm, $v = 40$ m/min y $V = 3000$ m/min. Después, estas condiciones se cambian como sigue: $D = 150$ mm, $d = 0.1$ mm, $v = 30$ m/min, y $V = 2500$ m/min. ¿Cuán diferente es el aumento de temperatura respecto del incremento que ocurre con las condiciones iniciales?

26.45 Calcule el aumento de porcentaje del costo de la operación de rectificado si la especificación para el acabado superficial de una parte se cambia de 63 a 16 μin.

26.46 Supóngase que el costo de energía para rectificar una parte de aluminio con un requisito específico de energía de 8 W· s/mm^3 es \$0.90 de dólar por pieza. ¿Cuál sería el costo de la energía por realizar la misma operación si el material de la pieza de trabajo fuera acero para herramientas T15?

26.47 Con base en la información proporcionada en el capítulo 23 y en éste, comente la posibilidad de producir un orificio de 10 mm que tiene 100 mm de profundidad en una aleación de cobre: *(a)* por taladrado convencional, y *(b)* por rectificado interno.

26.48 Al describir los procesos de rectificado, no se proporcionó el tipo de ecuaciones en relación con avances, velocidades, velocidades de remoción de material, tiempo total de rectificado, etc., como lo hemos hecho en las operaciones de torneado y fresado en los capítulos 23 y 24. Estudie las relaciones cuantitativas correspondientes y desarrolle dichas ecuaciones para operaciones de rectificado.

26.49 ¿Cuáles serían las respuestas al ejemplo 26.1 si la pieza de trabajo fuera titanio de alta resistencia y la anchura de corte $w = 0.75$ pulgadas? Proporcione sus respuestas en newtons.

26.50 Se sabe que, en el rectificado, ocurre agrietamiento por calor al rectificar a una velocidad de husillo de 4000 rpm, un diámetro de disco de 10 pulgadas y una profundidad de corte de 0.0015 pulgada para una velocidad de avance de 50 pies/min. Por esta razón, el procedimiento operativo estándar consiste en mantener la velocidad del husillo a 3500 rpm. Si se utiliza un disco nuevo de 8 pulgadas de diámetro, ¿qué velocidad de husillo puede usarse antes de que ocurra agrietamiento por calor? ¿Qué velocidad de husillo debe emplearse para mantener las mismas temperaturas de rectificado que las encontradas con las condiciones operativas existentes?

26.51 Se desea rectificar una aleación dura de aluminio aeroespacial. Se va a retirar una profundidad de 0.003 pulgada de una sección cilíndrica de 10 pulgadas de largo y 4 pulgadas de diámetro. Si cada parte se va a rectificar

en no más de un minuto, ¿cuál es el requisito de potencia aproximada para la rectificadora? ¿Qué sucede si el material se cambia a aleación dura de titanio?

26.52 Una operación de rectificado ocurre con un disco de rectificado de 10 pulgadas con una velocidad de husillo de 3000 rpm. La velocidad de avance de la pieza de trabajo es 60 pies/min y la profundidad de corte es 0.002 pulgada. Los termómetros de contacto registran una temperatura máxima de 1800 °F. Si la pieza es de acero, ¿cuál será la temperatura si la velocidad aumenta a 4000 rpm? ¿Qué sucede si la velocidad es de 10,000 rpm?

26.53 Derive una expresión para la velocidad angular de la oblea, como se muestra en la figura 26.30b, en función de la velocidad angular y del radio del paño en el pulido químico-mecánico.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

26.54 Liste y explique los factores que contribuyen al acabado superficial deficiente en los procesos descritos en este capítulo.

26.55 Con los dibujos apropiados, describa los principios de diversos métodos y dispositivos de fijación que se pueden utilizar para los procesos presentados en este capítulo.

26.56 Explique los lineamientos principales de diseño para rectificado.

26.57 ¿Cuál de los procesos descritos en este capítulo es apropiado en particular para piezas de trabajo fabricadas con *(a)* cerámicos; *(b)* termoplásticos, y *(c)* termofijos? ¿Por qué?

26.58 Elabore una tabla completa de las capacidades de los procesos de maquinado abrasivo. Utilizando varias columnas, describa las máquinas comprendidas, el tipo de herramientas abrasivas empleadas, las formas de las piezas en bruto y las partes producidas, los tamaños comunes máximo y mínimo, el acabado superficial, y las tolerancias y capacidades de producción.

26.59 Con base en los datos desarrollados en el problema 26.58, diga lo que piensa en relación con el procedimiento a seguir para determinar qué tipo de máquina herramienta debe seleccionarse para maquinar por medios abrasivos una pieza particular.

26.60 Los discos vitrificados de rectificado (también conocidos como discos cerámicos) utilizan un aglutinante de vidrio para mantener unidos los granos abrasivos. Dado su conocimiento sobre la manufactura de partes de cerámicos (como se indica en el capítulo 18), liste los métodos de producción de discos vitrificados.

26.61 Un tema hasta cierto punto polémico en el rectificado es el efecto del tamaño; es decir, existe un aumento aparente de la resistencia de una pieza de trabajo al reducirse la profundidad de penetración mediante abrasivos para rectificado. Diseñe un montaje experimental mediante el cual se pueda examinar este efecto de tamaño.

26.62 Describa tantos parámetros como sea posible que puedan afectar el acabado superficial final en el rectificado. Incluya parámetros del proceso, así como efectos de instalaciones y equipo.

26.63 Suponga que es un instructor que cubre los temas descritos en este capítulo y aplica un examen sobre los aspectos numéricos para evaluar los conocimientos de los alumnos. Elabore tres problemas cuantitativos y proporcione las respuestas.

26.64 Investigue en la bibliografía y explique por qué puede ser una guía útil observar el color, el brillo y la forma de las chispas producidas en el rectificado, para identificar el tipo de material que se está rectificando y sus condiciones.

26.65 Revise la figura 26.4 y proporcione posibles aplicaciones de rectificado para cada tipo de disco mostrado en ella.

26.66 Visite una ferretería grande y revise los discos de rectificado en exhibición. Elabore una nota en relación con el marcado de los discos y, con base en el sistema de marcado mostrado en la figura 26.6, comente sus observaciones, incluyendo los tipos más comunes de discos existentes en la ferretería.

26.67 Consiga un disco pequeño de rectificado o una parte de un disco grande. *(a)* Observe sus superficies utilizando una lupa o un microscopio y compárelas con la figura 26.9. *(b)* Frote el disco abrasivo oprimiéndolo con fuerza contra varios materiales planos metálicos y no metálicos. Describa lo que observa en relación con las superficies producidas.

26.68 Explique cómo produciría las bolas de acero que se rectifican posteriormente en el tipo de instalaciones mostradas en la figura 26.15.

26.69 Al revisar los procesos de maquinado abrasivo en este capítulo, observará que algunos usan abrasivos aglutinados, mientras que otros utilizan abrasivos sueltos. Haga dos listas por separado de estos procesos y comente sus observaciones.

26.70 ¿Cree que la operación de rectificado por penetración mostrada en la figura 26.17 puede competir con una operación de torneado para producir el mismo tipo de parte? Explique su respuesta.

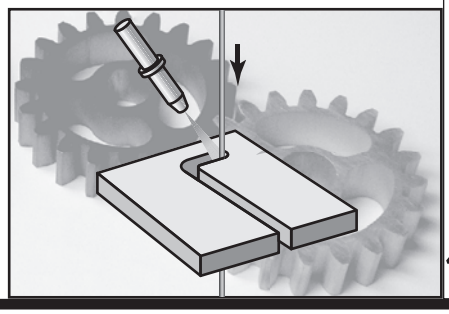
26.71 Observe los patrones de ciclo mostrados en la figura 26.20 y comente por qué se siguen esos patrones particulares.

26.72 Consiga pedazos de lija de papel y tela de esmeril de diferentes espesores. Utilizando una lupa o un microscopio, observe sus características superficiales y compárelas con la figura 26.25.

26.73 En este capítulo describimos los principios de los centros de maquinado y torneado. En el capítulo 27 presentaremos centros similares sobre operaciones de maquinado avanzado. Con base en el contenido de este capítulo, diga si es posible o no diseñar y construir un "centro de rectificado". Explique si dicho centro puede realizar todo tipo de operaciones de rectificado o si se limitaría a tipos específicos. También comente las dificultades que se tienen que superar con dichas máquinas y operaciones.

Procesos de maquinado avanzado

CAPÍTULO 27



En este capítulo se presentan procesos de maquinado avanzado que se basan en medios no mecánicos para la remoción de material. Específicamente, se describe lo siguiente:

- Fundamentos de procesos que utilizan la química, la electricidad y los haces de alta energía.
- Características de cada proceso y sus aplicaciones.
- Aspectos competitivos en comparación con otros procesos.

Partes comunes fabricadas: paneles de cubiertas para misiles y aeronaves, álabes para turbinas, boquillas, partes con cavidades complejas y orificios profundos de diámetro pequeño, matrices, corte por láser para láminas metálicas, corte de partes gruesas, metálicas y no metálicas.

Métodos alternativos: maquinado abrasivo, maquinado por ultrasonido y maquinado de precisión.

27.1 Introducción 835
27.2 Maquinado químico 836
27.3 Maquinado electroquímico 841
27.4 Rectificación electroquímica 845
27.5 Maquinado por descarga eléctrica (electroerosinado) 846
27.6 Maquinado por rayo láser 851
27.7 Maquinado por haz de electrones 854
27.8 Maquinado por chorro de agua 855
27.9 Maquinado por chorro abrasivo 858
27.10 Economía de los procesos de maquinado avanzado 858

EJEMPLO:

27.1 Combinación de corte de rayo láser y punzonado de láminas metálicas 854

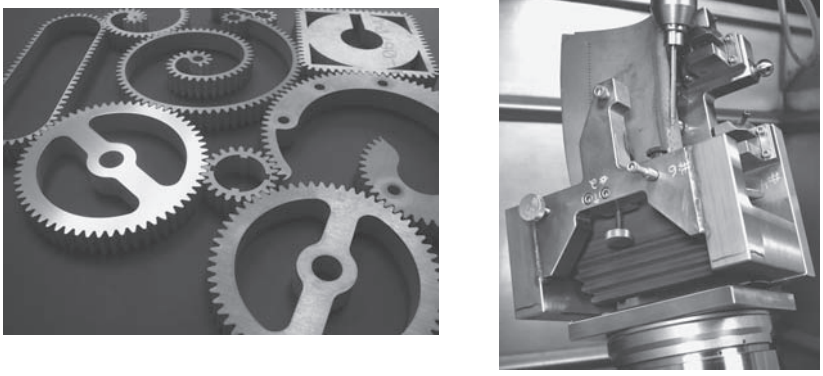
ESTUDIO DE CASO:

27.1 Maquinado electroquímico de un implante biomédico 843
27.2 Manufactura de "stents" 858

27.1 Introducción

Los procesos de maquinado descritos en los capítulos precedentes comprenden la remoción de material por medios mecánicos, ya sea mediante la formación de viruta, abrasión o microvirutas. Sin embargo, existen situaciones en las que los medios mecánicos no son satisfactorios, económicos o incluso posibles, por las siguientes razones:

- La **resistencia** y **dureza** del material de la pieza de trabajo son muy elevadas, por lo común, superiores a 400 HB.
- El material de la pieza de trabajo es muy **frágil** para maquinarlo sin dañar la pieza. Por lo común, éste es el caso de aleaciones con severos tratamientos térmicos, vidrios, cerámicos y partes de metalurgia de polvos.
- La pieza de trabajo es muy **flexible** o muy esbelta para soportar las fuerzas del maquinado o rectificado, o resulta difícil sujetar las partes en dispositivos de soporte y sujeción.
- La **forma** de la parte es *compleja* (fig. 27.1), incluyendo características como perfiles internos y externos u orificios con relaciones elevadas de longitud a diámetro en materiales muy duros.
- Existen requerimientos especiales de **acabado superficial** y **tolerancias dimensionales** que no pueden obtenerse por medio de otros procesos de manufactura o que no son económicos mediante procesos alternos.



(a) (b)

FIGURA 27.1 Ejemplos de partes fabricadas mediante procesos de maquinado avanzado. *(a)* Muestras de partes producidas por medio de corte por chorro de agua. *(b)* Álabe para turbina producido mediante maquinado por descarga eléctrica de émbolo, en un soporte para producir orificios mediante EDM. *Fuente: (a)* Cortesía de OMAX Corporation. (b) Cortesía de HI-TEK Mfg., Inc.

- No es deseable o aceptable la **elevación de la temperatura**, o los **esfuerzos residuales** desarrollados en la pieza de trabajo durante el procesamiento.

Estos requerimientos han llevado a desarrollar la química, la electricidad, los rayos láser y los haces de alta energía como fuentes de energía para retirar material de las piezas de trabajo metálicas y no metálicas, como se indica en la tabla 27.1. Estos métodos avanzados, a los que en el pasado se llamaba *maquinado no tradicional* o *no convencional*, comenzaron a introducirse en la década de 1940. Como se verá, estos procesos no retiran material mediante la generación de virutas, como en el maquinado y el rectificado, sino por medios como la disolución química, el ataque químico, la fusión, la evaporación y la acción hidrodinámica, algunas veces con la ayuda de partículas finas abrasivas. Una ventaja de estos procesos es que la dureza de la pieza de trabajo no es importante.

Cuando se seleccionan y aplican apropiadamente, los procesos de maquinado avanzado ofrecen ventajas técnicas y económicas sobre los métodos de maquinado más tradicionales. En este capítulo se describen estos procesos, incluyendo sus características, aplicaciones comunes, limitaciones, calidad de los productos, precisión dimensional, acabado superficial y economía.

27.2 Maquinado químico

El *maquinado químico* (CM, por sus siglas en inglés) se desarrolló a partir de la observación de que los productos químicos atacan y afectan a la mayoría de los metales, piedras y algunos cerámicos, retirando así pequeñas cantidades de material de la superficie. El proceso CM se efectúa mediante la disolución química y el uso de **reactivos** o **atacantes**, como las soluciones ácidas y alcalinas. El maquinado químico es el más antiguo de los procesos de maquinado avanzado y se utiliza en el grabado de piedras y metales, en rebabeo y en la producción de tableros para circuitos impresos y dispositivos microelectrónicos (ver capítulos 28 y 29).

Fresado químico. En el *fresado químico* se producen cavidades poco profundas en placas, láminas, forjas y extrusiones, por lo general para la reducción global de peso (fig. 27.2). Este proceso se ha utilizado en una amplia variedad de metales, con profundidades de remoción de metal hasta de 12 mm (0.5 pulgada). El ataque selectivo del reactivo químico sobre diferentes áreas de la superficie de la pieza de trabajo se controla por me-

TABLA 27.1

Características generales de los procesos de maquinado avanzado

Proceso	Características	Parámetros de proceso y velocidad característica de remoción de material, o velocidad de corte
Maquinado químico (CM)	Remoción poco profunda en superficies grandes planas o curvas; troquelado de láminas delgadas; bajo costo de herramental y equipo; adecuado para corridas cortas de producción.	0.0025–0.1 mm/min.
Maquinado electroquímico (ECM)	Formas complejas con cavidades profundas; la velocidad más alta de remoción de material entre otros procesos no tradicionales; herramental y equipo costoso; alto consumo de potencia; cantidades de producción medias a altas.	V: 5-25 CD; A: 1.5-8 A/mm^2; 2.5-12 mm/min, dependiendo de la densidad de corriente.
Rectificación electroquímica (ECG)	Corte y afilado de materiales duros, como herramientas de carburo de tungsteno; también se utiliza como proceso de honeado; velocidad de remoción más alta que la rectificación.	A: 1-3 A/mm^2; comúnmente 25 mm^3/s por 1000 A.
Maquinado por descarga eléctrica (EDM)	Formado y corte de partes complejas fabricadas con materiales duros; puede producir algún daño superficial; también se usa como proceso de rectificación y corte; herramental y equipo costoso.	V: 50-380; A: 0.1-500; comúnmente 300 mm^3/min.
EDM con alambre	Corte de contornos de superficies planas o curvas; equipo costoso.	Varía con el material y el espesor.
Maquinado por rayo láser (LBM)	Corte y producción de orificios en materiales delgados; zona afectada por el calor; no requiere vacío; equipo costoso; consume mucha energía.	0.50-7.5 m/min.
Maquinado por haz de electrones (EBM)	Corte y producción de orificios en materiales delgados; orificios y ranuras muy pequeñas; zona afectada por el calor; requiere vacío; equipo costoso.	1-2 mm^3/min.
Maquinado por chorro de agua (WJM)	Corte de todo tipo de materiales no metálicos; adecuado para el corte de contornos en materiales flexibles; no causa daño térmico; ruidoso.	Varía de manera considerable con el material.
Maquinado por chorro de agua abrasivo (AWJM)	Corte de una o varias capas de materiales metálicos y no metálicos.	Hasta 7.5 m/min.
Maquinado por chorro abrasivo (AJM)	Corte, ranurado, rebabeo, ataque y limpieza de materiales metálicos y no metálicos; tiende a redondear las aristas afiladas, puede ser peligroso.	Varía de manera considerable con el material.

dio de capas removibles de material (llamado **enmascaramiento**, fig. 27.3a), o mediante la inmersión parcial en el reactivo.

El procedimiento para el fresado químico es el siguiente:

1. Si la parte a maquinar tiene esfuerzos residuales procedentes del procesamiento anterior, primero deben relevarse dichos esfuerzos para evitar el alabeo después del fresado químico.
2. Las superficies se desengrasan y limpian totalmente para asegurar una buena adhesión del material enmascarador y una remoción uniforme del material. También deben eliminarse las cascarillas u otros depósitos producto del tratamiento térmico.
3. Se aplica el material enmascarador. Una práctica común es enmascarar con cintas o pinturas (**enmascarantes**), aunque también se utilizan elastómeros (hule y neopreno) y plásticos (cloruro de polivinilo, polietileno y poliestireno). El material enmascarante no debe reaccionar con el reactivo químico.

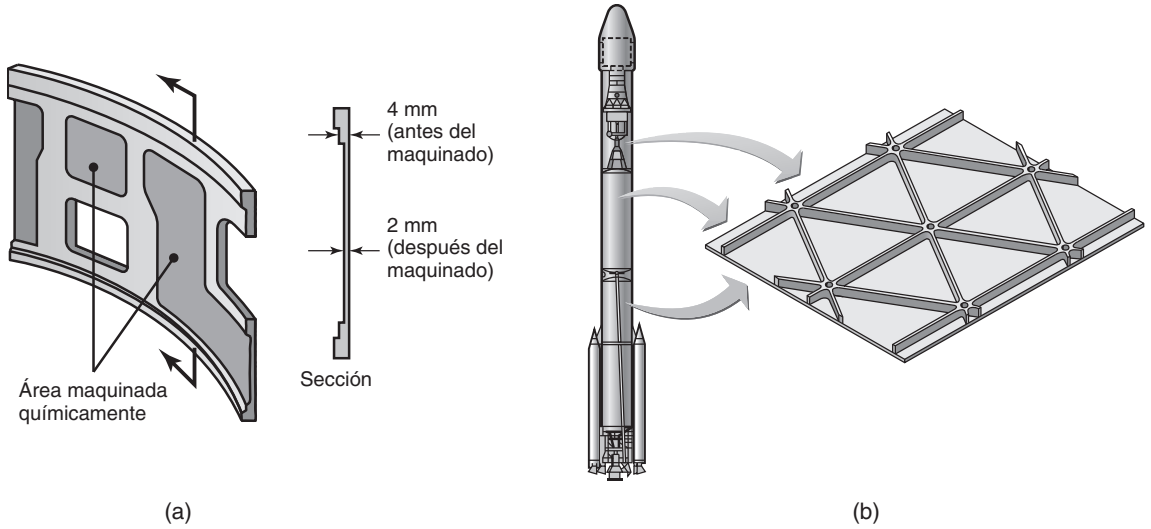


FIGURA 27.2 *(a)* Sección de panel de cubierta de misil contorneado mediante fresado químico para mejorar la relación rigidez a peso de la parte. *(b)* Reducción de peso en vehículos para lanzamiento al espacio mediante fresado químico de las placas de aleación de aluminio. Estos paneles se fresan químicamente después de que se les ha dado forma mediante un proceso como formado por rodillos o por ensanchado. El diseño de los patrones de las nervaduras maquinadas químicamente se puede modificar con facilidad a un costo mínimo.

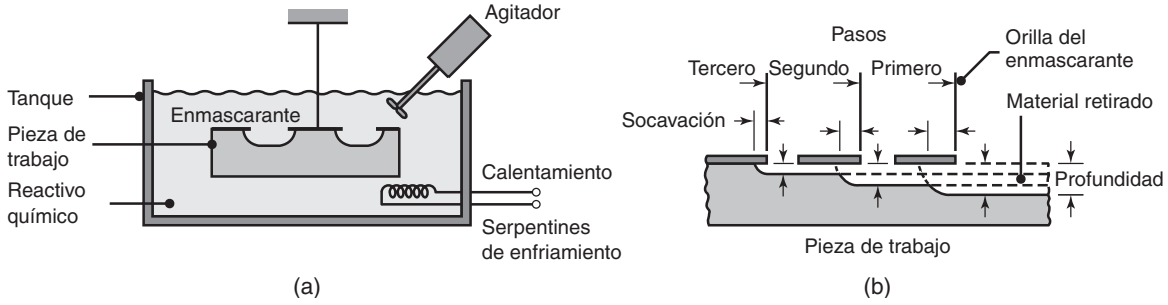


FIGURA 27.3 *(a)* Esquema del proceso de maquinado químico. Obsérvese que este proceso no implica fuerzas o máquinas herramienta. *(b)* Etapas en la producción de una cavidad perfilada mediante maquinado químico; nótese la socavación.

4. De ser necesario, el enmascarante que cubre diversas regiones que requieren ataque se retira (pela) mediante la técnica del rayado y pelado.
5. Las superficies expuestas se maquinan químicamente con reactivos atacantes, como hidróxido de sodio (para el aluminio), soluciones de ácidos clorhídrico y nítrico (para los aceros) o cloruro férrico (para los aceros inoxidables). Durante el fresado químico, es importante controlar la temperatura y la agitación (mezclado) a fin de obtener una profundidad uniforme de material retirado.
6. Después del maquinado, las partes deben lavarse totalmente para evitar reacciones posteriores con cualquier residuo atacante, o mediante la exposición al mismo.
7. Se retira el resto del material enmascarador y se limpia y revisa la parte. Obsérvese que dicho material no resulta afectado por el reactivo, pero por lo general se disuelve mediante un diferente tipo de solvente.
8. Se pueden realizar operaciones adicionales de acabado sobre las partes fresadas químicamente.
9. Esta secuencia de operaciones puede repetirse para producir cavidades escalonadas y diversos contornos (fig. 27.3b).

El fresado químico se utiliza en la industria aeroespacial para retirar capas poco profundas de material de grandes componentes de naves aéreas, paneles de la cubierta de misiles y partes extruidas de estructuras aéreas. Las capacidades de los tanques para reactivos son hasta de 3.7 m × 15 m (12 pies × 50 pies). Este proceso también se emplea en la fabricación de dispositivos microelectrónicos y con frecuencia se conoce como **ataque húmedo** para estos productos. En la figura 27.4 se muestran los intervalos de acabado superficial y tolerancias obtenidas mediante el maquinado químico y otros procesos de maquinado.

Es posible que el fresado químico cause algún daño superficial debido al *ataque preferencial* y el *ataque intergranular*, que afectan de manera adversa las propiedades de la superficie. El fresado químico de estructuras soldadas, incluso con soldadura fuerte, puede producir una remoción desequilibrada de material. El fresado químico de las fundiciones puede ocasionar superficies desniveladas, por la porosidad y falta de uniformidad del material.

Troquelado químico. El *troquelado químico* es similar al troquelado de láminas u hojas metálicas en que se utiliza para producir rasgos que traspasan el espesor del material (como se muestra en la fig. 16.4), con la excepción de que el material se retira me-

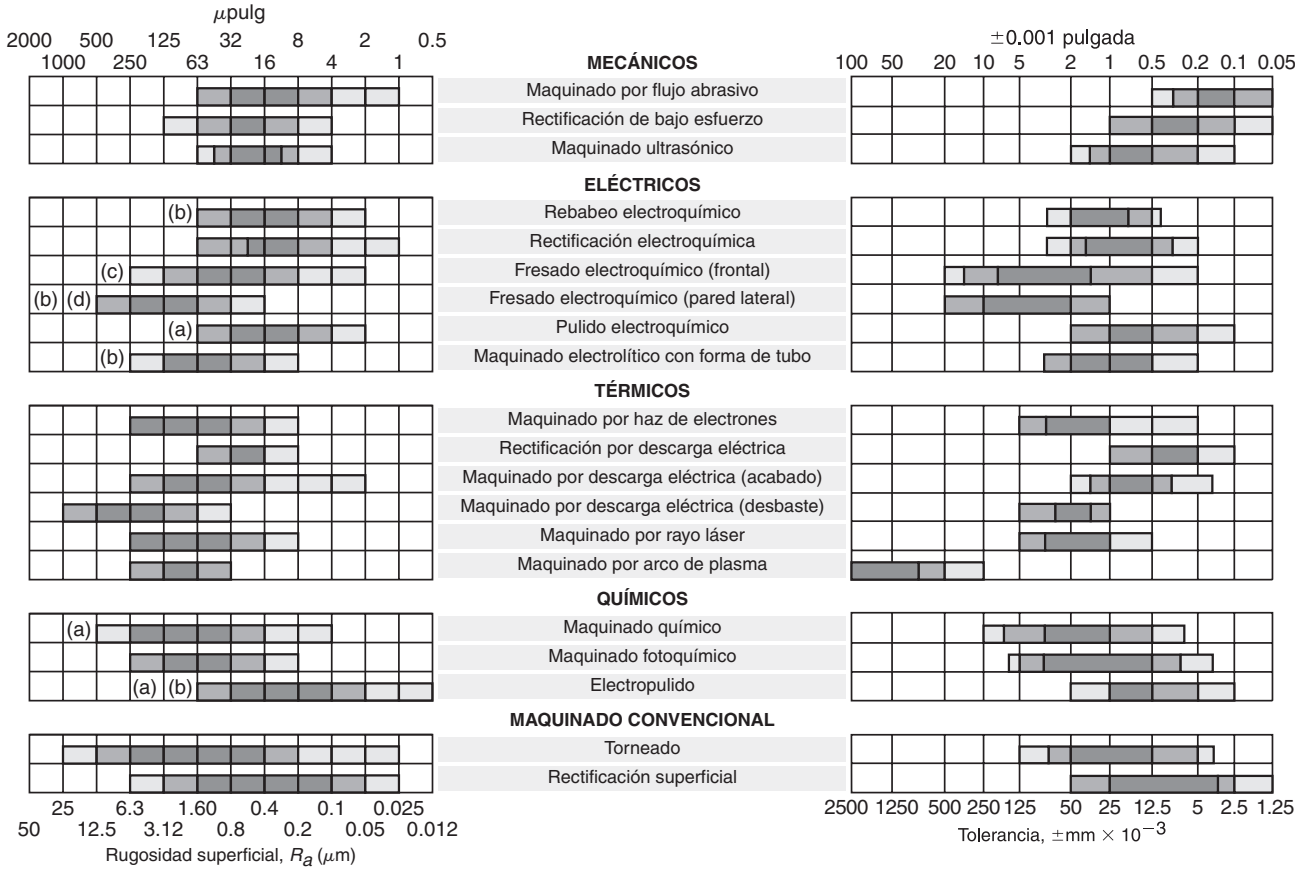


FIGURA 27.4 Rugosidad superficial y tolerancias obtenidas en diversos procesos de maquinado. Obsérvese el amplio intervalo dentro de cada proceso (ver también fig. 23.13). *Fuente: Machining Data Handbook*, 3ª. ed. Copyright © 1980. Utilizado con permiso de Metcut Research Associates, Inc.

diante disolución química, más que por cizallamiento. Las aplicaciones comunes del troquelado químico son el ataque sin dejar rebabas en las tarjetas para circuitos impresos, tableros decorativos y estampados de láminas metálicas delgadas, así como la producción de formas complejas o pequeñas.

Troquelado fotoquímico. El *troquelado fotoquímico* (también llamado fotoataque) es una modificación del fresado químico. El material se retira (por lo general de una delgada lámina) mediante técnicas fotográficas. Se pueden troquelar formas complejas y sin rebabas (fig. 27.5) sobre metales hasta de 0.0025 mm (0.0001 pulgada) de espesor. Este proceso, al que algunas veces se le denomina **maquinado fotoquímico,** también se utiliza para ataque de superficies.

El procedimiento para el troquelado fotoquímico consiste en los siguientes pasos:

1. Se prepara el diseño de la parte a troquelar con una amplificación hasta de 100×. Después se produce un negativo fotográfico y se reduce al tamaño de la parte terminada. Al negativo reducido del diseño se le llama **boceto**. El dibujo original (agrandado) permite que los errores inherentes al diseño se reduzcan en la medida de la reducción (hasta de 100×) para obtener la imagen definitiva del boceto.
2. La lámina en bruto se recubre con un material fotosensible (**fotorresistente**) mediante inmersión, rociado, vaciado centrífugo o recubrimiento con rodillos y se seca en un horno. Con frecuencia, a este recubrimiento se le llama la *emulsión*.
3. El negativo se coloca sobre la pieza recubierta y se expone a la luz ultravioleta, que endurece las áreas expuestas.
4. Se desarrolla la pieza, lo que disuelve las áreas no expuestas.
5. Después la pieza se sumerge en un baño del reactivo (como en el fresado químico), o se rocía con el reactivo, lo que ataca y retira las áreas expuestas.
6. Se retira el material enmascarador y se lava totalmente la parte para retirar todos los residuos químicos.

Las aplicaciones características del troquelado fotoquímico son pantallas finas, tarjetas de circuitos impresos, laminados para motores eléctricos, resortes planos y pantallas para televisores a color. Aunque se requiere mano de obra calificada, los costos del herramental son bajos, el proceso se puede automatizar y es económico para volúmenes de producción medios a altos. El troquelado fotoquímico es capaz de producir partes muy pequeñas en donde resulta muy difícil producir las matrices tradicionales para troquelado (sección 16.2). El proceso también es eficaz para troquelar piezas de trabajo y materiales frágiles.

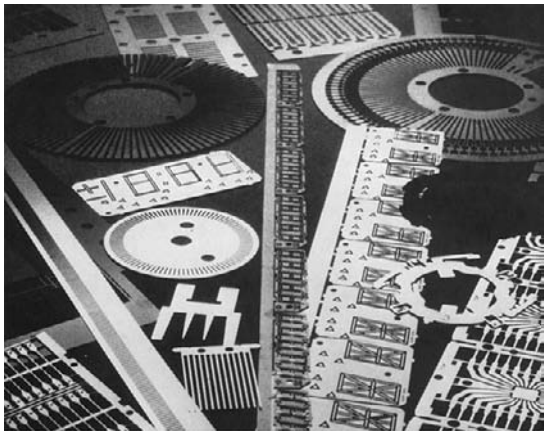


FIGURA 27.5 Diversas partes producidas mediante troquelado químico. Obsérvese el fino detalle. *Fuente*: Cortesía de Buckbee-Mears, St. Paul.

El manejo de los reactivos químicos requiere precauciones y consideraciones especiales de seguridad para proteger a los trabajadores contra la exposición a los productos químicos líquidos y volátiles. Además, la disposición de los subproductos químicos de este proceso es una desventaja importante, aunque algunos de ellos pueden reciclarse.

Consideraciones de diseño para el maquinado químico. Los lineamientos de diseño para el maquinado químico son:

- Ya que el reactivo ataca todas las superficies expuestas de manera continua, deben evitarse los diseños que comprendan esquinas agudas, cavidades profundas y estrechas, conos severos, costuras plegadas o materiales porosos en las piezas de trabajo.
- Debido a que el reactivo ataca el material tanto en la dirección vertical como en la horizontal, se pueden desarrollar *socavaciones* (como se muestra en las áreas bajo las orillas del enmascarante en la fig. 27.3). Por lo común, en el troquelado químico se pueden mantener tolerancias de $\pm 10\%$ del espesor del material.
- Para mejorar la capacidad de producción, la pieza de trabajo debe ser formada mediante otros procesos (como maquinado) antes del maquinado químico.
- Pueden presentarse variaciones dimensionales por los cambios de tamaño en el boceto debido a la humedad y la temperatura. Esta variación se puede minimizar seleccionando de manera apropiada el medio del boceto y controlando el medio ambiente en la generación del mismo y en el área de producción de la planta.
- En la actualidad, el diseño de muchos productos se realiza con sistemas de diseño asistidos por computadora (capítulo 38). Sin embargo, los planos del producto deben traducirse a un protocolo que sea compatible con el equipo para la generación de los bocetos fotoquímicos.

27.3 Maquinado electroquímico

El *maquinado electroquímico* (ECM, por sus siglas en inglés) es básicamente el inverso de la electrodeposición (sección 34.9). Un **electrolito** actúa como portador de corriente (fig. 27.6) y la alta velocidad de movimiento del electrolito en el espacio entre la pieza de trabajo y la herramienta (por lo común de 0.1 mm a 0.6 mm) arranca y arrastra los iones metálicos de la pieza (*ánodo*) antes de que tengan oportunidad de depositarse en la herramienta (*cátodo*). Obsérvese que la cavidad producida es la imagen hembra coincidente de la forma de la herramienta.

La herramienta con forma, ya sea sólida o tubular, por lo general se produce con latón, cobre, bronce o acero inoxidable. El electrolito es un fluido inorgánico altamente

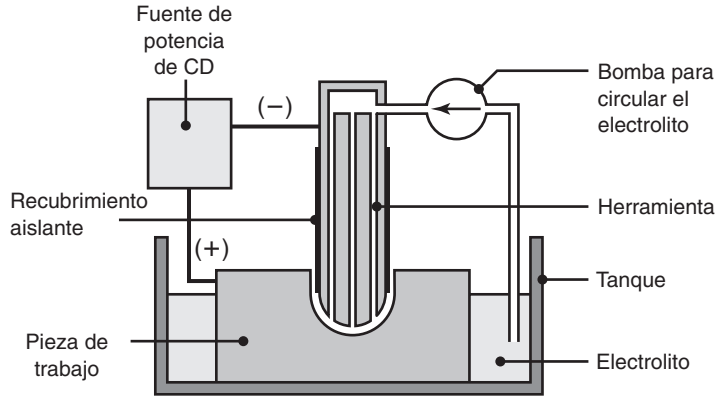


FIGURA 27.6 Esquema del proceso de maquinado electroquímico.

conductor, como solución acuosa de nitrato de sodio. Se bombea a través de los canales de la herramienta a velocidades de 10 a 16 m/s (30 a 50 pies/s). Una fuente de potencia de CD en el intervalo de 10 a 25 V mantiene las densidades de corriente, que para la mayoría de las aplicaciones es de 20 a 200 A/cm^2 (130 a 1300 A/pulg^2) de la superficie activa maquinada.

La *velocidad de remoción de material* (MRR) en el maquinado electroquímico para una eficacia de corriente de 100%, puede estimarse mediante la ecuación:

$$\text{MRR} = CI \tag{27.1}$$

donde MRR está en mm^3/min, I es la corriente en amperios y C una constante del material en mm^3/A-min. Para metales puros, C depende de la valencia; cuanto mayor sea la valencia, menor será su valor.

Existen máquinas que tienen capacidades de corriente tan elevadas como 40,000 A y tan bajas como 5 A. La rapidez de penetración de la herramienta es proporcional a la densidad de corriente. La velocidad de remoción de material se encuentra comúnmente en el intervalo de 1.5 a 4 mm^3 por A-min. Como la velocidad de remoción de material es sólo una función de la velocidad de intercambio iónico, no la afecta la resistencia, dureza o tenacidad de la pieza de trabajo.

Capacidades del proceso. El concepto básico del maquinado electroquímico se patentó en 1929 y se desarrolló con rapidez durante las décadas de 1950 y 1960, convirtiéndose en un proceso importante de manufactura, aunque no tan ampliamente utilizado como otros procesos descritos en este capítulo. En general se usa con el propósito de maquinar cavidades y formas complejas en materiales de alta resistencia, sobre todo en la industria aeroespacial para la producción en masa de álabes para turbinas, partes para motores de propulsión y boquillas (fig. 27.7), así como en las industria automotriz (fundiciones para motores y engranes) y en la médica.

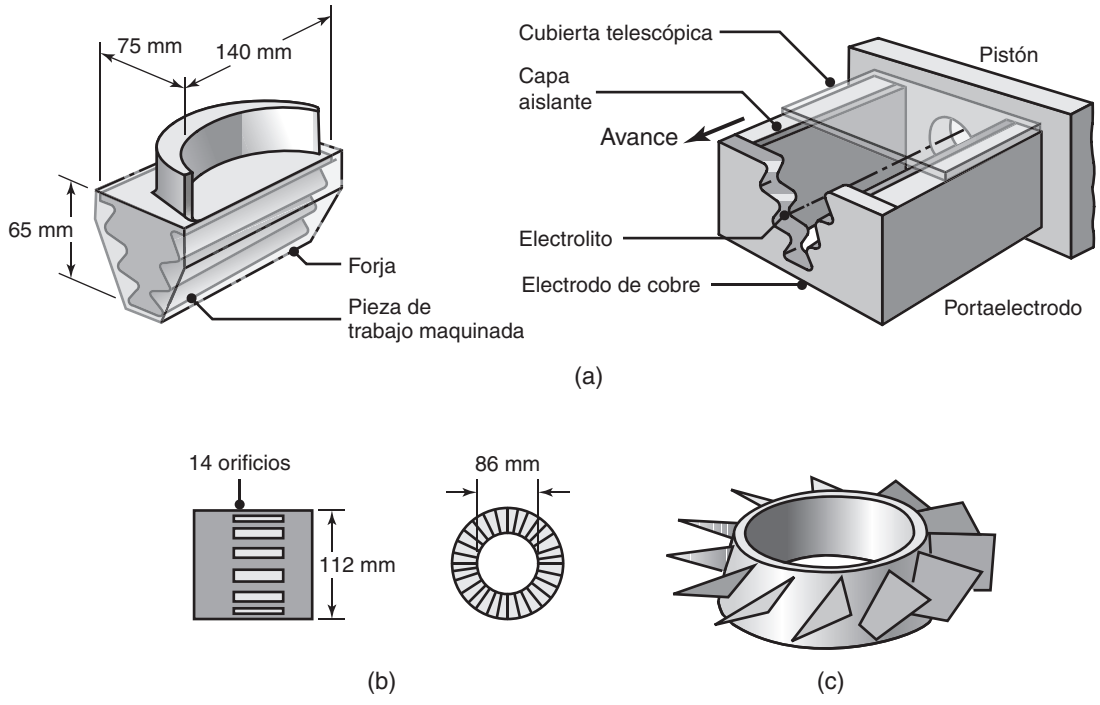


FIGURA 27.7 Partes comunes fabricadas mediante maquinado electroquímico. *(a)* Álabe de turbina fabricada con aleación de níquel de 360 HB. Obsérvese la forma del electrodo a la derecha. *(b)* Ranuras delgadas en una jaula de rodamiento de rodillos de acero 4340. *(c)* Aletas aerodinámicas integrales en el disco de un compresor.

El maquinado electroquímico también se utiliza para maquinar y dar acabado a cavidades de matrices de forja (*estampado de matrices*) y para producir orificios pequeños. Algunas versiones de este proceso se emplean para torneado, refrentado, fresado, ranurado, taladrado, trepanado y perfilado, así como en la producción de tiras y redes metálicas continuas. Las aplicaciones más recientes del ECM incluyen el *micromaquinado* (capítulo 29) para la industria electrónica.

Una modificación del ECM es el *maquinado electrolítico con forma de tubo* (STEM, por sus siglas en inglés), utilizado para taladrar orificios profundos de diámetro pequeño, como en los álabes para turbinas. La herramienta es un tubo de titanio, recubierto con una resina aislante eléctrica. Se pueden taladrar orificios tan pequeños como 0.5 mm, con relaciones de profundidad a diámetro hasta de 300:1.

El proceso ECM deja una superficie brillante, sin rebabas; de hecho, puede utilizarse como proceso de rebabeo. No provoca ningún daño térmico a la parte y la falta de fuerzas de la herramienta evita la distorsión de la parte. Tampoco existe desgaste de la herramienta (ya que sólo se genera hidrógeno en el cátodo) y el proceso es capaz de producir formas complejas. Sin embargo, las propiedades mecánicas de los componentes hacen que el proceso ECM deba compararse con cuidado con los otros métodos de remoción de material.

En la actualidad existen sistemas de maquinado electroquímico como *centros de maquinado controlados numéricamente* con capacidad de altos volúmenes de producción, gran flexibilidad y el mantenimiento de tolerancias cerradas. El proceso ECM también se puede combinar con el maquinado por descarga eléctrica (EDM, por sus siglas en inglés) en la misma máquina. Desarrollos adicionales incluyen sistemas híbridos de maquinado, en los que el ECM y otros procesos de maquinado avanzado (como los que se describen a lo largo de este capítulo) se combinan para aprovechar las capacidades de cada proceso.

Consideraciones de diseño para el maquinado electroquímico. Los lineamientos generales de diseño para el maquinado electroquímico son los siguientes:

- Debido a la tendencia del electrolito a erosionar los perfiles agudos, el maquinado electroquímico no es adecuado para producir esquinas agudas o fondos planos.
- Tal vez sea difícil controlar el flujo del electrolito, por lo que no se pueden producir cavidades irregulares para que adquieran la forma deseada con una precisión dimensional aceptable.
- Los diseños deben considerar pequeños ángulos de salida para maquinar los orificios y cavidades.

ESTUDIO DE CASO 27.1 Maquinado electroquímico de un implante biomédico

Un sistema de reemplazo total de rodilla consta de un implante femoral y tibial, combinado con un inserto de polietileno de peso molecular ultraelevado (UHMWPE, por sus siglas en inglés), como se muestra en la figura 27.8a. El polietileno tiene una resistencia superior al desgaste y una baja fricción contra el implante femoral de una aleación de cobalto-cromo. El inserto de UHMWPE se moldea por compresión (sección 19.7) y el implante metálico se funde y rectifica en sus superficies externas coincidentes.

Los diseñadores de implantes, los ingenieros de manufactura y los médicos se han preocupado en particular por la superficie de contacto en la cavidad del implante metálico, que coincide con una proyección en el inserto de polietileno. Debido a que la rodilla se articula durante el movimiento normal, el polietileno se desliza contra la parte metálica, convirtiéndose en un sitio de desgaste potencialmente serio. Esta geometría es necesaria para asegurar la estabilidad lateral de la rodilla (es decir, para evitar que ésta se pandee en forma lateral).

Para producir una superficie lisa, durante muchos años se había seguido el procedimiento de rectificar las superficies de apoyo del implante metálico utilizando tanto rectificadoras de mano como montadas en levas. Sin embargo, el rectificado producía

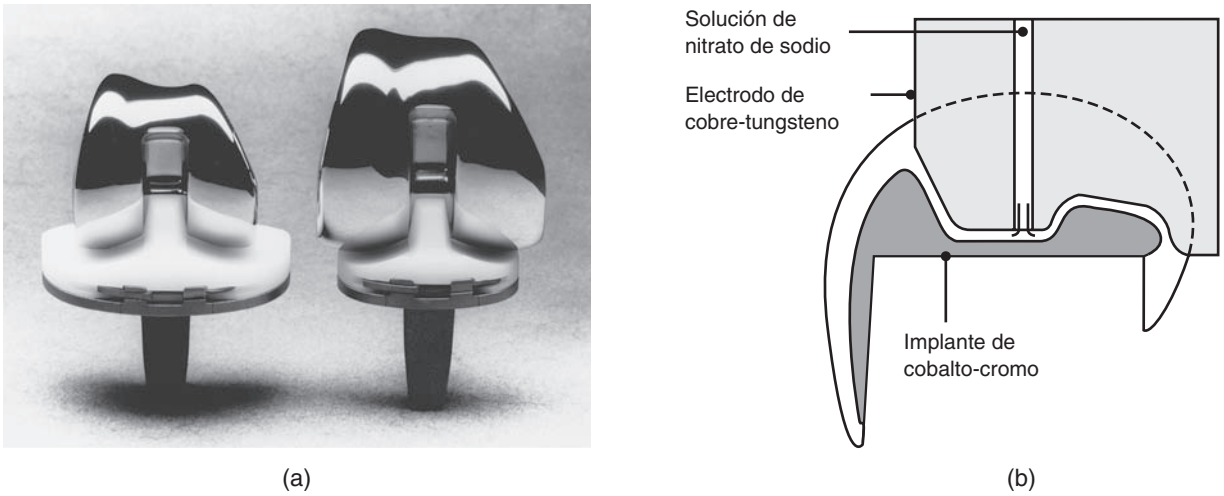


FIGURA 27.8 *(a)* Dos sistemas de reemplazo total de rodilla que muestran los implantes metálicos (partes superiores) con un inserto de polietileno de peso molecular ultraelevado (partes inferiores). *(b)* Sección transversal del proceso ECM aplicado al implante metálico. *Fuente:* Cortesía de Biomet, Inc.

una repetitividad y una calidad marginales. Es extremadamente difícil tener acceso a las superficies interiores de esta parte para rectificarlas y es difícil rectificar la aleación de cobalto-cromo. En consecuencia, los procesos de maquinado avanzado (en particular el maquinado electroquímico) eran candidatos ideales para esta operación.

Como se muestra en la figura 27.8b, el procedimiento actual consiste en colocar el implante metálico en un soporte y poner un electrodo de tungsteno con el contorno final deseado muy cerca del implante. El electrolito es una mezcla de nitrato de sodio y agua y se bombea a través de la herramienta, llenando el espacio entre ésta y el implante. Se aplica una fuente de potencia (comúnmente de 10 V y 225 A), produciendo un maquinado electroquímico local de los puntos elevados de la superficie del implante y generando una superficie pulida.

El volumen del flujo de electrolito se puede controlar a fin de maximizar la calidad de la superficie. Si el gasto o caudal es muy bajo, aparecen defectos en la superficie maquinada, como hoyuelos localizados; si el gasto es muy elevado, los tiempos de maquinado se alargan. Los tiempos comunes de maquinado para esta parte son de cuatro a seis minutos.

Fuente: Cortesía de T. Hershberger y R. Redman, Biomet, Inc., Warsaw, Indiana.

27.3.1 Maquinado por pulso electroquímico (PECM)

Este proceso es un refinamiento del ECM; utiliza densidades muy elevadas de corriente (del orden de 1 A/mm^2), pero la corriente es de *pulsos* y no directa. El propósito de los pulsos es eliminar la necesidad de los gastos elevados de electrolito, que limitan la utilidad del ECM en la fabricación de moldes y matrices (estampado de matrices). Las investigaciones han demostrado que el PECM mejora la vida a la fatiga y el proceso se ha propuesto como un método viable para eliminar la capa refundida que deja el maquinado por descarga eléctrica en las superficies de los moldes y las matrices. Las tolerancias obtenidas por lo común van de 20 a 100 μm.

Algunas máquinas pueden combinar EDM y PECM, por lo que eliminan la necesidad de mover la herramienta y la pieza de trabajo entre los dos procesos. Sin embargo, es difícil mantener una alineación precisa al mover la pieza de trabajo del EDM al PECM. Si se desalinea de manera significativa, todo el pulido ocurrirá en donde la sepa-

ración es menor y se presentará la pasivación, en donde la separación es mayor. De igual manera, el proceso deja residuos metálicos suspendidos en la solución acuosa, lo que es dañino para el ambiente si se desecha sin darle algún tratamiento.

El proceso ECM también puede ser eficaz para micromaquinado. La ausencia total de desgaste de la herramienta implica que el proceso se puede utilizar en componentes electrónicos de precisión, aunque es necesario superar el problema de la erosión debida a las corrientes parásitas. En la actualidad, las máquinas ECM han adquirido una flexibilidad creciente mediante la implantación de controles numéricos.

27.4 Rectificación electroquímica

La *rectificación electroquímica* (ECG, por sus siglas en inglés) combina el maquinado electroquímico con el rectificado convencional. El equipo utilizado es similar a una rectificadora convencional, excepto que el disco es un cátodo rotatorio con partículas abrasivas insertas (fig. 27.9a). El disco es metálico con abrasivos de diamante o de óxido de aluminio aglutinados y gira a una velocidad superficial de 1200 a 2000 m/min (4000 a 7000 pies/min).

Los abrasivos tienen dos funciones: (1) servir como aislantes entre el disco y la pieza de trabajo, y (2) retirar mecánicamente productos electrolíticos del área de trabajo. Para la fase de maquinado electroquímico de la operación se suministra una corriente de solución de electrolito (por lo común, nitrato de sodio). Las densidades de corriente van de 1 a 3 A/mm^2 (500 a 2000 A/pulg^2). En el ECG, la mayor parte de la remoción de material se efectúa mediante la acción electrolítica y, por lo regular, menos de 5% del metal se retira mediante la acción abrasiva del disco. En consecuencia, el desgaste del disco es muy bajo y la pieza de trabajo se mantiene fría. Los cortes de acabado suelen realizarse mediante la acción de rectificado, pero sólo para producir una superficie con buen acabado y precisión dimensional.

El proceso ECG es adecuado para aplicaciones similares al fresado, rectificado y aserrado (fig. 27.9b), pero no se adapta a las operaciones de estampado de matrices. Este proceso puede aplicarse con éxito en carburos y aleaciones de alta resistencia. Ofrece una ventaja distintiva sobre el rectificado tradicional mediante discos de diamante cuando se procesan materiales muy duros, donde el desgaste del disco puede ser alto. Existen máquinas ECG con controles numéricos que mejoran la precisión dimensional y la repetitividad y que aumentan la productividad.

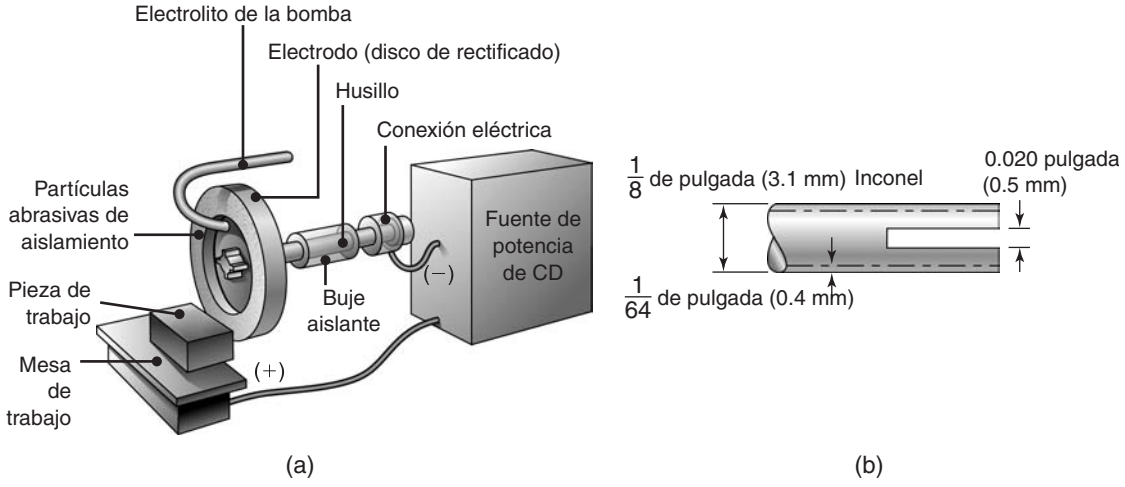


FIGURA 27.9 *(a)* Esquema del proceso de rectificación electroquímica. *(b)* Ranura delgada producida en un tubo redondo de aleación de níquel mediante este proceso.

El **honeado electroquímico** combina la fina acción abrasiva del honeado con la acción electroquímica. Aunque el equipo es costoso, este proceso es hasta cinco veces más rápido que el honeado convencional y la herramienta puede durar diez veces más. Se utiliza fundamentalmente para dar acabado a superficies cilíndricas interiores.

Consideraciones de diseño para el rectificado electroquímico. Además de las que ya se indicaron para el maquinado electroquímico, el ECG requiere dos consideraciones adicionales de diseño:

- Los diseños deben evitar los radios internos agudos.
- Si se van a producir superficies planas, la superficie rectificada electroquímicamente debe ser más angosta que el disco de rectificado.

27.5 Maquinado por descarga eléctrica (electroerosinado)

El principio del *maquinado por descarga eléctrica* o *electroerosinado* (EDM, por sus siglas en inglés) (también llamado *maquinado por electrodescarga* o *por erosión por chispa*) se basa en la erosión de los metales mediante descargas por chispa. Sabemos que cuando se tocan dos alambres conductores de corriente se produce un arco. Si observamos de cerca el punto de contacto entre ambos alambres, notamos que se ha erosionado una pequeña porción del metal, dejando un pequeño cráter.

Aunque se sabe de este fenómeno desde el descubrimiento de la electricidad, no fue sino hasta la década de 1940 cuando se desarrolló un proceso de maquinado basado en este principio. El proceso EDM se ha vuelto una de las tecnologías de producción más utilizadas en la manufactura.

Principio de operación. El sistema EDM básico consiste en una herramienta con forma (*electrodo de penetración*) y la pieza de trabajo conectada a una fuente de potencia de CD, colocada en un fluido **dieléctrico** (que no conduce electricidad) (fig. 27.10a). Cuando la diferencia de potencial entre la herramienta y la pieza de trabajo es lo suficientemente elevada, el dieléctrico es vencido y se descarga una chispa transitoria a través del fluido, retirando una cantidad muy pequeña de metal de la superficie de la pieza. La descarga del capacitor se repite a velocidades de entre 200 y 500 kHz, con voltajes que por lo común se encuentran entre 50 y 380 V y corrientes de 0.1 a 500 A. En general, el volumen de material retirado por chispa de descarga está en el intervalo de 10^{-6} a 10^{-4} mm^3 (10^{-10} a 10^{-8} $pulg^3$).

El proceso EDM sólo se puede utilizar en cualquier material que sea conductor eléctrico. El punto de fusión y el calor latente de fusión son propiedades físicas importantes que determinan el volumen de metal retirado por descarga. Al aumentar estas cantidades disminuye la velocidad de remoción de material, la cual se puede estimar a partir de la siguiente fórmula empírica aproximada:

$$\text{MRR} = 4 \times 10^4 \, I T_w^{-1.23} \tag{27.2}$$

donde MRR está en mm^3/min, I es la corriente en amperios y T_w el punto de fusión de la pieza de trabajo en °C.

La pieza de trabajo se sujeta dentro del tanque que contiene el fluido dieléctrico y sus movimientos se controlan mediante sistemas controlados numéricamente. La separación entre la herramienta y la pieza (*sobrecorte*) es crítica. Por ello, el avance descendente de la herramienta se controla por medio de un servomecanismo, que mantiene una separación constante de manera automática.

Debido a que el proceso no comprende energía mecánica, la dureza, resistencia y tenacidad del material de la pieza de trabajo no afecta necesariamente la rapidez de re-

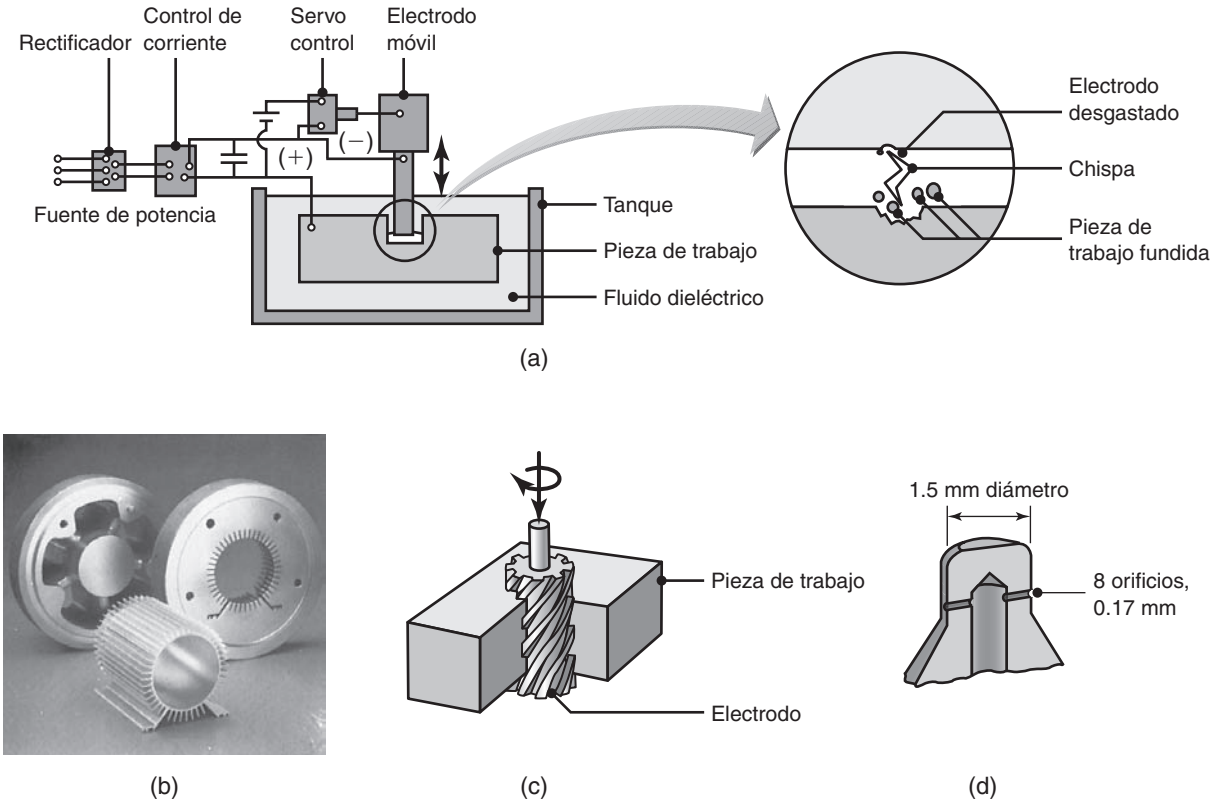


FIGURA 27.10 *(a)* Esquema del proceso de maquinado por descarga eléctrica. Éste es uno de los procesos de maquinado más utilizados, en particular para aplicaciones de estampado de matrices. *(b)* Ejemplos de cavidades producidas por el proceso de maquinado por descarga eléctrica, usando electrodos con forma. Dos partes redondas (traseras) son el juego de matrices para extruir la pieza de aluminio mostrada al frente (ver también fig. 15.9b). *(c)* Cavidad espiral producida mediante EDM mediante un electrodo de rotación lenta, similar a la rosca de un tornillo. *(d)* Orificios en una boquilla de inyección de combustible producida mediante EDM; el material es acero tratado térmicamente. *Fuente*: Cortesía de AGIE USA Ltd.

moción. Por lo común, para controlar la rapidez de remoción se varía la frecuencia de descarga, o la energía por descarga, el voltaje y la corriente. La rapidez de remoción y la rugosidad aumentan con *(a)* el incremento de la densidad de corriente, y *(b)* la disminución de la frecuencia de las chispas.

Fluidos dieléctricos. Las funciones del fluido dieléctrico son:

1. Actuar como aislante hasta que el potencial sea lo suficientemente alto.
2. Proporcionar un medio de enfriamiento.
3. Actuar como medio de limpieza y retiro de los desechos en el espacio entre electrodo y pieza.

Los fluidos dieléctricos más comunes son los aceites minerales, aunque también se utilizan el queroseno y el agua destilada y desionizada en aplicaciones especiales. Existen asimismo fluidos claros de baja viscosidad; aunque son más costosos, facilitan la limpieza. Las máquinas se equipan con una bomba y un sistema de filtrado para el fluido dieléctrico.

Electrodos. En general, los electrodos para el EDM se fabrican con grafito, aunque también se utiliza latón, cobre o aleaciones de cobre-tungsteno. A las herramientas se les puede formar además mediante moldeado, fundición, metalurgia de polvos o técnicas de

maquinado CNC. Se han usado electrodos de alambre de tungsteno tan pequeños como 0.1 mm (0.005 pulgada) de diámetro para producir orificios con relaciones de profundidad a diámetro hasta de 400:1.

Las chispas en este proceso también erosionan el electrodo, cambiando así su geometría y afectando de manera adversa la forma producida y su precisión dimensional. Por lo tanto, el *desgaste de la herramienta* (*electrodo*) es un factor importante. La *relación de desgaste* se define como la relación del volumen del material retirado de la pieza de trabajo y el volumen de desgaste de la herramienta. Esta relación va de aproximadamente 3:1 para electrodos metálicos hasta 100:1 para electrodos de grafito.

Se ha demostrado que el desgaste de la herramienta está relacionado con los puntos de fusión de los materiales involucrados: cuanto menor es el punto de fusión del electrodo, mayor será la relación de desgaste. Igualmente, cuanto mayor es la corriente, mayor será el desgaste. En consecuencia, los electrodos de grafito tienen la mayor resistencia al desgaste. El desgaste de la herramienta se puede minimizar invirtiendo la polaridad y utilizando herramientas de cobre, proceso al que se denomina **EDM sin desgaste**.

Capacidades del proceso. El maquinado por descarga eléctrica tiene numerosas aplicaciones, como la producción de matrices para forja, extrusión, fundición a presión, moldeo por inyección y grandes componentes de láminas metálicas para carrocerías automotrices (**centros de maquinado de estampado de matrices** con control numérico computarizado). Otras aplicaciones incluyen orificios profundos de diámetros pequeños que utilizan alambre de tungsteno como electrodo, ranuras estrechas en partes, orificios de enfriamiento en álabes para turbinas de superaleaciones y diversas formas intrincadas (ver fig. 27.10b y c). Se pueden producir cavidades escalonadas controlando los movimientos relativos de la pieza de trabajo en relación con el electrodo (fig. 27.11).

Debido a la estructura superficial fundida y resolidificada (refundición), las altas velocidades de remoción de material producen un acabado superficial rugoso con una deficiente integridad superficial y con bajas propiedades a la fatiga. Por lo tanto, los cortes de acabado se efectúan a bajas rapideces de remoción, o la capa refundida se retira posteriormente mediante operaciones de acabado. Se ha demostrado que el acabado superficial puede mejorarse haciendo oscilar el electrodo en un movimiento planetario en amplitudes de 10 a 100 μm.

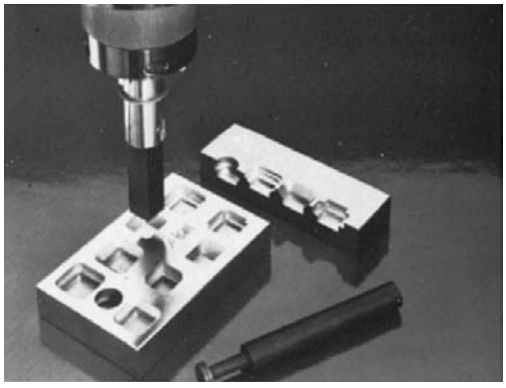


FIGURA 27.11 Cavidades escalonadas producidas con un electrodo cuadrado mediante el proceso EDM. La pieza de trabajo es mueve en las dos direcciones horizontales principales y su movimiento se sincroniza con el movimiento descendente del electrodo para elaborar estas cavidades. También se muestra un electrodo redondo capaz de producir cavidades redondas o elípticas. *Fuente:* Cortesía de AGIE USA Ltd.

Consideraciones de diseño para el EDM. Los lineamientos generales de diseño para el maquinado por descarga eléctrica son los siguientes:

- Las partes deben diseñarse de manera que a los electrodos se les pueda dar forma apropiada y económica.
- Deben evitarse las ranuras profundas y las aberturas estrechas.
- Para obtener una producción económica, el acabado superficial especificado no debe ser demasiado fino.
- Para lograr una alta capacidad de producción, la remoción de grandes volúmenes de material debe realizarse por procesos convencionales (operaciones de desbaste).

27.5.1 EDM con alambre

Una variación del EDM es el *EDM con alambre* (fig. 27.12), o *corte con alambre por descarga eléctrica*. En este proceso, similar al corte de contornos con una sierra de banda (ver fig. 24.25), un alambre de movimiento lento se desplaza a lo largo de una trayectoria prescrita, cortando la pieza de trabajo. Este proceso se utiliza para cortar placas hasta de 300 mm (12 pulgadas) de espesor y para fabricar punzones, herramientas y matrices a partir de metales duros. También puede cortar componentes intrincados para la industria electrónica. En la figura 27.13a se muestra una placa gruesa que se está cortando mediante este proceso, y en la figura 27.13b se presenta una máquina de EDM con alambre.

En general, el alambre se fabrica con latón, cobre, tungsteno o molibdeno; también se utilizan alambres recubiertos con zinc o latón y con recubrimientos múltiples. Comúnmente, el diámetro del alambre es de alrededor de 0.30 mm (0.012 pulgada) para cortes de desbaste y 0.20 mm (0.008 pulgada) para cortes de acabado. El alambre debe tener una alta conductividad eléctrica y resistencia a la tensión, ya que el esfuerzo que actúa sobre él es por lo regular de 60% de su resistencia a la tensión.

Por lo general, el alambre sólo se utiliza una vez, ya que es relativamente económico en comparación con el tipo de operación que realiza. Se desplaza a una velocidad constante que va de 0.15 a 9 m/min (6 a 360 pulgadas/min) y se mantiene un espacio constante (saque) durante el corte. La tendencia en el uso de fluidos dieléctricos es hacia los fluidos transparentes, de baja viscosidad.

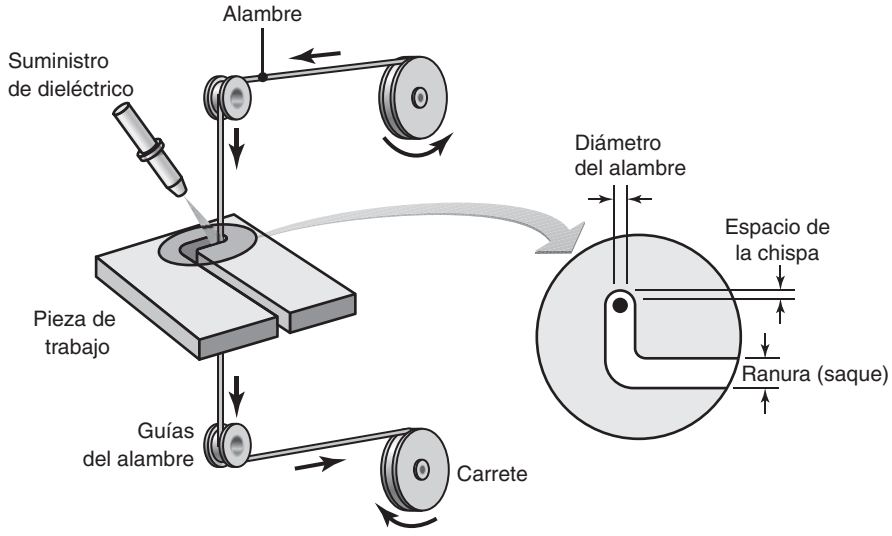
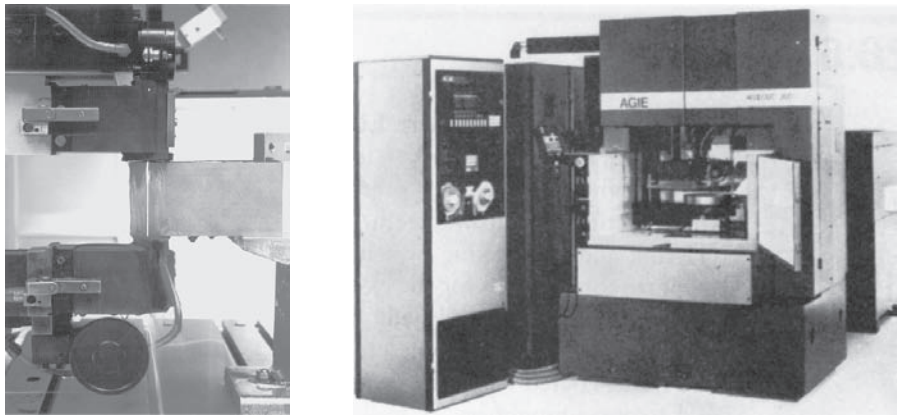


FIGURA 27.12 Esquema del proceso EDM con alambre. Se pueden efectuar hasta 50 horas de maquinado con un carrete de alambre, que después se desecha.



(a) (b)

FIGURA 27.13 *(a)* Corte de una placa gruesa con EDM con alambre. *(b)* Máquina de EDM con alambre controlada por computadora. *Fuente:* Cortesía de AGIE USA Ltd.

En general, la velocidad de corte se da en términos del área de la sección transversal cortada por unidad de tiempo. Los ejemplos comunes son: 18,000 mm^2/h (28 $pulg^2$/h) para una herramienta de acero de 50 mm (2 pulgadas) de espesor, y 45,000 mm^2/h (70 $pulg^2$/h) para aluminio de 150 mm (6 pulgadas) de espesor. Estas rapideces de remoción indican una velocidad de corte lineal de 18,000/50 = 360 mm/h = 6 mm/min y 45,000/150 = 300 mm/h = 5 mm/min, respectivamente.

Las máquinas modernas de alambre EDM (**centros de maquinado EDM con alambre de corte de ejes múltiples**) son capaces de producir formas tridimensionales y están equipadas con características como:

- Controles computarizados para controlar la trayectoria de corte del alambre (fig. 27.13b) y su ángulo respecto del plano de la pieza de trabajo.
- Cabezales múltiples para cortar dos partes al mismo tiempo.
- Características como controles para evitar el rompimiento del alambre.
- Características de autoenhebrado automático en caso de ruptura del alambre.
- Estrategias de maquinado programado para optimizar la operación.

Dos máquinas de dos ejes, controladas por computadora, pueden producir formas cilíndricas de manera similar a las operaciones de torneado o rectificado cilíndrico. Muchas máquinas modernas de EDM con alambre permiten controlar el avance y los extremos de recuperación del alambre para que se desplacen en forma independiente en dos direcciones principales, por lo que se pueden producir partes cilíndricas.

27.5.2 Rectificación por descarga eléctrica

En la *rectificación por descarga eléctrica* (EDG, por sus siglas en inglés), el disco de rectificación está fabricado con grafito o latón y no contiene abrasivos. El material se retira de la superficie de la pieza de trabajo mediante descargas por chispa entre el disco rotatorio y la pieza. Fundamentalmente, este proceso se utiliza para herramientas y matrices de carburo, aunque también puede usarse con partes frágiles, como agujas quirúrgicas, tubos de pared delgada y estructuras de panal. El proceso ECDG es más rápido que el EDG, pero el consumo de potencia es mayor. El proceso EDG se puede combinar con la rectificación electroquímica. En ese caso, al proceso se le llama **rectificación por descarga electroquímica** (ECDG, por sus siglas en inglés).

El material se retira mediante la acción química (con las descargas eléctricas desde el disco de grafito rompiendo la película de óxido) y se limpia por medio del flujo

de electrolito. La velocidad de remoción de material en el EDG se puede estimar a partir de la ecuación:

$$\text{MRR} = KI \tag{27.3}$$

donde MRR está en mm^3/min, I es la corriente en amperios y K un factor del material de la pieza de trabajo en mm^3/A-min. Por ejemplo, $K = 4$ para el carburo de tungsteno y $K = 16$ para el acero.

En el **aserrado** con EDM se utiliza un arreglo similar a la sierra de banda o sierra circular (aunque sin dientes) con el mismo circuito eléctrico que para el EDM. Se pueden producir cortes estrechos con altas tasas de remoción de material. Debido a que las fuerzas de corte son despreciables, este proceso también se puede usar en componentes delgados y esbeltos.

27.6 Maquinado por rayo láser

En el *maquinado por rayo láser* (LBM, por sus siglas en inglés) la fuente de energía es un **láser** (acrónimo en inglés de amplificación de luz mediante emisión estimulada de radiación), que concentra energía óptica sobre la superficie de la pieza de trabajo (fig. 27.14a). La fuente de energía de alta densidad altamente concentrada funde y evapora porciones de la pieza de manera controlada. Este proceso (que no requiere vacío) se utiliza para maquinar varios materiales metálicos y no metálicos.

Existen varios tipos de láseres utilizados en las operaciones de manufactura (tabla 27.2):

CO_2 (*por pulsos u onda continua*)
Nd: YAG (neodimio: itrio-aluminio-granate)
Nd: vidrio, rubí
Láseres Excimer (de las palabras *exc*itado y di*mer*o, que significa dos meros o dos moléculas de la misma composición química).

En el LBM, la *reflectividad* y *conductividad térmica* de la superficie de la pieza de trabajo, así como su calor específico y sus calores latentes de fusión y evaporación, son parámetros físicos importantes. Cuanto menores sean estas cantidades, más eficiente será el proceso. La profundidad de corte se puede expresar como:

$$t = \frac{CP}{vd} \tag{27.4}$$

TABLA 27.2

Aplicaciones generales de los rayos láser en la manufactura

Aplicación	Tipo de láser
Corte	
Metales	PCO_2, $CWCO_2$, Nd:YAG, rubí
Plásticos	$CWCO_2$
Cerámicos	PCO_2
Taladrado	
Metales	PCO_2, Nd:YAG, Nd: vidrio, rubí
Plásticos	Excimer
Marcado	
Metales	PCO_2, Nd:YAG
Plásticos	Excimer
Cerámicos	Excimer
Tratamiento superficial, metales	$CWCO_2$
Soldadura, metales	PCO_2, $CWCO_2$, Nd:YAG, Nd: vidrio, rubí

Nota: P = Por pulsos, CW = onda continua; Nd: YAG = neodimio: itrio-aluminio-granate

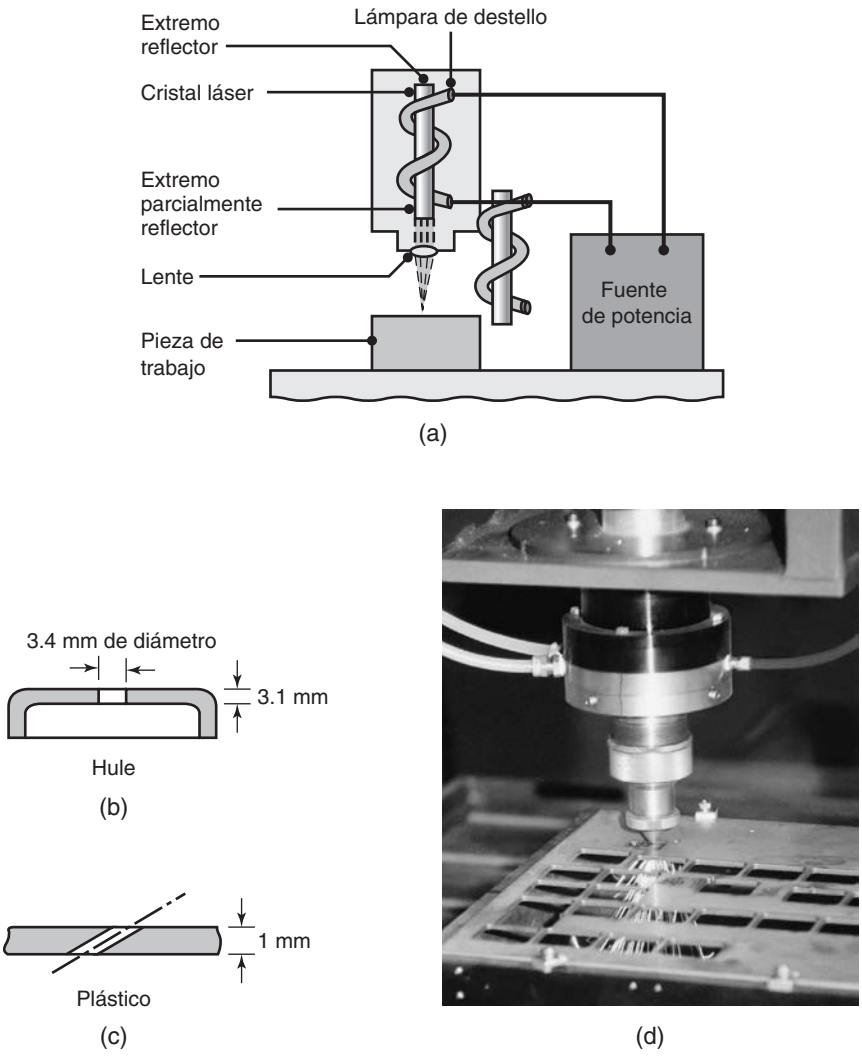


FIGURA 27.14 *(a)* Esquema del proceso de maquinado por rayo láser. *(b)* y *(c)* Ejemplos de orificios producidos en partes no metálicas mediante LBM. *(d)* Corte de lámina metálica con un rayo láser. *Fuente: (d)* Cortesía de Rofin-Sinar, Inc.

donde t es la profundidad, C una constante para el proceso, P la entrada de potencia, v la velocidad de corte y d el diámetro del punto del láser. Los picos de densidad de energía de los rayos láser se encuentran en el intervalo de 5 a 200 kW/mm^2.

Por lo general, la superficie producida por el LBM es rugosa y tiene una *zona afectada por el calor* (como se indica en la sección 30.9), que en aplicaciones críticas tal vez sea necesario retirar o darle tratamiento térmico. La anchura del corte es un factor que debe considerarse; así sucede en otros procesos de corte, como el aserrado, el EDM con alambre y el maquinado por haz de electrones.

Los rayos láser pueden utilizarse en combinación con una corriente de gas (como oxígeno) a fin de aumentar la absorción de energía (**soplete de rayo láser**) para cortar hojas metálicas. El corte por rayo láser asistido por alta presión de gas inerte (nitrógeno o argón) se usa en acero inoxidable y aluminio; deja una arista libre de óxido que

puede mejorar la soldabilidad. Las corrientes de gas también tienen la importante función de retirar por soplado el material fundido y vaporizado de la superficie de la pieza de trabajo.

Capacidades del proceso. El maquinado por rayo láser se utiliza ampliamente para taladrado, trepanado y corte de metales, materiales no metálicos, cerámicos y materiales compósitos (fig. 27.14b y c). La naturaleza abrasiva de los materiales compósitos y la limpieza de la operación han hecho del maquinado por rayo láser una opción atractiva respecto de los métodos tradicionales de maquinado. Se pueden producir orificios tan pequeños como los de 0.005 mm (0.0002 pulgada) con una relación de profundidad a diámetro de 50:1 en diversos materiales, aunque un mínimo más práctico es 0.025 mm (0.001 pulgada). Con los rayos láser se pueden cortar placas de acero tan gruesas como las de 32 mm (1.25 pulgadas).

El maquinado por rayo láser se ha utilizado de manera creciente en las industrias electrónica y automotriz. Por ejemplo, se están taladrando con láser los orificios de purga para cubiertas de bombas de combustible y los orificios de lubricación en los cubos de transmisión. Los orificios de enfriamiento de los álabes, en la primera etapa de producción de los motores de propulsión del Boeing 747, también se producen por medio de láser. Mediante el maquinado por láser se han obtenidos ahorros significativos de costos, de modo que el proceso está compitiendo con el maquinado por descarga eléctrica.

Los rayos láser también se utilizan en las siguientes aplicaciones:

- **Soldadura.**
- **Tratamiento térmico** de pequeña escala, localizado en metales y cerámicos para modificar sus propiedades mecánicas y tribológicas superficiales.
- **Fabricación** de partes, como números, letras, códigos, etc. El marcado también se puede efectuar mediante *(a)* tinta; *(b)* dispositivos mecánicos como punzones, pernos, estiletes, rodillos o mediante estampado, y *(c)* por ataque químico. Aunque el equipo es más costoso que el utilizado en otros métodos, el marcado y grabado con láser se ha vuelto muy común debido a su precisión, reproducibilidad, flexibilidad, facilidad de automatización y aplicación en línea en la manufactura.

La *flexibilidad* inherente del proceso de corte con láser, incluyendo la aplicación del rayo con fibra óptica, la simplicidad de los soportes, los bajos tiempos de configuración y la disponibilidad de máquinas con capacidades eléctricas múltiples y sistemas robóticos tridimensionales de corte con láser controlados por computadora, es una característica atractiva. Por lo tanto, el corte de láminas con rayo láser puede competir exitosamente con los procesos tradicionales de troquelado descritos en el capítulo 16. En la actualidad se realizan esfuerzos para combinar los dos procesos, a fin de mejorar la eficiencia global. (Ver ejemplo 27.1).

Se debe tener extrema precaución con los rayos láser. Incluso los de baja potencia pueden provocar daños a la retina si no se siguen las precauciones apropiadas.

Consideraciones de diseño para el LBM. Los lineamientos generales de diseño para el maquinado por rayo láser son los siguientes:

- Deben evitarse los diseños con esquinas agudas, ya que es difícil producirlas.
- Los cortes profundos producen paredes cónicas.
- La reflectividad de la superficie de la pieza de trabajo es un factor que debe considerarse en el maquinado por rayo láser; se prefieren las superficies mate y sin pulir, ya que reflejan menos.
- Debe investigarse cualquier efecto adverso en las propiedades de los materiales maquinados que haya sido provocado por las altas temperaturas locales y la zona afectada por el calor.

EJEMPLO 27.1 Combinación de corte de rayo láser y punzonado de láminas metálicas

Como se ha visto, los procesos de corte por láser y punzonado tienen sus respectivas ventajas y limitaciones en relación con los aspectos tanto técnicos como económicos. En general, las ventajas del corte con láser son: *(a)* lotes menores; *(b)* flexibilidad de operación; *(c)* una amplia variedad de espesores; *(d)* capacidad para producir prototipos; *(e)* materiales y compósitos que sería difícil cortar de otra manera, y *(f)* las complicadas geometrías que se pueden programar.

Las ventajas y desventajas del punzonado incluyen: *(a)* se requieren grandes tamaños de lote para justificar económicamente la compra del herramental; *(b)* partes un tanto simples; *(c)* una gama pequeña de espesores de partes; *(d)* geometrías fijas y limitadas (incluso cuando se utilizan torretas); *(e)* producción rápida, y *(f)* integración con el proceso posterior después del punzonado.

Es evidente que los dos procesos cubren áreas diferentes pero complementarias. No es difícil visualizar partes con algunas características que se pueden producir mejor mediante uno de los procesos y otras con particularidades que se pueden trabajar mejor con el otro proceso.

Se han diseñado y construido máquinas de modo que los procesos y dispositivos de soporte se puedan utilizar de manera conjunta a su mayor capacidad, aunque sin interferir en los límites operativos de cada uno de ellos. El propósito de combinarlos es aumentar la eficacia global y la productividad de los procesos de manufactura para partes que se encuentran dentro de las capacidades de cada uno de los dos procesos, en forma similar al concepto de los centros de maquinado descritos en la sección 25.2. Por ejemplo, se han equipado prensas de punzonado de torreta con un cabezal láser integrado; la máquina puede punzonar o cortar con láser, pero no puede hacer ambas cosas de manera simultánea.

Deben considerarse muchos factores en dicha combinación, relacionados con las características de cada operación: (1) la variedad de tamaños, espesores y formas a producir, y cómo deben anidarse; (2) los tiempos de proceso y de configuración, incluyendo la carga, fijación y descarga de las partes; (3) la programación para el corte, y (4) las capacidades de proceso de cada método, incluyendo las características dinámicas, vibraciones e impacto del punzonado (y el aislamiento) que pueden alterar los ajustes y alineaciones de los componentes láser.

27.7 Maquinado por haz de electrones

La fuente de energía en el *maquinado por haz de electrones* (EBM, por sus siglas en inglés) consiste en electrones de alta velocidad, que golpean la superficie de la pieza de trabajo y generan calor (fig. 27.15). Las máquinas utilizan voltajes en el intervalo de 50 a 200 kV para acelerar los electrones a un promedio de entre 50% y 80% de la velocidad de la luz. Las aplicaciones de este proceso son semejantes a las del maquinado por rayo láser, excepto que el EBM requiere vacío. En consecuencia, se usa mucho menos que el maquinado por rayo láser.

El maquinado por haz de electrones puede utilizarse para cortar con mucha precisión una amplia variedad de metales. El acabado superficial es mejor y la anchura de corte es mucho más estrecha que la de otros procesos de corte térmico. (Ver también la sección 30.7 sobre *soldadura por haz de electrones*). La interacción del haz de electrones con la superficie de la pieza de trabajo produce peligrosos rayos X. Por lo tanto, el equipo sólo debe ser usado por personal altamente capacitado.

Corte por arco de plasma. En el corte por arco de plasma (PAC, por sus siglas en inglés), se utilizan *haces de plasma* (gas ionizado) para cortar con rapidez láminas y placas ferrosas y no ferrosas. Las temperaturas generadas son muy elevadas (9400 °C;

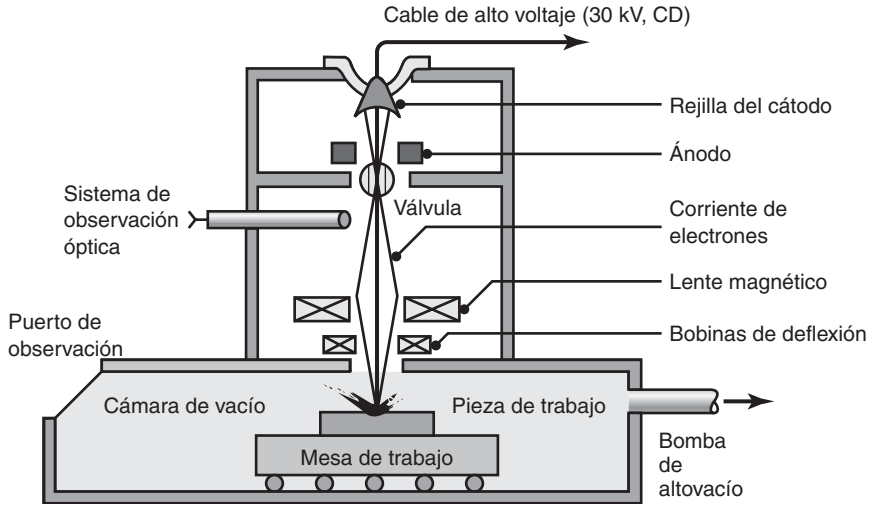


FIGURA 27.15 Esquema del proceso de maquinado por haz de electrones. A diferencia del LBM, este proceso requiere vacío, por lo que el tamaño de la pieza de trabajo se limita al tamaño de la cámara de vacío.

17,000 °F en el soplete con oxígeno como gas de plasma). En consecuencia, el proceso es rápido, la anchura de corte es pequeña y el acabado superficial es bueno. Se pueden cortar partes hasta de 150 mm (6 pulgadas) de espesor. Las velocidades de remoción de material son mucho más altas que las asociadas con los procesos EDM y LBM, y se pueden maquinar partes con gran reproducibilidad. Hoy en día, el corte con arco de plasma está muy automatizado y usa controladores programables.

Consideraciones de diseño para el EBM. En general, los lineamientos para el EBM son similares a los del LBM. Las consideraciones adicionales son:

- Como las cámaras de vacío tienen capacidad limitada, las partes o los lotes deben coincidir lo más posible con el tamaño de la cámara para obtener una alta capacidad de producción por ciclo.
- Si una parte requiere maquinado por haz de electrones sólo en una pequeña porción de la pieza de trabajo, debe considerarse manufacturarla como los componentes más pequeños y ensamblarlos después del maquinado por haz de electrones.

27.8 Maquinado por chorro de agua

Cuando metemos la mano en un chorro de agua o aire, sentimos una considerable fuerza concentrada actuando sobre ella. Esta fuerza es el resultado del cambio de momento de la corriente y, de hecho, es el principio en que se basa la operación de las turbinas de agua o de gas. En el *maquinado por chorro de agua* (WJM, por sus siglas en inglés), (también llamado **maquinado hidrodinámico**), esta fuerza se utiliza en operaciones de corte y rebabeo (fig. 27.16). (Ver también *martillado por chorro de agua*, sección 34.2).

El chorro del agua actúa como una sierra y corta una estrecha ranura en el material. Por lo común se utiliza un nivel de presión de unos 400 MPa (60 ksi) para obtener una operación eficiente, aunque pueden generarse presiones hasta de 1400 MPa (200 ksi). Los diámetros de las boquillas para el chorro varían de 0.05 mm a 1 mm (0.002 a 0.040 pulgada). En la figura 27.16b se muestra una máquina de corte por chorro de agua y su forma de operación. Pueden cortarse varios materiales, incluyendo plásticos, textiles, hule, productos de madera, papel, piel, materiales aislantes, ladrillo y materiales compósitos (fig. 27.16c).

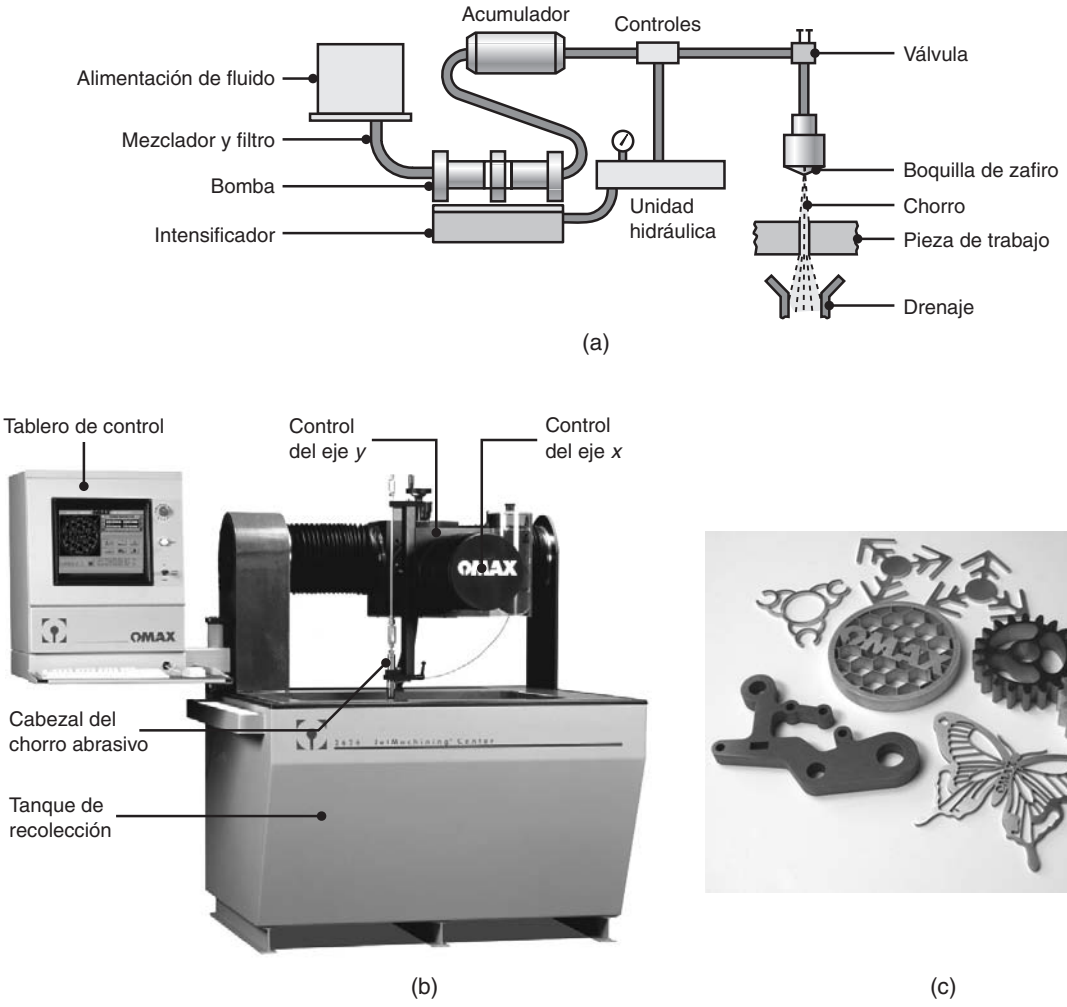


FIGURA 27.16 *(a)* Esquema del proceso de maquinado por chorro de agua. *(b)* Máquina de corte por chorro de agua controlada por computadora. *(c)* Ejemplos de diversas partes no metálicas producidas mediante el proceso de corte por chorro de agua. *Fuente:* Cortesía de OMAX Corporation.

Dependiendo de los materiales, los espesores pueden ser hasta de 25 mm (1 pulgada) y mayores. Las cubiertas de vinilo y espuma para los tableros automovilísticos (así como algunas piezas de la carrocería) se están cortando con equipo de maquinado por chorro de agua guiado por robot, que utiliza ejes múltiples. Debido a que es una operación eficaz y limpia si se compara con otros procesos de corte, también se usa en la industria de procesamiento de alimentos para cortar y rebanar productos alimenticios.

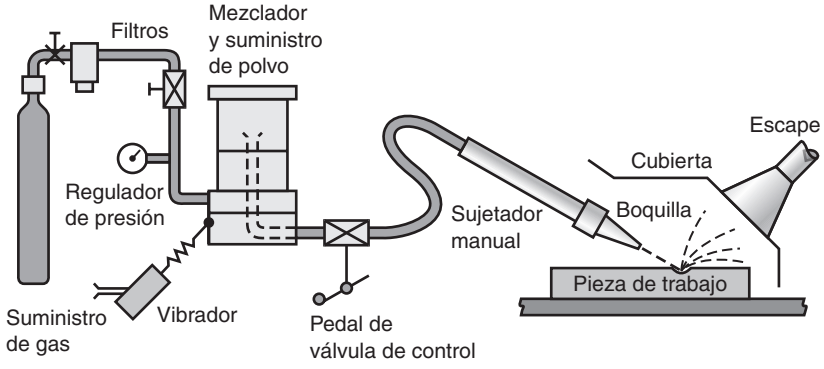
Las ventajas de este proceso son:

- Los cortes se pueden iniciar en cualquier lugar, sin necesidad de orificios taladrados previamente.
- No se produce calor.
- No ocurre la deflexión del resto de la pieza de trabajo, por lo que el proceso es adecuado para materiales flexibles.
- La pieza de trabajo sólo se moja ligeramente.
- Las rebabas producidas son mínimas.
- Es un proceso de manufactura ambientalmente seguro.

Maquinado por chorro de agua abrasivo. En el *maquinado por chorro de agua abrasivo* (AWJM, por sus siglas en inglés), el chorro de agua contiene partículas abrasivas (como carburo de silicio u óxido de aluminio) que incrementan la velocidad de remoción de material, superando la del maquinado por chorro de agua. Se pueden cortar materiales metálicos, no metálicos y compósitos avanzados de diversos espesores en una o varias capas.

Este proceso es adecuado en particular para materiales sensibles al calor que no pueden maquinarse mediante procesos en los que se genera calor. Las velocidades de corte pueden ser hasta de 7.5 m/min (25 pies/min) para los plásticos reforzados, aunque mucho menores para los metales. En consecuencia, este proceso puede no ser aceptable para situaciones en que se requieren grandes capacidades de producción.

El tamaño mínimo de orificio que se puede producir satisfactoriamente hasta la fecha es de unos 3 mm (0.12 pulgada); la máxima profundidad del orificio es de 25 mm (1 pulgada). Con máquinas de ejes múltiples, controladas por robots, se pueden maquinar partes tridimensionales hasta las dimensiones de acabado. En los sistemas modernos de AWJM, el nivel óptimo de abrasivos en el chorro se controla de manera automática. La vida útil de la boquilla se ha mejorado produciéndola con rubíes, zafiros y materiales compósitos con base de carburo (fig. 27.16a).



(a)



(b)

FIGURA 27.17 *(a)* Esquema del proceso de maquinado por chorro abrasivo. *(b)* Ejemplos de partes producidas mediante maquinado de chorro abrasivo, fabricadas con acero inoxidable 304 de 50 mm (2 pulgadas) de espesor. *Fuente*: Cortesía de OMAX Corporation.

27.9 Maquinado por chorro abrasivo

En el *maquinado por chorro abrasivo* (AJM, por sus siglas en inglés), se dirige un chorro de alta velocidad de aire seco, nitrógeno o bióxido de carbono, que contiene partículas abrasivas, contra la superficie de la pieza de trabajo en condiciones controladas (fig. 27.17). El impacto de las partículas desarrolla una fuerza suficientemente concentrada (ver también la sección 26.6) para realizar operaciones como *(a)* corte de pequeños orificios, ranuras o patrones intrincados en materiales metálicos y no metálicos muy duros o frágiles; *(b)* rebabeo o retiro de pequeñas proyecciones de las partes; *(c)* recorte y biselado; *(d)* remoción de óxidos y otras películas superficiales, y *(e)* limpieza general de componentes con superficies irregulares.

La presión del gas de suministro es del orden de 850 kPa (125 psi); la velocidad del chorro abrasivo puede ser hasta de 300 m/s (100 pies/s) y se controla por medio de una válvula. Por lo general, las boquillas se fabrican con carburo de tungsteno o con zafiro, los cuales tienen resistencia al desgaste abrasivo. El tamaño del abrasivo se encuentra en el intervalo de 10 a 50 μm (400 a 2000 μin). Como el flujo de los abrasivos tiende a redondear las esquinas, deben evitarse las esquinas agudas en los diseños para el maquinado por chorro abrasivo. Igualmente, los orificios producidos en las partes metálicas tienden a conificarse. Existe algún riesgo en el uso de este proceso debido a las partículas suspendidas en el aire. Este problema se puede evitar mediante el proceso de maquinado por chorro abrasivo de agua.

27.10 Economía de los procesos de maquinado avanzado

Los procesos de maquinado avanzado tienen aplicaciones únicas y son muy útiles para materiales difíciles de maquinar y para partes con perfiles complejos, internos y externos. Los volúmenes de producción económicos de un proceso particular dependen de los costos del herramental y del equipo, los costos de operación, la velocidad requerida de remoción de material y el nivel de calificación del operador, así como de las operaciones secundarias y de acabado que puedan necesitarse posteriormente.

En el maquinado químico (que es un proceso lento), factores importantes son el costo de los reactivos, enmascarantes y la disposición de los mismos (junto con el costo de limpieza de las partes). En el maquinado por descarga eléctrica, los costos de los electrodos y la necesidad de reemplazarlos periódicamente pueden ser significativos.

En estos procesos, la velocidad de remoción de material y la capacidad de producción pueden variar de manera significativa, como se puede ver en la tabla 27.1. El costo del herramental y del equipo también varía en forma considerable, así como la habilidad del operador. El alto capital de inversión de las máquinas (como en el maquinado eléctrico y de haces de alta energía, en particular cuando se equipan controles robóticos) tiene que justificarse en términos de los volúmenes de producción y de la viabilidad de manufacturar la misma parte por otros medios, en caso de que sea posible.

ESTUDIO DE CASO 27.2 Manufactura de "stents"

Los ataques y paros cardiacos, así como otras enfermedades cardiovasculares, cobran una vida cada 33 segundos sólo en Estados Unidos[1]. La mayoría se atribuyen a algún padecimiento de la arteria coronaria, en cuya pared se acumula gradualmente grasa (colesterol) que hace que se estreche o bloquee. Esta condición reduce el flujo sanguíneo al músculo del corazón y finalmente lleva a un ataque o paro cardiaco u otra en-

[1]2002 Heart and Stroke Statistical Update, American Heart Association, página 4.

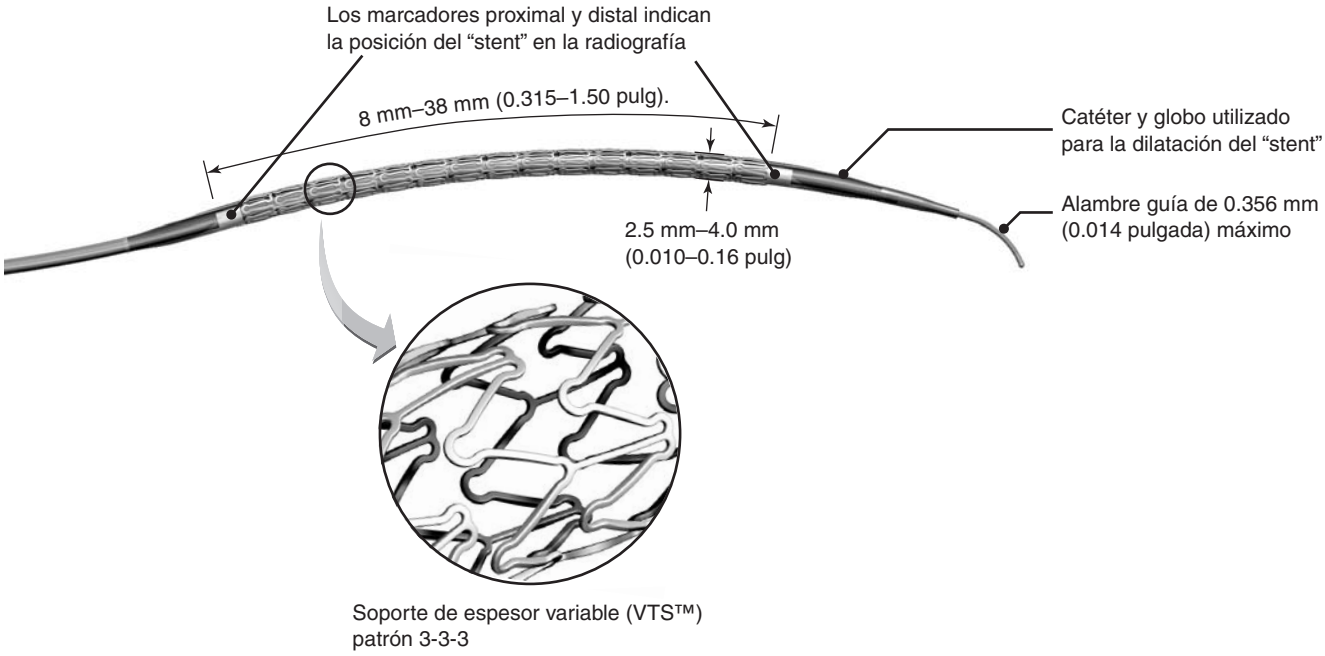


FIGURA 27.18 Sistema de "stent" coronario Guidant MULTI-LINK TETRA™.

fermedad cardiovascular. Uno de los métodos más populares hoy en día para mantener abiertas las arterias bloqueadas consiste en implantar un "stent" dentro de ellas. El MULTI-LINK TETRA™ (mostrado en la fig. 27.18) consta de un tubo diminuto de malla que se dilata utilizando un catéter de dilatación de globo y se implanta dentro de una arteria coronaria bloqueada o parcialmente bloqueada. Un "stent" sirve como marco o soporte mecánico para mantener abierta la arteria. Ofrece al paciente un método mínimamente invasivo para tratar la enfermedad cardiaca coronaria, cuya alternativa es, por lo general, una cirugía de desviación ("bypass") a corazón abierto, un procedimiento con mayor riesgo, dolor, tiempo de rehabilitación y costo para el paciente.

La manufactura de "stents" es demandante en extremo, y la exactitud y precisión de su diseño son de gran importancia para un desempeño apropiado. Dicha manufactura debe satisfacer todas las restricciones de diseño y proveer un dispositivo muy confiable; esto es, tienen que establecerse estrictos controles de calidad a lo largo del proceso de manufactura. Al diseñar un "stent", existen muchos factores de selección de materiales a considerar, como la resistencia radial, la resistencia a la corrosión, el límite de fatiga, la flexibilidad y la biocompatibilidad. La resistencia radial es importante, ya que el "stent" debe soportar la presión que ejerce la arteria sobre el mismo durante la dilatación.

Como el "stent" se implanta dentro del cuerpo, debe ser resistente a la corrosión y capaz de soportar las ondulaciones de esfuerzo provocadas por los latidos cardiacos. En consecuencia, el material también debe poseer una alta resistencia a la fatiga. Además, el "stent" debe tener el espesor de pared apropiado, a fin de ser lo suficientemente flexible para negociar con la tortuosa anatomía del corazón. Sobre todo, el material debe ser biocompatible con el cuerpo, ya que permanecerá dentro de él por el resto de la vida del paciente. Un material normal para "stents" —uno que satisface todos estos requisitos— es el acero inoxidable 316L.

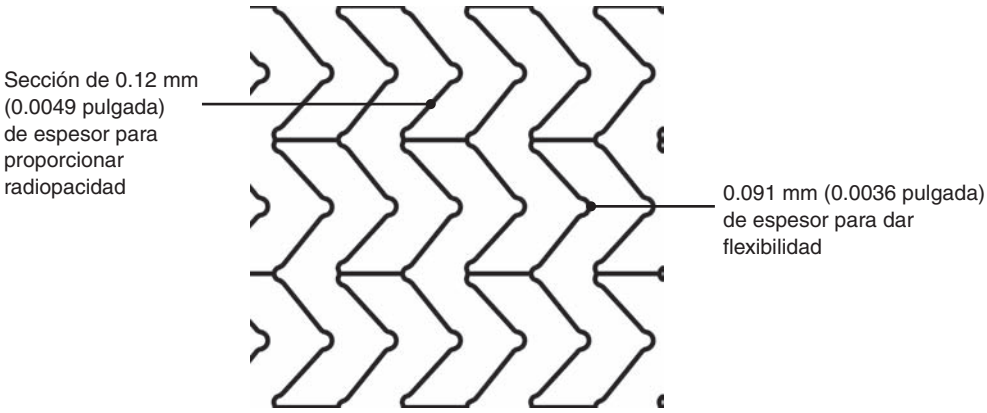


FIGURA 27.19 Detalle del patrón 3-3-3 del MULTI-LINK TETRA™.

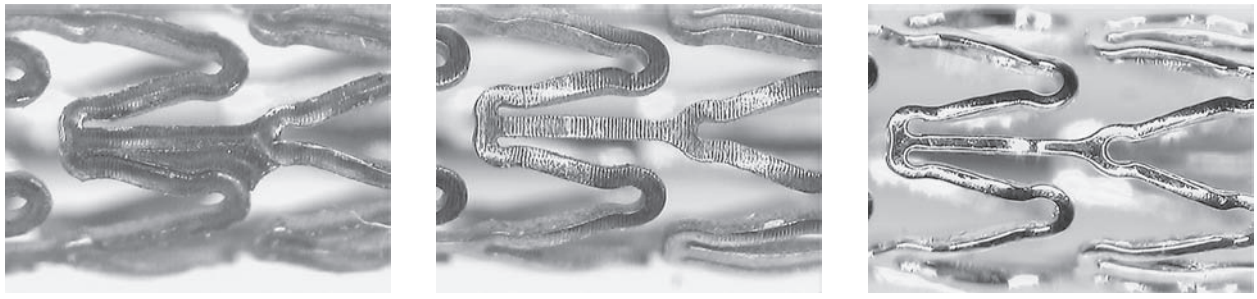


FIGURA 27.20 Evolución de la superficie del "stent". *(a)* El MULTI-LINK TETRA™ después de la operación láser. Obsérvese que una pequeña porción de metal todavía es atacada. *(b)* Después de la remoción de escoria. *(c)* Luego del electropulido.

El patrón de un "stent" también afecta su desempeño. Primero se realiza un análisis de elementos finitos del diseño del "stent" para determinar cómo se comportará ante los esfuerzos inducidos por el latido cardiaco. El patrón de soporte, el espesor del tubo y la anchura de la pierna de soporte afectan el desempeño del "stent". Son posibles muchos patrones diferentes, como el del MULTI-LINK TETRA™, que se muestra en la figura. 27.19 y que incluye algunas de sus dimensiones críticas.

Un "stent" se inicia como un tubo estirado de acero inoxidable, con un diámetro exterior que coincide con la dimensión final del "stent" y con un espesor de pared seleccionado para proporcionar una resistencia apropiada cuando se dilata. Después se maquina el tubo estirado a fin de lograr el patrón deseado (fig. 27.20a). Este método ha demostrado ser muy efectivo, debido al pequeño e intrincado patrón y las estrechas tolerancias dimensionales que debe tener. Cuando el láser corta el patrón del "stent", deja pequeñas porciones de metal que es necesario retirar; por lo tanto, es muy importante que el láser corte a través de toda la pared del tubo. De manera inevitable, se desarrolla una gruesa capa de óxido o de escoria sobre el acero inoxidable debido al ataque térmico y químico del aire. Además, el maquinado láser genera salpicaduras de soldadura, rebabas y otros defectos superficiales. En consecuencia, se requieren operaciones de acabado para retirar las salpicaduras y la capa de óxido.

La primera operación de acabado después del maquinado láser comprende el ataque químico para eliminar del "stent" toda la escoria que sea posible; esta operación

suele efectuarse en una solución ácida y en la figura 27.20b se muestra la superficie resultante. Una vez que se ha retirado la escoria de manera suficiente, es necesario eliminar cualquier rebaba residual del proceso de maquinado por láser y debe dársele acabado a la superficie del "stent". Es muy importante que este acabado sea liso, a fin de evitar la posible formación de coágulos (trombos) en el "stent". Para eliminar los puntos afilados, el "stent" se electropule haciendo pasar una corriente eléctrica a través de una solución electroquímica para asegurar un acabado superficial apropiado (fig. 27.20c), brillante y liso. Después, el "stent" se coloca en un ensamble de catéter de globo, esterilizado, y se empaca para entrega al cirujano.

Fuente: Cortesía de K. L. Graham, Guidant Corporation.

RESUMEN

- Los procesos de maquinado avanzado tienen capacidades únicas y utilizan fuentes de energía química, electroquímica, eléctrica y de haces de alta energía. Las propiedades mecánicas del material de la pieza de trabajo son poco significativas, ya que estos procesos se basan en mecanismos que no implican la resistencia, dureza, ductilidad o tenacidad del material, sino propiedades físicas, químicas y eléctricas.
- Los métodos químicos y eléctricos de maquinado son particularmente adecuados para materiales duros y formas complejas. No producen fuerzas (y, por lo tanto, pueden utilizarse en piezas de trabajo delgadas, esbeltas y flexibles), temperaturas significativas o esfuerzos residuales. Sin embargo, deben investigarse los efectos de estos procesos en la integridad de la superficie, ya que pueden dañarla de manera considerable, reduciendo así la resistencia a la fatiga del producto.
- Los procesos de maquinado con haces de alta energía utilizan básicamente rayos láser, haces de electrones y arcos de plasma. Tienen importantes aplicaciones industriales, poseen una gran flexibilidad de operación con controles robóticos y son económicamente competitivos con distintos procesos.
- Los procesos de maquinado por chorro de agua, maquinado por chorro abrasivo de agua y maquinado por chorro abrasivo se pueden utilizar en operaciones tanto de corte como de rebabeo. Como no usan herramental duro, tienen una flexibilidad de operación inherente.

TÉRMINOS CLAVE

Arco de plasma
Atacante
Corte por arco de plasma
Dieléctrico
EDM con alambre
EDM sin desgaste
Electrodo
Electrolito
Estampado de matrices
Fotoataque
Fotorresistente
Fresado químico
Honeado electroquímico
Láser
Maquinado electrolítico con forma de tubo
Maquinado electroquímico
Maquinado fotoquímico
Maquinado hidrodinámico
Maquinado por chorro abrasivo
Maquinado por chorro de agua
Maquinado por chorro de agua abrasivo
Maquinado por descarga eléctrica o electroerosionado
Maquinado por haz de electrones
Maquinado por pulso electroquímico
Maquinado por rayo láser
Maquinado químico
Reactivo
Rectificación electroquímica
Rectificación por descarga eléctrica
Rectificación por descarga electroquímica
Socavación
Troquelado fotoquímico
Troquelado químico

BIBLIOGRAFÍA

ASM Handbook, Vol. 16: *Machining*, ASM International, 1989.
Brown, J., *Advanced Machining Technology Handbook*, McGraw-Hill, 1998.
Chryssolouris, G. y Sheng, P., *Laser Machining, Theory and Practice*, Springer, 1991.
Crafer, R. C. y Oakley, P. J., *Laser Processing in Manufacturing*, Champman & Hall, 1993.
El-Hofy, H. A.–G., *Advanced Machining Processes*, McGraw-Hill, 2005.
Gillespie, L., *Deburring and Edge Finishing Handbook*, Society of Manufacturing Engineers, 1999.
Guitran, E. B., *The EDM Handbook*, Hanser-Gardner, 1997.
Jain, V. K. y Pandey, P. C., *Theory and Practice of Electrochemical Machining*, Wiley, 1993.
Jameson, E. C., *Electrical Discharge Machining*, Society of Manufacturing Engineers, 2001.
Lange, K. (ed.), *Handbook of Metal Forming* (capítulo 32, *Die Manufacture*), McGraw-Hill, 1985.
Machinery's Handbook, Industrial Press, actualizado periódicamente.
Machining Data Handbook, 3a. ed., 2 vols. Machinability Data Center, 1980.
McGeough, J. A., *Advanced Methods of Machining*, Chapman & Hall, 1988.
Migliore, L., *Laser Materials Processing*, Marcel Dekker, 1996.
Momber, A. W. y Kovacevic, R., *Principles of Abrasive Water Jet Machining*, Springer, 1998.
Powell, J., *CO_2 Laser Cutting*, 2a. ed., Springer, 1998.
Sommer, C. y Sommer, S., *Wire EDM Handbook*, Technical Advanced Publishing Co., 1997.
Steen, W. M., *Laser Material Processing*, Springer, 1991.
Taniguchi, N., *Energy-Beam Processing of Materials*, Oxford, 1989.
Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4a. ed., Vol. 1: *Machining*, Society of Manufacturing Engineers, 1983.

PREGUNTAS DE REPASO

27.1 Mencione los procesos comprendidos en el maquinado químico. Describa brevemente sus principios.
27.2 ¿Cuáles deben ser las propiedades de los enmascarantes? Explique su respuesta.
27.3 Describa las similitudes y diferencias entre el troquelado químico y el convencional utilizando troqueles.
27.4 Explique la diferencia entre el maquinado químico y el electroquímico.
27.5 ¿Cuál es el principio comprendido en la rectificación electroquímica?
27.6 Explique cómo se pueden producir formas complejas mediante el proceso EDM.
27.7 ¿Cuáles son las capacidades del EDM con alambre? ¿Podría utilizarse este proceso para fabricar partes cónicas? Explique su respuesta.
27.8 Describa las ventajas del maquinado por chorro de agua.
27.9 ¿Cuál es la diferencia entre el troquelado fotoquímico y el químico?
27.10 ¿Se pueden maquinar químicamente cavidades con contornos?
27.11 ¿Qué tipo de pieza de trabajo no es adecuado para el maquinado por rayo láser?
27.12 ¿Qué es una socavación? ¿Por qué debe considerarse en el maquinado químico?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

27.13 Proporcione posibles razones técnicas y económicas por las que los procesos descritos en este capítulo podrían preferirse sobre los descritos en los capítulos precedentes.

27.14 ¿Por qué se ha utilizado tan ampliamente el maquinado por descarga eléctrica (electroerosionado) en la industria?

27.15 Explique por qué no son significativas las propiedades mecánicas de los materiales de las piezas de trabajo en la mayoría de los procesos descritos en este capítulo.

27.16 ¿En qué tipos de productos o partes es más aplicable el proceso EDM con alambre?

27.17 ¿Por qué los diferentes procesos de maquinado avanzado pueden afectar la resistencia a la fatiga de los materiales en diferentes grados?

27.18 Explique por qué es difícil producir perfiles y esquinas agudas con algunos de los procesos descritos en este capítulo.

27.19 ¿Qué procesos de maquinado avanzado provocan daño térmico? ¿Cuál es la consecuencia de dicho daño en las piezas de trabajo?

27.20 En el maquinado por chorro de agua abrasivo, ¿en qué etapa se introduce el abrasivo en el chorro de agua? Investigue en la bibliografía disponible, después dibuje un esquema del equipo comprendido.

27.21 Diga lo que piensa en relación con el maquinado por rayo láser de los materiales no metálicos. Proporcione varias aplicaciones posibles, incluyendo sus ventajas en comparación con otros procesos.

27.22 ¿Por qué algunas veces el formado o el maquinado previo de partes es deseable en los procesos descritos en este capítulo?

27.23 ¿Las operaciones de rebabeo son necesarias para las partes fabricadas mediante procesos de maquinado avanzado? Explique y proporcione varios ejemplos específicos.

27.24 ¿Piensa que sería posible producir engranes rectos mediante procesos de maquinado avanzado iniciando con una pieza en bruto redonda? Explique su respuesta.

27.25 Liste y explique los factores que contribuyen a un acabado superficial deficiente en los procesos descritos en este capítulo.

27.26 Investigue en la bibliografía técnica disponible y describa los tipos de superficies producidas mediante el haz de electrones, el arco de plasma y el corte con láser.

27.27 Se indicó que el grafito es el material preferido para el herramental EDM. ¿El grafito sería útil en el EDM con alambre? Explique su respuesta.

27.28 ¿Cuál es el propósito de los abrasivos en la rectificación electroquímica?

27.29 ¿Por qué los láseres se utilizan cada vez más para marcar partes?

27.30 ¿Cuál de los procesos descritos en este capítulo es adecuado para producir orificios muy pequeños y profundos? ¿Por qué?

27.31 ¿La anchura de corte es importante en el EDM con alambre? Explique su respuesta.

27.32 ¿Existen similitudes entre el maquinado fotoquímico y el curado de piso sólido? (Ver sección 20.3.6).

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

27.33 Se está produciendo mediante maquinado electroquímico un orificio de 100 mm de profundidad que tiene 20 mm de diámetro. Es más importante una alta capacidad de producción que la calidad de la superficie maquinada. Calcule la corriente máxima y el tiempo requerido para realizar esta operación.

27.34 Si la operación del problema 27.33 se realizara en una máquina de descarga eléctrica, ¿cuál sería el tiempo estimado de maquinado?

27.35 Se está realizando una operación de corte con un rayo láser. La pieza que se está cortando tiene un espesor de $\frac{3}{4}$ de pulgada y 8 pulgadas de largo. Si la anchura de corte es de $\frac{3}{32}$ pulgadas, calcule el tiempo requerido para realizar esta operación.

27.36 Se está maquinando una placa de cobre de 1.0 pulgada de espesor mediante EDM con alambre. El alambre se mueve a una velocidad de 5 pies/min y la anchura de corte es de $\frac{1}{16}$ pulgadas. ¿Cuál es la potencia requerida? Debe tenerse en cuenta que se requieren 1550 J (2100 pies-libras) para fundir un gramo de cobre.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

27.37 ¿Consideraría diseñar una máquina herramienta que combine (en una sola) dos o más de los procesos descritos en este capítulo? Explique su respuesta. ¿Para qué tipos de partes sería útil una máquina como ésta? Dibuje un croquis preliminar para dicha máquina.

27.38 Repita el problema 27.37 combinando procesos descritos en *(a)* los capítulos 13 a 16; *(b)* los capítulos 23 y 24, y *(c)* los capítulos 26 y 27. Proporcione un dibujo preliminar de una máquina para cada uno de los tres grupos. ¿Cómo convencería a un prospecto de cliente de los méritos de dichas máquinas?

27.39 Liste los procesos de maquinado que pudieran ser adecuados para cada uno de los siguientes materiales: *(a)* cerámicos; *(b)* hierro fundido; *(c)* termoplásticos; *(d)* termofijos; *(e)* diamante, y *(f)* cobre recocido.

27.40 ¿Cuál de los procesos descritos en este capítulo requiere vacío? Explique por qué.

27.41 ¿Cómo manufacturaría un disco redondo cónico de gran diámetro con un espesor que decreciera del centro hacia fuera?

27.42 Describa las similitudes y diferencias entre los diferentes lineamientos de diseño presentados en este capítulo.

27.43 Describa cualquier limitación de tamaño en los procesos de maquinado avanzado. Proporcione ejemplos.

27.44 Hemos visto que existen varios métodos para producir orificios. Con base en los temas cubiertos en las partes III y IV, haga una tabla completa de procesos para producir orificios. Describa las ventajas y limitaciones de cada método, comente la calidad y la integridad superficial de los orificios producidos y proporcione ejemplos de aplicaciones específicas.

27.45 En el ejemplo 27.1 se muestra una combinación del corte con láser y el punzonado de una lámina metálica. Considerando los parámetros correspondientes implícitos, diseñe un sistema en el que se puedan utilizar ambos procesos combinados para producir partes a partir de lámina metálica.

27.46 El marcado de superficies con números y letras para propósitos de identificación de partes se puede realizar no sólo con etiquetas, sino mediante diversos métodos mecánicos y no mecánicos. Con base en los procesos descritos hasta este punto, liste estos métodos explicando sus ventajas, limitaciones y aplicaciones comunes.

27.47 Ingeniería de precisión es un término que se utiliza para describir partes de alta calidad de manufactura con tolerancias dimensionales cerradas y buen acabado superficial Con base en sus capacidades de proceso, liste los procesos de maquinado avanzado en orden decreciente de la calidad de las partes producidas. Incluya un breve comentario de cada método.

27.48 Con los dibujos apropiados, describa los principios de diversos sistemas de fijación y dispositivos de soporte del trabajo que se pueden utilizar en los procesos descritos en este capítulo.

27.49 Haga una tabla de las capacidades de los procesos de maquinado avanzado descritos en este capítulo. Utilice varias columnas que describan las máquinas correspondientes, el tipo de herramientas y materiales para herramientas empleados, las formas de las piezas en bruto y las partes producidas, los tamaños mínimo y máximo comunes, el acabado superficial, las tolerancias y las capacidades de producción.

27.50 Una de las preocupaciones generales relacionadas con los procesos de maquinado avanzado es que, a pesar de sus muchas ventajas, por lo general son más lentos que los procesos de maquinado convencionales. Investigue las velocidades, tiempos de maquinado y capacidades de producción correspondientes y elabore una tabla en la que se comparen las capacidades de proceso respectivas.

27.51 Hemos visto que se pueden utilizar varios de los procesos descritos en la parte IV de este libro (solos o combinados) a fin de fabricar o dar acabado a las matrices para las operaciones de trabajo de los metales. Escriba una breve nota técnica sobre estos métodos, describiendo sus ventajas, limitaciones y aplicaciones características.

27.52 ¿Sería difícil aplicar los procesos descritos en este capítulo a diversos materiales no metálicos o semejantes al hule? Comente la influencia de las diversas propiedades físicas y mecánicas de los materiales de las piezas de trabajo, geometrías, etcétera.

27.53 Liste los procesos descritos en este capítulo en los que sean importantes las siguientes propiedades: *(a)* mecánicas; *(b)* químicas; *(c)* térmicas, y *(d)* eléctricas. ¿Existen procesos en los que sean importantes dos o más de estas propiedades? Explique su respuesta.

Fabricación de dispositivos microelectrónicos y micromanufactura

PARTE V

Considérese la manufactura de un engrane recto metálico simple: puede producirse a partir de una pieza en bruto forjada y operaciones de maquinado si tiene 10 cm de diámetro, ya que sería muy difícil fabricar un engrane de 2 mm de diámetro; requeriría un troquelado extremadamente fino, el ataque químico a una lámina metálica o una forma de electroformado. Aunque es posible producirlo, este tipo de engranes resulta muy pequeño para estrategias convencionales de forjado y corte. En cambio, un engrane con algunas decenas de micras de diámetro se puede fabricar utilizando técnicas que comprenden litografía óptica, ataque químico en húmedo o en seco, así como los procesos relacionados que se verán en los siguientes dos capítulos. Un engrane con escasos nanómetros de diámetro sería extremadamente difícil de producir; de hecho, sólo tendría (cuando mucho) algunas decenas de átomos a través de su cara. El ejemplo de dicho engrane es bastante informativo y se puede poner en perspectiva con la ilustración de las escalas de longitud de la figura V.1.

Durante gran parte de la historia de las profesiones, los ingenieros han hecho énfasis en el diseño y la manufactura de componentes relativamente grandes. Por lo general, los procesos convencionales de manufactura (como se describe en los capítulos 11 a 27) producen partes que son mayores o de alrededor de 1 mm, o pueden describirse como visibles a simple vista. Por lo común, se les conoce como partes a *macroescala* (del griego *makros,* que significa "largo"). Al procesamiento de dichas partes se le llama *macromanufactura*. Pueden proporcionarse diversos ejemplos, que van desde artículos que se encuentran en una ferretería hasta fundiciones y forjas utilizadas en maquinaria, así como productos que pueden ser tan grandes como automóviles o aeronaves. Ésta es la gama de tamaños más desarrollada y mejor comprendida desde el punto de vista del diseño y la manufactura, con una amplia variedad de procesos apropiados para producir componentes de este tamaño.

El engrane de algunas decenas de micras de anchura se clasifica dentro del campo de la micromanufactura, como se muestra en la figura V.1. Por definición, la *micromanufactura* se refiere a la manufactura de escala microscópica, no perceptible a simple vista. Este campo se ha desarrollado principalmente para dispositivos electrónicos de toda clase, incluyendo procesadores de computadoras y chips o pastillas de memoria, detectores o sensores, dispositivos de almacenaje magnético, etc. En la mayoría de los casos, esta forma de manufactura se basa en gran medida en los métodos de litografía, ataque en húmedo y en seco, y recubrimiento. Además, la micromanufactura de semiconductores explota la capacidad única del silicio para formar óxidos. Ejemplos de productos que se basan en estas técnicas son una amplia variedad de detectores (sensores) y sondas (ver fig. V.2), cabezas de impresión de chorro de tinta, microactuadores y dispositivos asociados, las cabezas de discos duros magnéticos y dispositivos microelectrónicos, como procesadores de computadoras y chips de memoria. Los métodos de manufactura modernos

permiten la producción de una amplia variedad de rasgos a estas escalas de longitud, pero donde se tiene mayor experiencia es con los dispositivos electrónicos. Los dispositivos mecánicos a microescala son una tecnología relativamente nueva, pero que se ha desarrollado con sorprendente velocidad.

Los engranes a escalas de longitud nanométricas y entre la macro y la microescala son difíciles de producir. No se han desarrollado procesos de manufactura consolidados para cada situación, aunque se encuentran en desarrollo opciones promisorias.

Ejemplos de mesomanufactura son los motores y rodamientos muy pequeños y los componentes para dispositivos miniatura, como los aparatos de corrección auditiva, dispositivos médicos como *stents,* válvulas y relojes mecánicos (que utilizan exactamente el mismo engrane que en nuestro ejemplo). Obsérvese que la mesomanufactura se traslapa con los ejemplos de macro y micromanufactura en la figura V.1.

En la *nanomanufactura*, las partes se producen a escalas de longitud nanométricas (es decir, a mil millonésimas de metro). Por lo general, el término se refiere a métodos de manufactura inferiores a la escala micrométrica, entre 10^{-6} y 10^{-9} metros de longitud. Muchas características de los circuitos integrados se encuentran en esta escala de longitud, pero muy pocos más; las medicinas diseñadas molecularmente y otras formas de biomanufactura son los únicos ejemplos comerciales. Sin embargo, se ha reconocido que numerosos procesos físicos y biológicos actúan en esta escala de longitud y que esa técnica guarda muchas promesas para futuras innovaciones.

Esta parte del libro realza la micro y nanomanufactura. Estas subdisciplinas, dentro de la amplia variedad de ingeniería de manufactura, tienen alrededor de cinco décadas de antigüedad, pero se han desarrollado con rapidez en los últimos veinte años. Los productos que utilizan estos procesos se han vuelto muy comunes y predominantes en la sociedad moderna. Computadoras, comunicaciones, video y equipo de control de todo tipo dependen de estos métodos de manufactura y materiales.

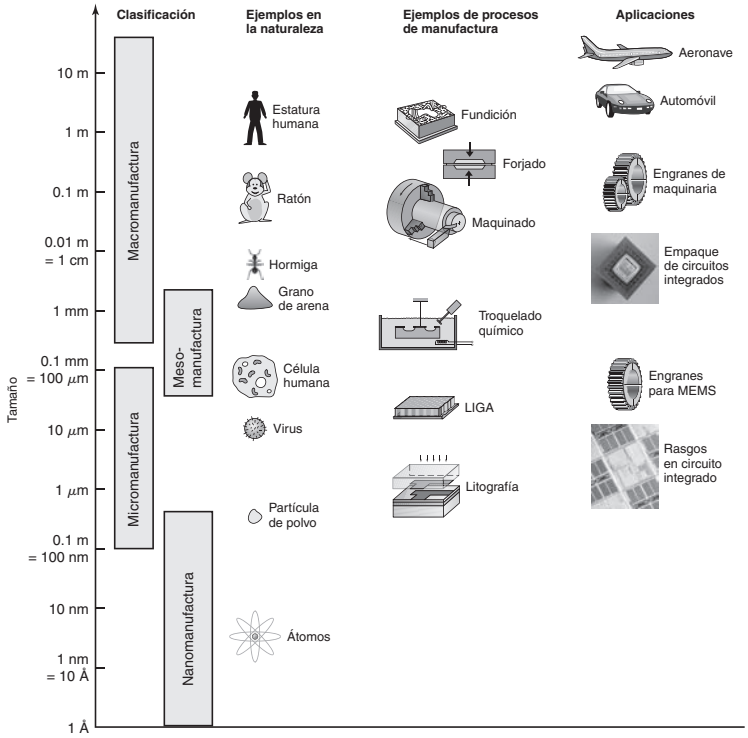


FIGURA V.1 Ilustración de los regímenes de macro, meso, micro y nanomanufactura, la variedad de tamaños comunes de partes y las capacidades de los procesos de manufactura en la producción de estas partes.

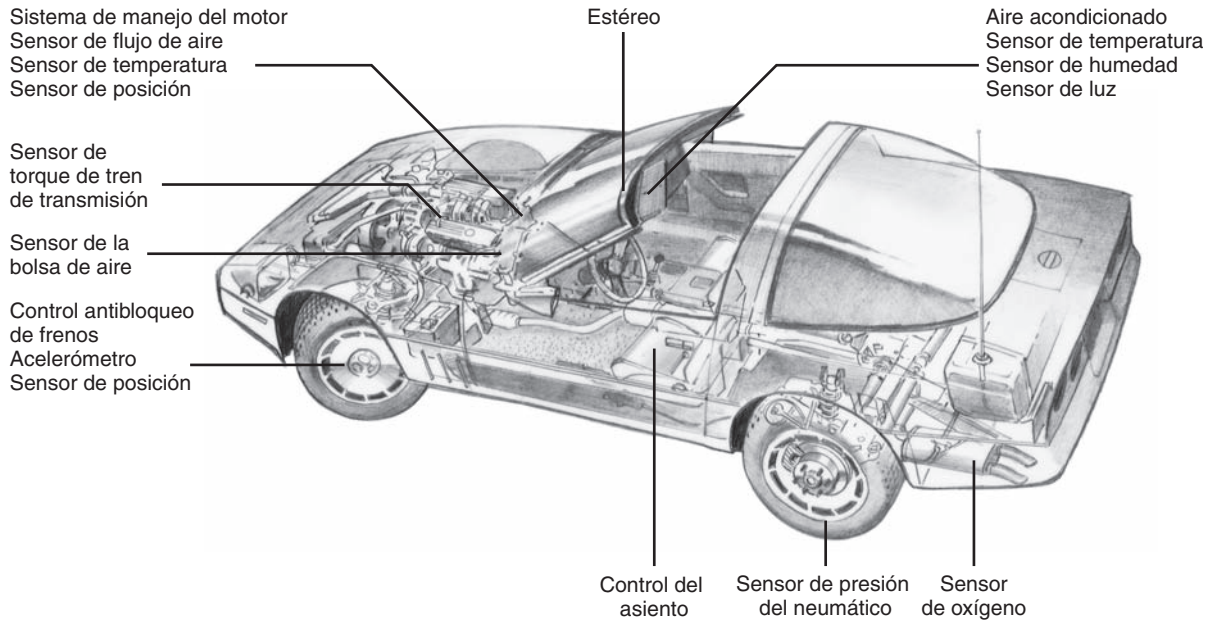


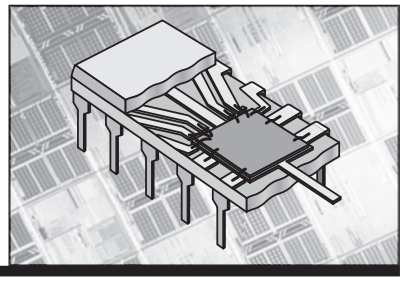
FIGURA V.2 Dispositivos y partes microelectrónicas y microelectromecánicas utilizadas en un automóvil común.

En el capítulo 28 se describe la manufactura de obleas *(wafers)* de silicio y dispositivos microelectrónicos, que incluyen una amplia variedad de procesadores de computadoras, dispositivos de memoria y circuitos integrados. En la sociedad moderna, las computadoras y los dispositivos microelectrónicos tienen una gran difusión y un profundo impacto en la cultura. La comunicación, el entretenimiento, el control, el transporte, el diseño en ingeniería, la manufactura y la medicina han cambiado en gran medida debido a la disponibilidad inmediata de dispositivos semiconductores metal-óxido (MOS, por sus siglas en inglés), que en general se basan en el silicio monocristalino. La microelectrónica es el ejemplo de micromanufactura mejor conocido y más importante en términos comerciales, con algunos aspectos de aplicaciones que ejemplifican la nanomanufactura. También se presentan las técnicas empleadas en el empaque (encapsulado) y ensamble de circuitos integrados en las tarjetas de circuitos impresos.

Después, en el capítulo 29, se describe la producción de dispositivos a microescala, los cuales son de naturaleza mecánica y eléctrica. De acuerdo con su nivel de integración, se conocen como dispositivos micromecánicos o sistemas microelectromecánicos (MEMS, por sus siglas en inglés). A pesar de que los orígenes históricos de la manufactura de MEMS se derivan de los mismos procesos utilizados para los sistemas microelectrónicos y se siguen usando procesos y secuencias de producción idénticos, se han desarrollado muchos procesos únicos para la manufactura de dispositivos y sistemas electromecánicos de microescala.

CAPÍTULO

28 Fabricación de dispositivos micro-electrónicos



28.1 Introducción 868
28.2 Cuartos limpios 871
28.3 Silicio y semiconductores 872
28.4 Crecimiento de cristales y preparación de obleas 874
28.5 Deposición de película 875
28.6 Oxidación 877
28.7 Litografía 878
28.8 Ataque (grabado) 885
28.9 Difusión e implantación de iones 893
28.10 Metalización y pruebas 895
28.11 Unión de cables y empaque 897
28.12 Rendimiento y confiabilidad 900
28.13 Tarjetas de circuitos impresos 901

EJEMPLOS:

28.1 Ley de Moore 884
28.2 Comparación de los ataques o grabados en húmedo y en seco 892
28.3 Procesamiento de una región tipo *p* en silicio tipo *n* 894

En este capítulo se presentan la ciencia y la tecnología comprendidas en la producción de circuitos integrados. Se describe lo siguiente:

- Propiedades especiales del silicio para producir óxido y dopantes.
- Tratamiento de un lingote fundido y operaciones de maquinado para producir un disco.
- Procesos de litografía, ataque y dopaje.
- Ataque en húmedo y en seco para la manufactura de circuitos.
- Conexiones de un transistor en el nivel de computadora.
- Empaques (encapsulados) de los circuitos integrados y métodos de manufactura de las tarjetas de circuitos impresos.

Partes comunes producidas: procesadores de computadoras, chips de memoria, tarjetas de circuitos impresos de todo tipo.

28.1 Introducción

Aunque durante mucho tiempo se han utilizado materiales semiconductores en electrónica, fue el invento del *transistor* en 1947 el que estableció la era de lo que se convertiría en uno de los avances tecnológicos más grandes de la historia. La *microelectrónica* ha tenido un crecimiento continuo en nuestras vidas desde que la tecnología de los **circuitos integrados** (IC, por sus siglas en inglés) se convirtió en la base de calculadoras, relojes de pulsera, aparatos electrodomésticos y controles automovilísticos, sistemas de información, telecomunicaciones, robótica, viajes espaciales, armamento y computadoras personales.

Las principales ventajas de los IC actuales son su pequeñez y su bajo costo. Conforme avanza la tecnología de fabricación, el tamaño de los dispositivos sigue disminuyendo. Por consiguiente, se pueden colocar más componentes en un **chip** (pequeña pieza de material semiconductor en la que se fabrica el circuito). Además, la producción en masa y la automatización han contribuido a reducir el costo de cada circuito terminado. Los componentes fabricados incluyen transistores, diodos, resistores y capacitores.

Los chips comunes producidos hoy en día tienen tamaños que van de 0.5 mm × 0.5 mm a más de 50 mm × 50 mm. En el pasado, no podían fabricarse más de 100 dispositivos en un solo chip; en la actualidad, la nueva tecnología permite densidades que

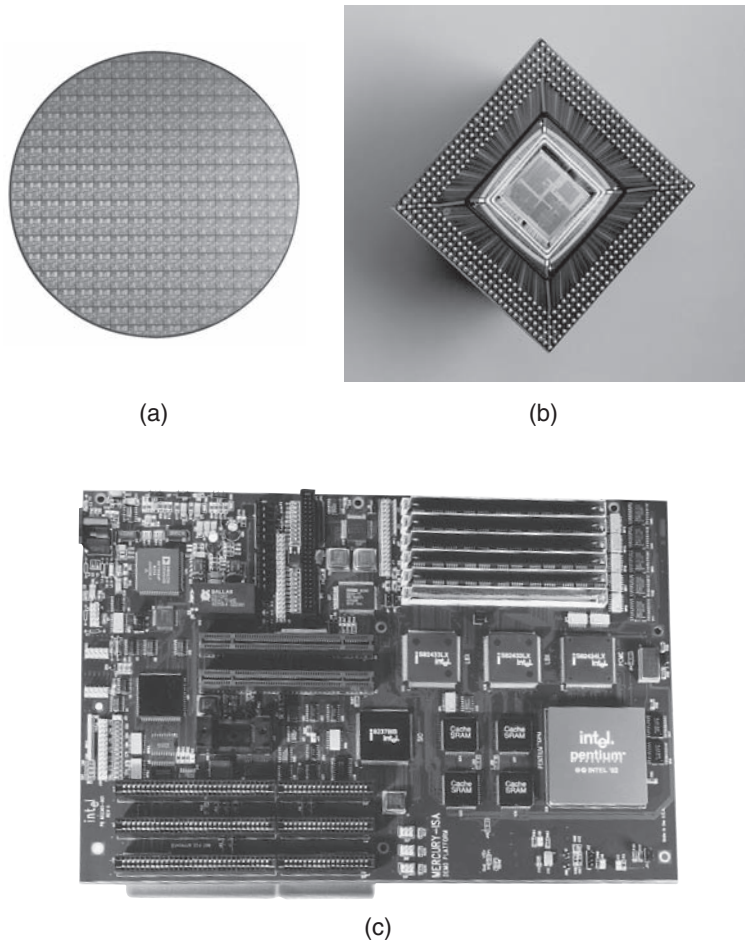


FIGURA 28.1 *(a)* Oblea de ocho pulgadas terminada con dados terminados. *(b)* Chip individual con un arreglo de rejilla de esferas (BGA) sin cubierta. *(c)* Tarjeta de circuitos impresos. *Fuente*: Cortesía de Intel Corporation.

llegan a 10 millones de dispositivos por chip (fig. 28.1). A esta magnitud de integración se le conoce como **integración a muy grande escala** (VLSI, por sus siglas en inglés). Algunos de los IC más avanzados pueden contener más de 100 millones de dispositivos, que se conocen como **integración a ultragran escala** (ULSI, por sus siglas en inglés).

En este capítulo se describen los procesos que se utilizan en la fabricación de dispositivos microelectrónicos y circuitos integrados y se sigue el esquema presentado en la figura 28.2. En la figura 28.3 se muestran los pasos principales en la fabricación del **transistor de semiconductor metal-óxido de efecto de campo** (MOFSET, por sus siglas en inglés), que es uno de los dispositivos predominantes en la tecnología moderna de IC.

En este capítulo se presentan primero las propiedades básicas de los semiconductores y del silicio, y después se describe cada uno de los pasos principales de fabricación. También se trata el empaque (encapsulado) de circuitos integrados y su ensamble en tarjetas de circuitos. Por último, se estudian las tendencias actuales y los pronósticos en la industria de la microelectrónica.

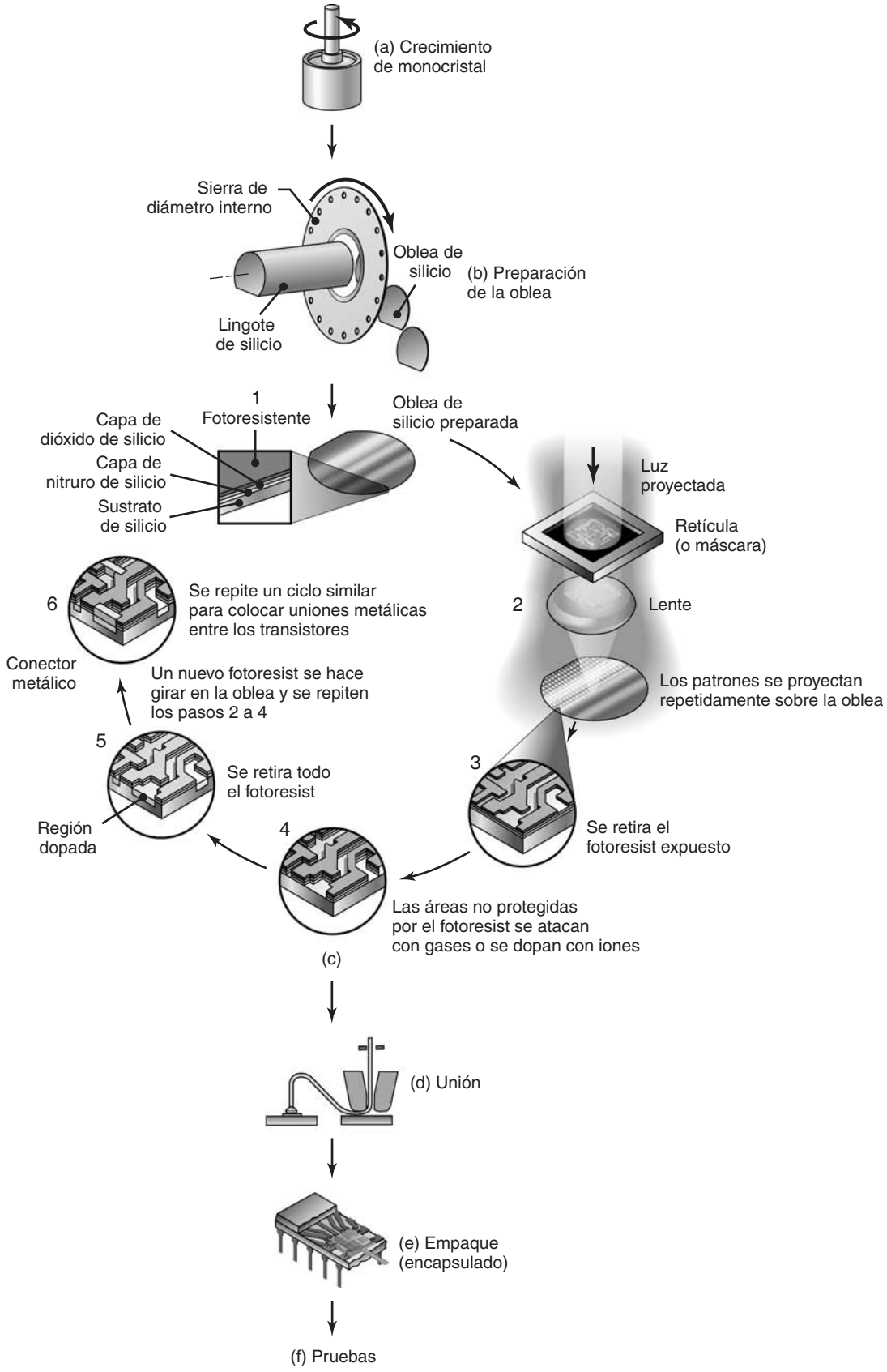


FIGURA 28.2 Diagrama de la secuencia general de fabricación de circuitos integrados.

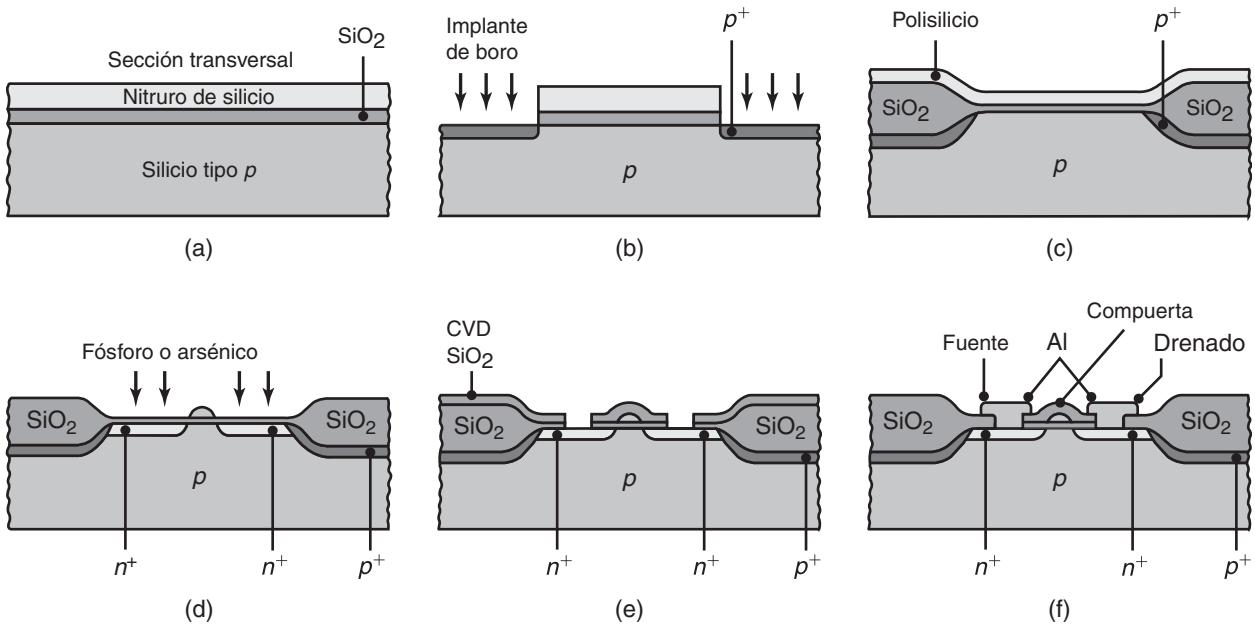


FIGURA 28.3 Vistas transversales de la fabricación de un transistor MOS. *Fuente*: R. C. Jaeger.

28.2 Cuartos limpios

Los cuartos limpios son fundamentales para la producción de la mayoría de los circuitos integrados. Esto se puede apreciar observando la escala de manufactura que debe efectuarse. Por lo general, los circuitos integrados tienen algunos milímetros de longitud y los rasgos más pequeños de un transistor en el circuito llegan a medir unas cuantas decenas de nanómetros (nano = 10^{-9}). Esta variedad de tamaño es menor que la de las partículas que no solemos considerar dañinas, como el polvo, humo, perfume y bacterias. Sin embargo, si estos contaminantes están presentes en una oblea de silicio durante el procesamiento, pueden perjudicar el desempeño de todo el dispositivo. Por lo tanto, es fundamental eliminar todas las partículas potencialmente dañinas del ambiente de manufactura de los circuitos integrados.

Existen diversos niveles de cuartos limpios, que se definen por su **clase**. El sistema de clasificación se refiere a la cantidad de partículas de 0.5 μm o más grandes en un pie cúbico de aire, por lo que un cuarto limpio de clase 10 tiene 10 o menos de estas partículas por pie cúbico. Es evidente que el tamaño y la cantidad de partículas son importantes para definir la clase de cuarto limpio, como se muestra en la figura 28.4. La mayoría de los cuartos limpios para manufactura microelectrónica van de la clase 1 a la clase 10. Como comparación, el nivel de contaminación en los hospitales modernos es del orden de 10,000 partículas por pie cúbico.

Para obtener atmósferas controladas que estén libres de partículas contaminantes, todo el aire de ventilación debe pasar a través de un filtro de *aire de partículas de alto rendimiento* (HEPA, por sus siglas en inglés). Además, por lo general, el aire tiene que acondicionarse de manera que esté a 21 °C (70 °F) y con 45% de humedad relativa.

La fuente más grande de contaminantes en un cuarto limpio es la propia gente, que despide partículas de piel, cabello, perfume y maquillaje, ropa, bacterias y virus de manera natural y en cantidades lo suficientemente grandes para comprometer un cuarto limpio de clase 100. Por estas razones, la mayoría de los cuartos limpios requiere protecciones especiales, como batas de laboratorio, guantes y redecillas para el cabello, así como evitar

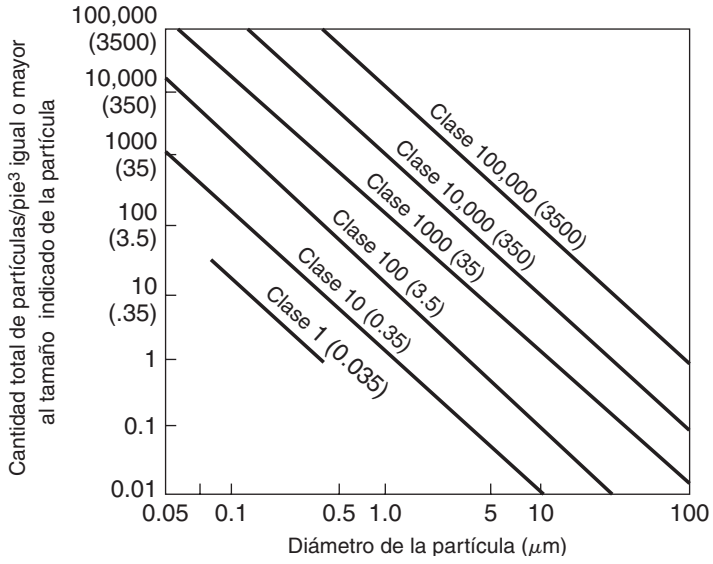


FIGURA 28.4 Conteos de tamaños permisibles de partículas para diferentes clases de cuartos limpios. Las cantidades en paréntesis son partículas contadas por metros cúbicos.

el uso de perfumes y maquillaje. Los cuartos limpios más estrictos exigen el uso de cubiertas para todo el cuerpo, conocidas como trajes de conejo. También existen otras medidas de precaución rigurosas; por ejemplo, el uso de un lápiz en lugar de bolígrafo puede producir partículas inconvenientes de grafito, en tanto que se necesita papel especial para cuartos limpios a fin de evitar la acumulación de partículas de papel en el aire.

Los cuartos limpios están diseñados de manera que la limpieza en los lugares críticos de procesamiento sea mayor que la del cuarto limpio en general, lo cual se logra dirigiendo el aire de ventilación filtrado de modo que desplace el del ambiente y elimine las partículas de polvo. Esto se puede facilitar con áreas de trabajo que usen campanas de flujo laminar.

28.3 | Silicio y semiconductores

Como el nombre lo indica, los **materiales semiconductores** tienen propiedades eléctricas que se encuentran entre las de los conductores y los aislantes y muestran resistividades entre 10^{-3} y 10^{8} Ω–cm.

Los semiconductores se han convertido en la base de los dispositivos electrónicos porque es posible alterar sus propiedades eléctricas agregando cantidades controladas de átomos de impurezas seleccionados a sus estructuras cristalinas. Estos átomos (también conocidos como **dopantes**) tienen un electrón más de valencia (tipo *n* o dopante negativo) o un electrón menos de valencia (tipo *p* o dopante positivo) que los átomos en la red del semiconductor.

Para el silicio, que es un elemento del grupo IV de la Tabla Periódica, los dopantes comunes de tipos *n* y *p* incluyen al fósforo (grupo V) y al boro (grupo III), respectivamente. La operación eléctrica de los dispositivos semiconductores se puede controlar mediante la creación de regiones con diferentes tipos y concentraciones de dopante.

Aunque los primeros dispositivos electrónicos se fabricaron con *germanio*, el **silicio** se ha convertido en el estándar industrial. La abundancia de formas alternativas de

silicio en la Tierra ocupa el segundo lugar después del oxígeno, lo que lo vuelve económicamente atractivo. La ventaja principal del silicio sobre el germanio es su gran banda de energía (1.1 eV) en comparación con la del germanio (0.66 eV). Esta banda permite a los dispositivos con base de silicio operar a temperaturas de unos 150 °C (270 °F), las cuales son más altas que los dispositivos fabricados con germanio, que operan a casi 100 °C (180 °F).

Otra ventaja importante de procesar silicio es que su óxido (*dióxido de silicio*) es un excelente aislante eléctrico y se puede utilizar para efectos de aislamiento y pasivación. Por el contrario, el óxido de germanio es soluble en agua e inadecuado para dispositivos electrónicos. Además, la forma oxidada del silicio, SiO_2, permite la producción de dispositivos *semiconductores metal óxido* (MOS), que son la base de los transistores MOS. Estos materiales constituyen dispositivos de memoria, procesadores y similares, y son por mucho el volumen más grande de material semiconductor producido a nivel mundial.

Estructura del silicio. La estructura cristalográfica del silicio es una estructura fcc (cúbica centrada en las caras) parecida al diamante, como se muestra en la figura 28.5, junto con los índices de Miller de un material fcc. Estos índices son una consideración útil en la identificación de planos y direcciones dentro de una celda unitaria. Un plano cristalográfico está definido por el recíproco de sus intersecciones en los tres ejes. Debido a que los atacantes anisotrópicos preferentemente remueven material en ciertos planos cristalográficos, la orientación del cristal de silicio en una oblea es un factor que debe considerarse.

A pesar de sus ventajas, el silicio tiene una banda de energía más grande (1.1 eV) que la del óxido de germanio y, por lo tanto, posee una temperatura de servicio máxima superior (alrededor de 200 °C; 400 °F). Esta limitación ha fomentado el desarrollo de semiconductores compuestos, en especial **arseniuro de galio**. Su ventaja principal sobre el

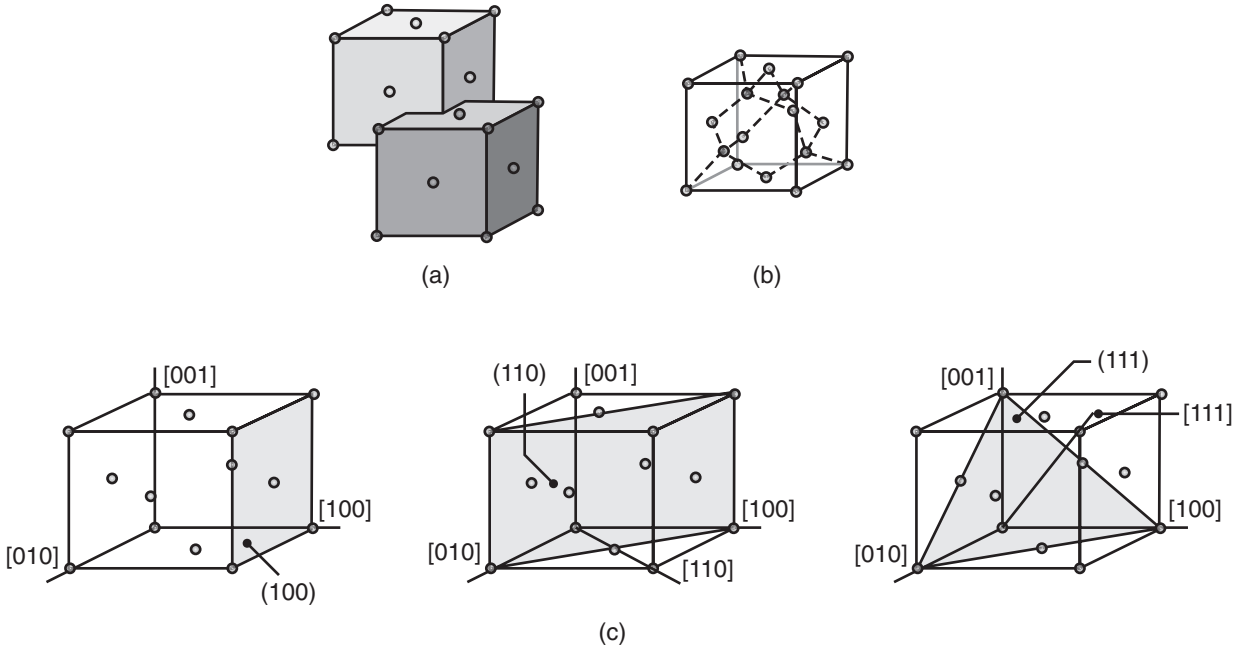


FIGURA 28.5 Estructura cristalográfica e índices de Miller para el silicio. *(a)* Construcción de una red tipo diamante a partir de la interpenetración de celdas cúbicas centradas en la cara; se muestra una de las ocho celdas de penetración. *(b)* Red tipo diamante de silicio; los átomos interiores se sombrearon más oscuros que los átomos superficiales. *(c)* Índices de Miller para una red cúbica.

silicio es su capacidad para emitir luz, permitiendo así la fabricación de dispositivos como láseres y diodos emisores de luz (LED, por sus siglas en inglés).

Los dispositivos fabricados con arseniuro de galio también tienen velocidades de funcionamiento mucho mayores que las de los producidos con silicio. Algunas de las desventajas del arseniuro de galio incluyen su costo considerablemente superior, mayores complicaciones de procesamiento y la dificultad para desarrollar capas de óxido de alta calidad, cuya necesidad se enfatiza a lo largo del capítulo.

28.4 Crecimiento de cristales y preparación de obleas

El silicio se produce naturalmente en las formas de dióxido de silicio y diversos silicatos. Sin embargo, debe someterse a una serie de pasos de purificación para convertirse en un material monocristalino de alta calidad, sin defectos, requerido para la fabricación de dispositivos semiconductores. El proceso se inicia calentando sílice y carbono juntos en un horno eléctrico, que produce un silicio policristalino con un grado de pureza de 95% a 98%. Este material se convierte en una forma alternativa (por lo común triclorosilano), que a su vez se purifica y descompone en una atmósfera de hidrógeno de alta temperatura. El producto resultante es **silicio de grado electrónico** (EGS, por sus siglas en inglés), de muy alta calidad.

Por lo general, el silicio monocristalino se obtiene mediante el **proceso Czochralski** o **CZ**, como ya se describió en la sección 11.4. Este proceso utiliza un cristal semilla que se sumerge en silicio fundido y después se extrae lentamente, al tiempo que se hace girar. En este punto, se pueden agregar cantidades controladas de impurezas para obtener un cristal dopado de manera uniforme.

El resultado del proceso CZ es un lingote monocristalino cilíndrico, por lo general de 150 mm a 300 mm (6 a 12 pulgadas) de diámetro y alrededor de 1 m (40 pulgadas) de longitud. Por desgracia, esta técnica no permite controlar con exactitud el diámetro de los lingotes, de modo que éstos suelen crecer algunos milímetros más largos que el tamaño requerido y se rectifican a un diámetro preciso. Las obleas de silicio se producen de lingotes de silicio mediante una secuencia de operaciones de maquinado y acabado, como se muestra en la figura 28.6. Se maquina una muesca o plano en el cilindro de silicio para identificar su orientación cristalina, como puede verse en la figura 28.6b.

A continuación, el cristal se rebana en **obleas** individuales por medio de una cuchilla de diamante incrustado en el diámetro interno (ver fig. 24.25f). En este método se emplea una cuchilla rotatoria en forma de anillo con el filo de corte en el diámetro interno. Aunque la profundidad requerida del sustrato para la mayoría de los dispositivos electrónicos es de algunas micras, por lo general las obleas se cortan a un espesor de casi 0.5 mm (0.02 pulgada). Este espesor proporciona el soporte físico necesario para la absorción de variaciones de temperatura y el soporte mecánico requerido durante la fabricación posterior.

Después la oblea se rectifica a lo largo de sus bordes con un disco de rectificado. Esta operación le proporciona un perfil redondo, que es más resistente al astillado. Por último, las obleas deben pulirse y limpiarse para eliminar el daño superficial provocado por el proceso de corte. Esto suele efectuarse mediante *pulido químico-mecánico* (también llamado *planarización químico-mecánica*), como se describe en la sección 26.7.

En este punto, la oblea de silicio monocristalino está lista para la fabricación del circuito integrado o dispositivo, la cual ocurre sobre toda la superficie de la oblea generando muchas virutas al mismo tiempo, como se muestra en la figura 28.1a. La cantidad de virutas depende del área transversal de la oblea. Por esta razón, hoy en día una gran cantidad de fabricantes de circuitos avanzados han cambiado al uso de cilindros monocristalinos más grandes y las obleas de 300 mm (12 pulgadas) de diámetro son cada vez más comunes.

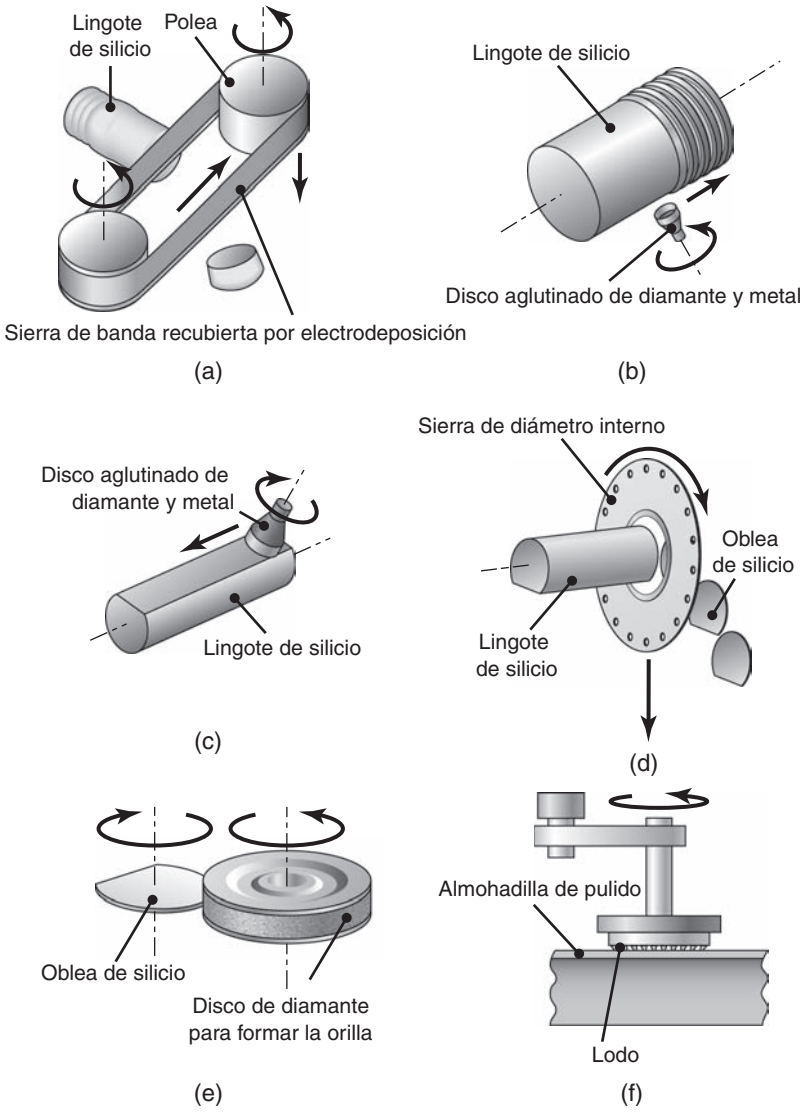


FIGURA 28.6 Operaciones de acabado en un lingote de silicio para producir obleas: *(a)* aserrado de los extremos del lingote; *(b)* rectificado del extremo y de las superficies cilíndricas de un lingote de silicio; *(c)* maquinado de una muesca o superficie plana; *(d)* rebanado de obleas; *(e)* rectificado frontal de obleas; *(f)* pulido químico-mecánico de obleas.

28.5 Deposición de película

En el procesamiento de dispositivos microelectrónicos se utilizan *películas* de diversos tipos, en particular aislantes y conductoras. Por lo común, las películas depositadas incluyen polisilicio, nitruro de silicio, dióxido de silicio, tungsteno, titanio y aluminio. En algunos casos, las obleas sólo sirven como soporte mecánico en el que se hacen crecer *capas epitaxiales* especiales.

Epitaxia. Definida como el crecimiento de un depósito de vapor, la *epitaxia* o electrodepósito se produce cuando la orientación de los cristales del depósito se relaciona directamente con la orientación de los cristales en el sustrato cristalino subyacente. Las ventajas de

procesar estas películas depositadas en lugar de la superficie real de la oblea incluyen: menos impurezas (de manera notable, carbono y oxígeno), mejor desempeño del dispositivo y adaptación de las propiedades del material (que no se puede realizar en las propias obleas).

Algunas funciones principales de las películas depositadas son el **enmascaramiento *(masking)*** y la protección de la superficie de los semiconductores. En las aplicaciones de enmascaramiento, la película debe inhibir de manera efectiva el paso de dopantes y al mismo tiempo mostrar capacidad para ser atacada y adquirir la forma de patrones de alta resolución. Al concluir la fabricación de los dispositivos, se aplican películas a fin de proteger los circuitos subyacentes. Las películas utilizadas para enmascaramiento y protección incluyen dióxido de silicio, vidrio de fosfosilicato (PSG, por sus siglas en inglés) y nitruro de silicio. Cada uno de estos materiales tiene distintas ventajas y con frecuencia se usan combinados.

Las películas conductoras se utilizan principalmente para conectar dispositivos. Estas películas deben tener baja resistividad y capacidad de transportar grandes corrientes, además de ser adecuadas para conexión en las terminales de conexión empacadas con uniones de cable. Por lo general, el aluminio y el cobre se emplean en este propósito. La creciente complejidad de los circuitos ha requerido hasta seis niveles de capas conductoras, las cuales deben separarse en su totalidad con películas de aislamiento.

Deposición de película. Las películas pueden depositarse utilizando muchas técnicas, que comprenden varias presiones, temperaturas y sistemas de vacío, como se describe a continuación (ver también el capítulo 34):

- Uno de los métodos más simples y antiguos es la **evaporación**, que se utiliza principalmente para depositar películas metálicas. En este proceso, el metal se calienta en vacío hasta su punto de vaporización. Una vez vaporizado, forma una capa delgada sobre la superficie del sustrato. Por lo general, el calor requerido para la evaporación se genera con un filamento de calentamiento o haz de electrones.
- Otro método de deposición metálica es el **chisporroteo** (**pulverización catódica**), que comprende el bombardeo de un objetivo con iones de alta energía (por lo general, argón, Ar^+) en vacío. Los sistemas de chisporroteo suelen incluir una fuente de potencia de CD para producir los iones energizados. Cuando éstos chocan con el objetivo, se extraen átomos que luego se depositan en obleas montadas dentro del sistema. Aunque parte del argón puede quedar atrapado en la película, el chisporroteo produce una cubierta muy uniforme. Los avances en este campo incluyen el uso de una fuente de potencia de radiofrecuencia (**chisporroteo RF**) y la introducción de campos magnéticos (**chisporroteo con magnetrón**).
- En una de las técnicas más comunes, la **deposición química de vapor** (CVD, por sus siglas en inglés), la deposición de películas se logra por medio de la reacción o descomposición de compuestos gaseosos. Con esta técnica, el dióxido de silicio se deposita normalmente mediante la oxidación de silano o clorosilano. En la figura 28.7a se muestra un reactor de CVD continuo que opera a presión atmosférica.

  Un método similar que opera a presiones menores se conoce como **deposición química de vapor de baja presión** (LPCVD, por sus siglas en inglés) y se muestra en la figura 28.7b. Capaz de recubrir cientos de obleas al mismo tiempo, este método hace posible una capacidad de producción mucho mayor que la de la CVD de presión atmosférica y proporciona una mayor uniformidad a la película con un consumo menor de gases portadores. Es común que este método se utilice para depositar polisilicio, nitruro de silicio y dióxido de silicio.
- La **deposición química de vapor mejorada con plasma** (PECVD) comprende el procesamiento de obleas en un plasma de RF que contiene los gases fuente. Este método tiene la ventaja de mantener una temperatura baja en la oblea durante la deposición.

Las capas de **epitaxia** de silicio (en las que la capa cristalina se forma utilizando el sustrato como un cristal semilla) se pueden hacer crecer mediante diversos métodos. Si el silicio se deposita desde la fase gaseosa, el proceso se conoce como **epitaxia de fase**

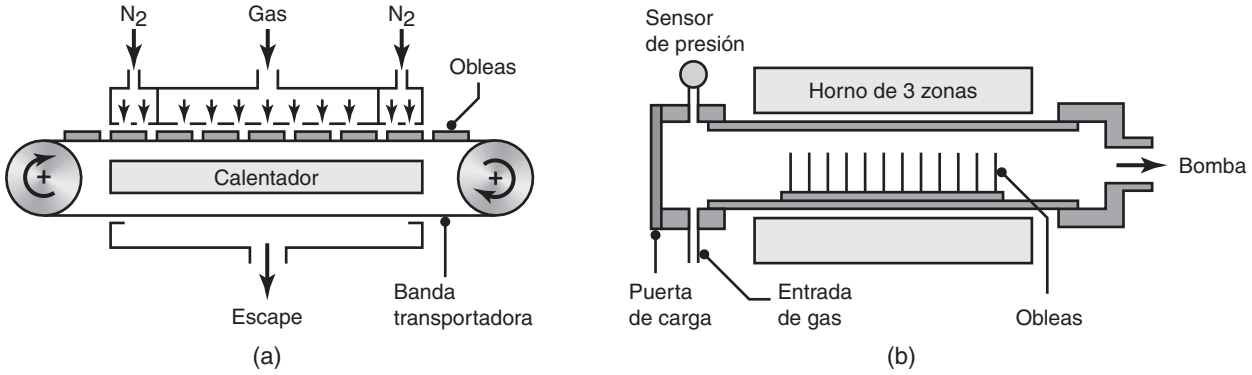


FIGURA 28.7 Diagramas de *(a)* reactor continuo de CVD de presión atmosférica, y *(b)* CVD de baja presión. *Fuente*: S. M. Sze.

vapor (VPE, por sus siglas en inglés). En otra variación, el sustrato caliente entra en contacto con una solución líquida que contiene el material a depositarse, llamado **epitaxia de fase líquida** (LPE, por sus siglas en inglés).

Otro proceso al alto vacío utiliza evaporación para producir un haz térmico de moléculas que se depositan en el sustrato calentado. Conocido como **epitaxia de haz molecular** (MBE, por sus siglas en inglés), este proceso produce un grado muy alto de pureza. Además, debido a que las películas se hacen crecer a una capa atómica a la vez, se puede tener un control excelente sobre los perfiles de dopaje. Este nivel de control es importante en la tecnología del arseniuro de galio. Por desgracia, el proceso de MBE posee velocidades de crecimiento relativamente bajas en comparación con otras técnicas de deposición de película.

28.6 Oxidación

El término *oxidación* se refiere al crecimiento de una capa de óxido debido a la reacción del oxígeno con el material del sustrato. Las películas de óxido también se pueden formar utilizando las técnicas de deposición antes descritas. Los óxidos que se hacen crecer de manera térmica, y que se estudian en esta sección, presentan un nivel de pureza superior al de los óxidos depositados porque crecen directamente a partir del sustrato de alta calidad. Sin embargo, si la composición de la película deseada es diferente de la del material del sustrato, deben usarse métodos de deposición.

En la actualidad, el dióxido de silicio es el óxido más utilizado en la tecnología de IC y sus excelentes características son algunas de las principales razones para el extenso uso del silicio. Además de su efectividad en el enmascaramiento del dopante y el aislamiento de los dispositivos, el papel más crítico del dióxido de silicio es el de material de "óxido de compuerta". Las superficies de silicio tienen una afinidad muy alta con el oxígeno y una sección recién cortada de silicio desarrolla rápidamente un óxido nativo de 30 a 40 Å de espesor (Å = 10^{-7} mm).

- La **oxidación en seco** es un proceso relativamente sencillo y se efectúa elevando la temperatura del sustrato, por lo común a entre 750 °C a 1100 °C (de 1380 °F a 2020 °F), en un ambiente rico en oxígeno. Al formarse una capa de óxido, los agentes oxidantes deben tener la capacidad de pasar a través del óxido y llegar a la superficie de silicio, donde ocurre la reacción real. De esta manera, no se sigue desarrollando una capa de óxido en su parte superior; por el contrario, crece de la superficie de silicio hacia fuera. En el proceso de oxidación se consume parte del sustrato de silicio (fig. 28.8).

  La relación del espesor del óxido con la cantidad del silicio consumido puede llegar a ser de 1:0.44. Por lo tanto, para obtener una capa de óxido de 1000 Å de

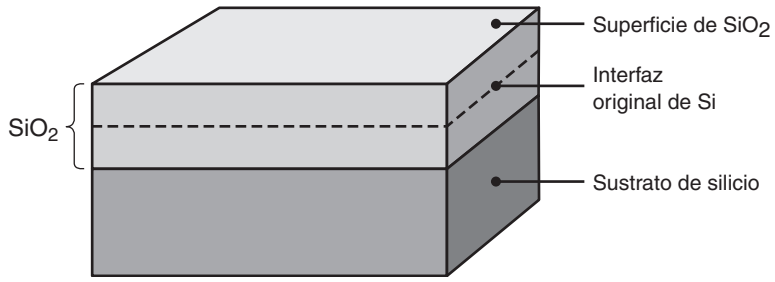


FIGURA 28.8 Crecimiento del dióxido de silicio que muestra el consumo de silicio. *Fuente*: S. M. Sze.

espesor, se consumen alrededor de 440 Å de silicio. Este requerimiento no presenta ningún problema, ya que los sustratos siempre se hacen crecer con suficiente espesor.

Un efecto importante de este consumo de silicio es el reacomodo de los dopantes en el sustrato cerca de la interfaz. Debido a que las distintas impurezas tienen diferentes coeficientes de segregación o movilidad en el dióxido de silicio, algunos dopantes se agotan en la interfaz del óxido, mientras que otros se acumulan. Por esta razón deben ajustarse los parámetros de procesamiento para compensar este efecto.

- Otro método de oxidación utiliza una atmósfera de agua y vapor como agente, de ahí que se le conozca como **oxidación en húmedo**. Este método produce una velocidad de crecimiento muy superior a la de la oxidación en seco, pero adolece de una densidad inferior de óxido y, por lo tanto, de una resistencia dieléctrica menor. La práctica común en la industria consiste en combinar ambos métodos de oxidación, en seco y en húmedo, haciendo crecer óxido en una capa de tres partes: seca-húmeda-seca. Así se combinan las ventajas de mucha mayor velocidad de crecimiento de la oxidación en húmedo y la alta calidad de la oxidación en seco.
- Los dos métodos de oxidación anteriores son útiles fundamentalmente para recubrir con óxido toda la superficie del silicio, pero también puede necesitarse oxidar sólo ciertas partes. Al procedimiento para oxidar sólo determinadas áreas de la superficie se le denomina **oxidación selectiva** y utiliza nitruro de silicio, que inhibe el paso de oxígeno y vapor de agua. Por lo tanto, al cubrir esas áreas con nitruro de silicio, el silicio debajo de éstas permanece sin ser afectado, pero las áreas sin recubrimiento se oxidan.

28.7 Litografía

La *litografía* es el proceso por el cual los patrones geométricos que definen los dispositivos se transfieren a la superficie del sustrato. En la tabla 28.1 se proporciona un resumen de las técnicas litográficas. Existen muchas formas de litografía, pero la más común hoy en día es la *fotolitografía*. La litografía de haz de electrones y la de rayos X son de gran interés por su capacidad para transferir patrones de mayor resolución, que es una característica necesaria para que la miniaturización de los circuitos integrados sea incrementada. Sin embargo, la mayoría de las aplicaciones de circuitos integrados se pueden manufacturar con éxito mediante la fotolitografía. En la figura 28.9 se muestra una comparación de los métodos básicos de litografía.

Fotolitografía. La fotolitografía es la forma más ampliamente utilizada de litografía. Emplea una **retícula** (conocida como **fotomáscara** o **máscara**), que es una placa de vidrio o cuarzo sobre la que se deposita un patrón del chip con una película de cromo. La imagen de la retícula puede ser del mismo tamaño que la de la estructura deseada en el chip, pero con frecuencia es una imagen ampliada (por lo general de 5 a 20× más grande).

TABLA 28.1

Características generales de las técnicas de litografía

Método	Longitud de onda (nm)	Tamaño más fino del rasgo (nm)
Ultravioleta (Fotolitografía)	365	350
UV profundo	248	250
UV extremo	10–20	30–100
Rayos X	0.01–1	20–100
Haz de electrones	—	80

Fuente: P. K. Wright, *21st Century Manufacturing*, Prentice Hall, 2001

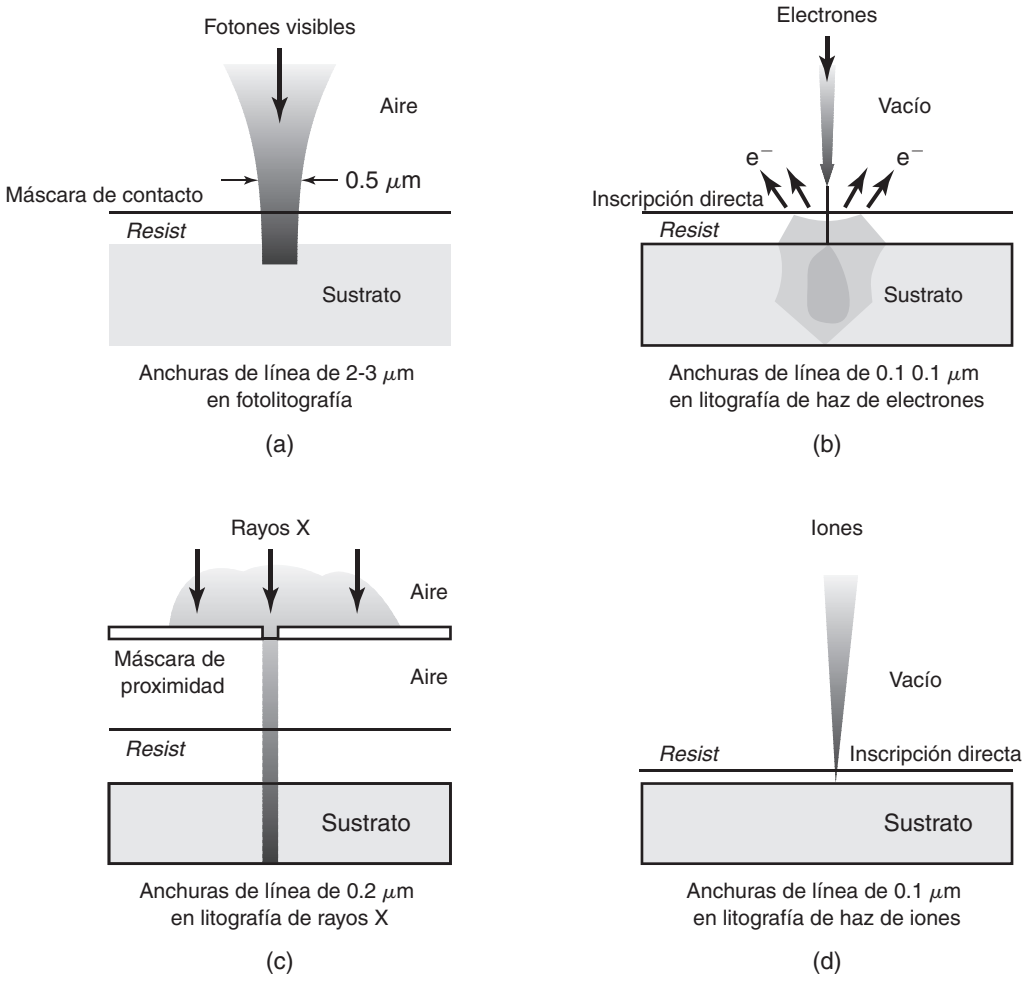


FIGURA 28.9 Comparación de técnicas de litografía.

Después las imágenes ampliadas se enfocan sobre una oblea por medio de un sistema de lentes; a esto se le conoce como *litografía por reducción*.

En la práctica actual, el *proceso litográfico* se aplica a cada circuito microelectrónico hasta 25 veces, utilizando cada vez una retícula diferente para definir las distintas áreas de los dispositivos de trabajo. Comúnmente diseñados a varios miles de veces su tamaño final, los patrones de las retículas se someten a una serie de reducciones antes de ser aplicados de manera permanente a una placa de cuarzo libre de defectos. El diseño asistido por computadora (CAD; ver sección 38.4) ha tenido un efecto importante en el diseño y la generación de retículas.

La limpieza es muy importante en la litografía; en la actualidad, muchos fabricantes utilizan manipuladores robóticos y aparatos especializados en el manejo de obleas para minimizar la contaminación por polvo y suciedad. Una vez concluido el proceso de deposición de películas y después de haber generado los patrones de retículas deseados, la oblea se limpia y recubre con un polímero orgánico conocido como ***fotoresist*** (**material fotográfico, material fotosensible**) (PR, por sus siglas en inglés).

Un fotoresist consta de tres componentes principales:

1. Un polímero que cambia de estructura cuando se expone a la radiación.
2. Un sensibilizador que controla las reacciones en el polímero.
3. Un solvente, necesario para entregar el polímero en forma de líquido.

Las capas del fotoresist de 0.5 a 2.5 μm (20 a 100 μpulg) de espesor se obtienen aplicando el PR al sustrato, haciéndolo girar después a varios miles de rpm durante 30 o 60 segundos para darle una cobertura uniforme (fig. 28.10).

El siguiente paso en la fotolitografía es **precocer o prehornear** la oblea para retirar el solvente del PR y endurecerla. Este paso se efectúa sobre una placa caliente, cuya temperatura se ha elevado a unos 100 °C. El patrón se transfiere a la oblea mediante sistemas de escalonamiento o de escalón y barrido. Con el escalonamiento de obleas (fig. 28.11a) se expone toda la imagen mediante un destello y el patrón de la retícula se enfoca de nuevo en otra sección adyacente de la oblea. Con los sistemas de escalón y barrido (fig. 28.11b), la fuente de luz de exposición se enfoca en una línea, y la retícula y la oblea se mueven de manera simultánea en direcciones opuestas para transferir el patrón.

La oblea debe alinearse con cuidado debajo de la retícula deseada. En este paso crucial, conocido como **registro**, dicha retícula debe alinearse correctamente con la capa

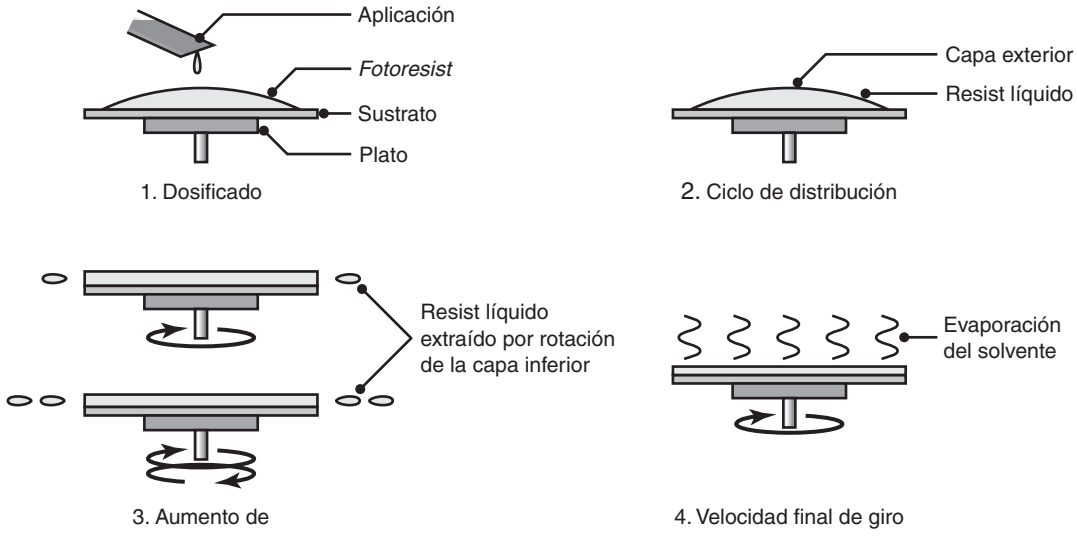


FIGURA 28.10 Rotación de un recubrimiento orgánico en una oblea.

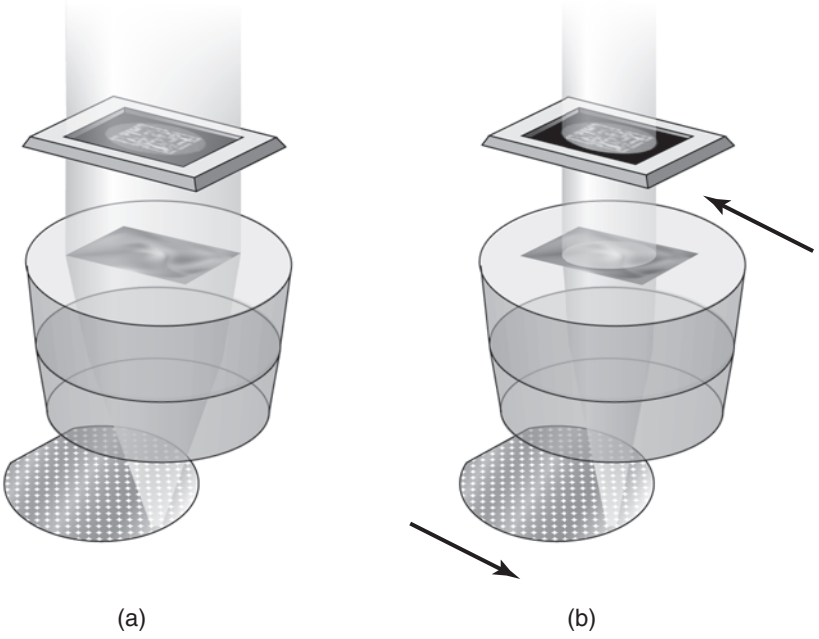


FIGURA 28.11 Esquema de *(a)* técnica de escalonamiento de oblea para transferencia del patrón, y *(b)* técnica de escalón y barrido.

anterior en la oblea; una vez que está alineada, se somete a radiación UV. Al desarrollar y remover el PR expuesto, aparece un duplicado del patrón de la retícula en la capa del PR.

Como se ve en la figura 28.12, la retícula puede ser una imagen negativa o positiva del patrón deseado. Una retícula positiva utiliza la radiación UV para romper las cadenas en la película orgánica, a fin de que el revelador retire de manera preferente estas

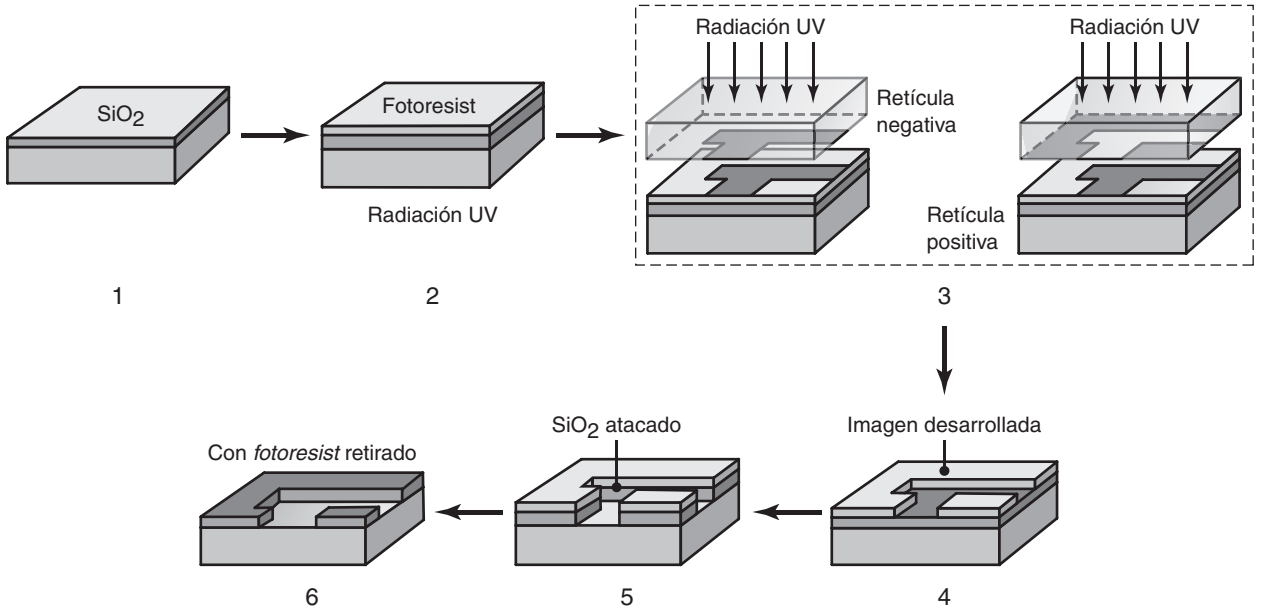


FIGURA 28.12 Transferencia de patrones por fotolitografía. Obsérvese que la máscara en el paso 3 puede ser una imagen positiva o negativa del patrón.

películas. El enmascarado positivo es más común que el negativo, porque con este último el fotoresist puede crecer y distorsionarse, lo que lo hace inapropiado para geometrías pequeñas. Los materiales más recientes de fotoresists negativos no sufren este problema.

Después de la secuencia de exposición y desarrollo (revelado), la **cocción posterior** de la oblea elimina el solvente y la tenacidad y mejora la adhesión del resist remanente. Además, puede utilizarse un tratamiento profundo de UV (sometiendo a cocción la oblea a entre 150 °C y 200 °C en luz ultravioleta) para fortalecer más el resist contra implantes de alta energía y ataques en seco. Después se ataca (sección 28.8) o implanta (sección 28.9) la película subyacente no cubierta por el PR.

Luego de la litografía, debe retirarse el PR desarrollado mediante un proceso conocido como **disolución**. En la *disolución en húmedo*, el fotoresist se disuelve por medio de soluciones como acetona u otros ácidos fuertes. La *disolución en seco* comprende la exposición del PR a un plasma de oxígeno, que también se llama **incineración**. La disolución en seco se ha vuelto más popular, porque *(a)* no implica la disposición de productos químicos peligrosos consumidos, y *(b)* es más fácil de controlar y puede producir superficies excepcionales. Las soluciones de disolución en húmedo tienden a perder fuerza con el uso.

Uno de los aspectos importantes en la litografía es la **anchura de línea**, que se refiere a la anchura del detalle más pequeño imprimible en la superficie de silicio. Al aumentar las densidades de los circuitos con los años, los tamaños y rasgos de los dispositivos se han vuelto cada vez menores. En la actualidad, las anchuras mínimas de líneas comercialmente posibles están entre 90 y 150 nm con la realización de una considerable investigación en relación con las anchuras de línea de 70 nm.

Debido a que la resolución de los patrones y la miniaturización de los dispositivos se han visto limitadas con la longitud de onda de la fuente de radiación utilizada, ha surgido la necesidad de cambiar a longitudes de onda más cortas que las de la gama ultravioleta, como son las ondas de longitud UV "profundas", las ondas de longitud UV "extremas", los haces de electrones y los rayos X. En estas tecnologías, el fotoresist se reemplaza con un resist similar sensible a una gama específica de longitudes de onda más cortas.

Litografía por ultravioleta extrema. La difracción de la luz limita la resolución del patrón en la fotolitografía. Uno de los medios para reducir los efectos de la difracción consiste en utilizar longitudes de onda incluso más cortas. La *litografía por ultravioleta extrema* (EUV, por sus siglas en inglés) usa luz con una longitud de onda de 13 nm para obtener rasgos de 30 a 100 nm de tamaño. Las ondas se concentran por medio de espejos de molibdeno y silicio altamente reflectores (en lugar de lentes de vidrio, que absorben la luz EUV) a través del enmascaramiento hasta la superficie de la oblea.

Litografía por rayos X. Aunque la fotolitografía es la técnica de litografía más utilizada, tiene limitaciones fundamentales de resolución asociadas con la difracción de la luz.

La *litografía por rayos X* es superior a la fotolitografía debido a la longitud de onda más corta de la radiación y la mayor profundidad del foco. Esta característica permite resolver patrones mucho más finos y es mucho menos susceptible al polvo que la fotolitografía. Además, la relación de aspecto (definida como la profundidad a la dimensión lateral) puede ser de más de 100 con la litografía por rayos X, pero se limita a alrededor de 10 con la fotolitografía. Sin embargo, para lograr este beneficio, se requiere radiación sincrotrónica, que es costosa y sólo está disponible en algunos laboratorios de investigación.

Dada la gran inversión de capital requerida para una instalación de manufactura, la industria ha preferido refinar y mejorar la litografía óptica en lugar de invertir capital nuevo en la producción basada en los rayos X. En la actualidad, la litografía por rayos X no está tan difundida; sin embargo, el proceso LIGA (ver sección 29.3) explota totalmente los beneficios de la misma.

Litografía por haz de electrones y haz de iones. Al igual que la litografía por rayos X, la litografía *por haz de electrones (e-beam)* y la litografía *de haz de iones (i-beam)* son superiores a la fotolitografía en términos de las resoluciones obtenibles. Estos dos

métodos comprenden alta densidad de corriente en haces delgados de electrones o iones *(pencil sources)*, que barren un patrón de un pixel a la vez sobre la oblea. El enmascaramiento se efectúa controlando la transferencia punto por punto del patrón almacenado; por lo tanto, el enmascaramiento se realiza mediante *software*. Estas técnicas tienen las ventajas de un control preciso de la exposición sobre pequeñas áreas de la oblea, gran profundidad de foco y bajas densidades de defectos. Las resoluciones se limitan a alrededor de 10 nm debido la dispersión de los electrones, aunque se ha informado de resoluciones de 2 nm para algunos materiales.

Al aumentar la resolución, el tiempo de barrido se incrementa de manera significativa, porque se requieren haces más enfocados. La desventaja principal de estas técnicas es que los haces de electrones y de iones tienen que mantenerse en vacío, lo que aumenta de manera importante la complejidad del equipo y el costo de producción. Además, el tiempo de barrido de una oblea es mucho más lento que por otros métodos litográficos.

SCALPEL. En la figura 28.13 se muestra el proceso SCALPEL (Litografía por haz de Electrones Dispersados de Proyección con Limitación Angular, por sus siglas en inglés), en el que se produce un enmascaramiento de una membrana de cerca de 0.1 μm de espesor de nitruro de silicio y se modela con un recubrimiento de tungsteno de 50 nm de espesor. Electrones de alta energía pasan a través del nitruro de silicio y del tungsteno, pero éste los dispersa ampliamente, en tanto que el nitruro de silicio produce muy poca dispersión. Una abertura bloquea los electrones dispersados, lo que ocasiona una imagen de alta calidad en la oblea.

La limitación de este proceso son los enmascaramientos tan pequeños que se encuentran en uso en la actualidad. Sin embargo, este proceso tiene alto potencial. Quizá su ventaja más representativa sea que la retícula no necesita absorber la energía. Por el contrario, se bloquea mediante la abertura, que no es tan frágil ni costosa como la retícula.

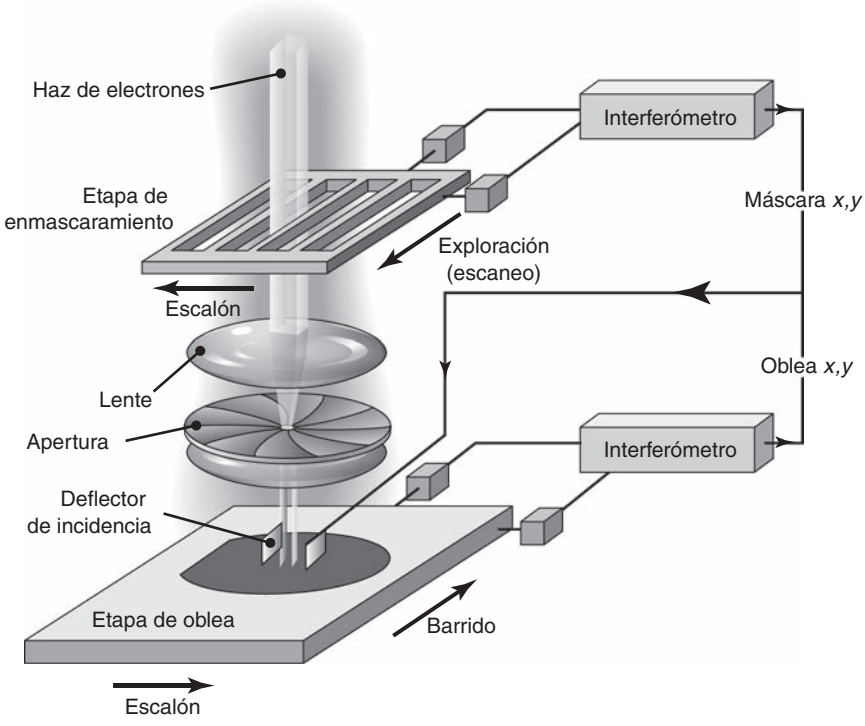


FIGURA 28.13 Esquema del proceso SCALPEL.

EJEMPLO 28.1 Ley de Moore

Gordon Moore, uno de los inventores del IC y anterior presidente de Intel Corporation, hizo notar en 1965 que el área superficial de un transistor simple se reduce 50% cada 12 meses. En 1975 modificó este cálculo a cada dos años, y en la actualidad, el estimado resultante se conoce como la ley de Moore; esta ley ha sido notablemente precisa. En la figura 28.14 se muestra el avance histórico del tamaño característico en los bits de *memoria dinámica de sólo lectura* (DRAM-*dynamic read only memory*), así como los futuros desarrollos proyectados. Vislumbrando el futuro, existen ciertos impedimentos básicos para continuar confiando en la ley de Moore; algunos de los más importantes son los siguientes:

- Para producir rasgos cada vez más pequeños en el transistor se requiere obtener tolerancias de manufactura todavía más estrictas. Por ejemplo, las anchuras de línea de 180 nm necesitan tolerancias dimensionales de ± 14 nm, en tanto que las anchuras de línea de 50 nm requieren ± 4 nm. Esto es particularmente problemático para las líneas de conexión metálicas dentro del transistor.
- Los transistores más pequeños sólo pueden operar si se aumenta la concentración de dopante. Sin embargo, arriba de cierto límite, los átomos de dopado se agrupan. El resultado es que el silicio tipos *p* y *n* no puede producirse de manera confiable a pequeñas escalas de longitud.
- La energía de la conmutación por compuertas de los transistores no se ha reducido a la misma velocidad que su tamaño; el resultado es el aumento del consumo de potencia en los circuitos integrados. Esto tiene una seria consecuencia por la dificultad para disipar el calor producido.
- A menores escalas de longitud, los microprocesadores requieren voltajes más pequeños para operar en forma apropiada. Sin embargo, puesto que el consumo de potencia sigue siendo relativamente alto, se necesitan corrientes muy elevadas entre los dispositivos de conversión de potencia y las unidades procesadoras centrales de los microprocesadores modernos. Estas grandes corrientes producen calentamiento resistivo, complicando así los problemas de extracción de calor.

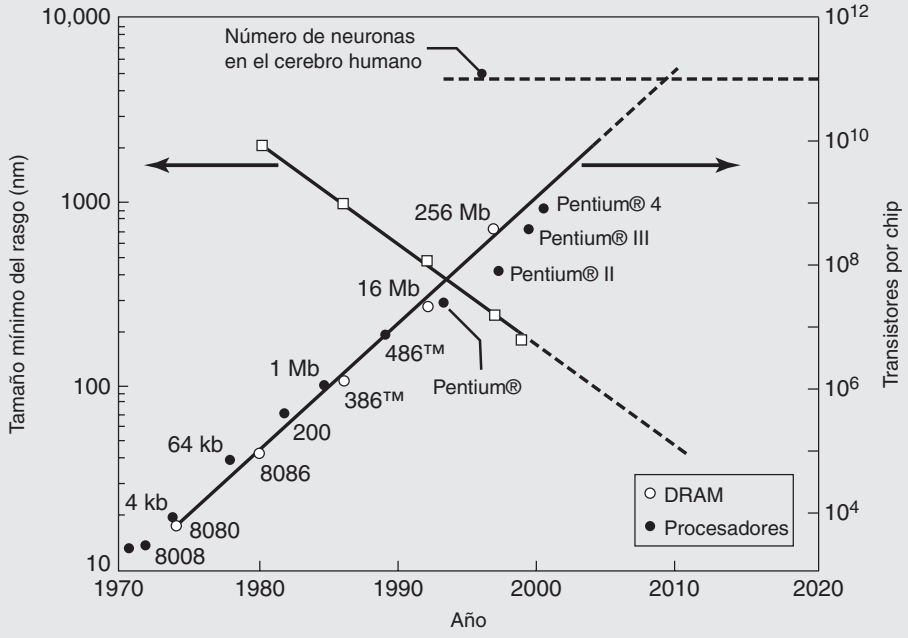


FIGURA 28.14 Ilustración de la ley de Moore. *Fuente*: M. Madou.

- Los efectos cuánticos desempeñan un gran papel a pequeñas escalas de longitud y la estabilidad del sistema se vuelve un problema.

Se están realizando más investigaciones para solucionar estas limitaciones. La ley de Moore tenía como objetivo predecir el futuro inmediato de la industria de los semiconductores y se puso en marcha cuando la fotolitografía era la única opción. Durante las cuatro décadas transcurridas desde que se expuso por primera vez, los investigadores han identificado con frecuencia problemas insuperables que, en su momento, han sido resueltos.

28.8 Ataque (grabado)

El *ataque o grabado* es el proceso por el cual se retiran películas completas o secciones específicas de las mismas, y desempeña un papel importante en la secuencia de fabricación. Uno de los criterios fundamentales en este proceso es la **selectividad**, que se refiere a la capacidad de atacar un material sin atacar otro. En las tablas 28.2 y 28.3 se resumen los procesos de ataque y atacantes.

En la tecnología del silicio, un proceso de ataque o grabado debe atacar la capa de dióxido de silicio de manera eficaz y con una mínima remoción del silicio subyacente o del material del resist. Además, el polisilicio y los metales tienen que atacarse en líneas de alta resolución con perfiles de pared verticales y también con una remoción mínima de la película de aislamiento subyacente o fotorresistente *(fotoresist)*. Las velocidades comunes de ataque van de cientos a varios miles de angstroms por minuto y las selectividades (definidas como la relación de las velocidades de ataque de las dos películas) van de 1:1 hasta 100:1.

28.8.1 Ataque en húmedo (grabado húmedo)

El *ataque en húmedo* comprende la inmersión de las obleas en una solución líquida, por lo general ácida. Un rasgo principal de la mayoría de las operaciones de ataque en húmedo es que son *isotrópicas* (es decir, atacan en todas direcciones de la pieza de trabajo a la misma velocidad). Esto produce socavaciones debajo del material del enmascaramiento (por ejemplo, ver fig. 28.15a) y limita la resolución de los rasgos geométricos en el sustrato.
Un ataque eficaz requiere las siguientes condiciones:

1. Transporte del atacante a la superficie.
2. Una reacción química.

TABLA 28.2

Características generales de las operaciones de ataque (grabado) de silicio

	Temperatura (°C)	Velocidad de ataque (grabado) (μm/min)	Selectividad {111}/{100}	Velocidad de ataque (grabado) de Nitruro (nm/min)	Velocidad de (nm/min) ataque (grabado) de SiO_2 (nm/min)	Paro de ataque (grabado) p^{++}
Ataque (grabado) en húmedo						
$HF:HNO_3:CH_3COOH$	25	1–20	—	Baja	10–30	No
KOH	70–90	0.5–2	100:1	<1	10	Sí
Etileno-diamina Pirocatecol (EDP)	115	0.75	35:1	0.1	0.2	Sí
$N(CH_3)_4OH$ (TMAH)	90	0.5–1.5	50:1	<0.1	<0.1	Sí
Ataque (grabado) en seco (plasma)						
SF_6	0–100	0.1–0.5	—	200	10	No
SF_6/C_4F_8 (DRIE)	20–80	1–3	—	200	10	No

Fuente: Adaptada de N. Maluf, *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering*, Artech House, 2000.

TABLA 28.3

Comparación de velocidades de ataque

Atacante	Material que se usa como blanco	Velocidad de ataque (grabado) (nm/min)							
		Polisilicio n^+	Polisilicio, sin dopar	Dióxido de silicio	Nitruro de silicio	Vidrio de fosfo-silicato, recocido	Aluminio	Titanio	*Fotoresist* (OCG-820PR)
Atacantes en húmedo									
HF concentrado (49%)	Óxidos de silicio	0	—	2300	14	3600	4.2	>1000	0
25:1 HF : H_2O	Óxidos de silicio	0	0	9.7	0.6	150	—	—	0
5:1 BHF[b]	Óxidos de silicio	9	2	100	0.9	440	140	>1000	0
Atacante de silicio (126 HNO_3 : 60 H_2O : 5 NH_4F)	Silicio	310	100	9	0.2	170	400	300	0
Atacante de aluminio (16 H_3PO_4 : 1 HNO_3 : 1 HAc : 2 H_2O)	Aluminio	<1	<1	0	0	<1	660	0	0
Atacante de titanio (20 H_2O : 1 H_2O_2 : 1 HF)	Titanio	1.2	—	12	0.8	210	>10	880	0
Piraña (50 H_2SO_4 : 1 H_2O_2)	Limpieza de metales y orgánicos	0	0	0	0	0	180	240	>10
Acetona (CH_3COOH)	*Fotoresist*	0	0	0	0	0	0	0	>4000
Atacantes en seco									
CF_4 + CHF_3 + He, 450W	Óxidos de silicio	190	210	470	180	620	—	>1000	220
SF_6 + He, 100W	Nitruros de silicio	73	67	31	82	61	—	>1000	69
SF_6 ,12.5W	Nitruros delgados de silicio	170	280	110	280	140	—	>1000	310
O_2, 400W	*Fotoresist* de incineración	0	0	0	0	0	0	0	340

Notas:

[a] Los resultados son de soluciones frescas a temperatura ambiente a menos que se indique. Las velocidades reales de ataque (grabado) varían con la temperatura y uso previo de la solución, área de exposición de la película; otros materiales presentes, impurezas de la película y microestructura.

[b] Ácido fluorhídrico reducido, 33% de NH4F y 8.3% HF en peso.

Fuente: K. Williams y R. Muller, *J. Microelectromechanical Systems*, Vol. 5, 1996, páginas 256-269.

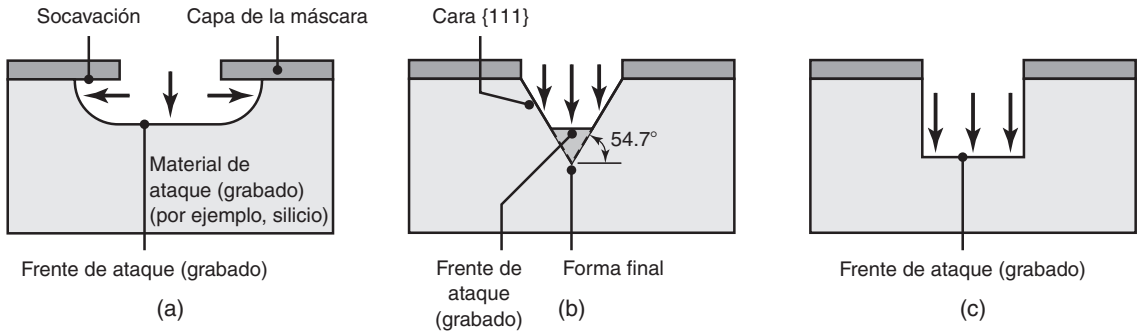


FIGURA 28.15 Direccionalidad del ataque (grabado). *(a)* Ataque (grabado) isotrópico: el ataque procede vertical y horizontalmente a casi la misma velocidad, con una socavación significativa de la máscara. *(b)* Ataque (grabado) dependiente de la orientación (ODE, por sus siglas en inglés): el ataque (grabado) se efectúa de manera vertical, terminando en los planos {111} del cristal con poca socavación de la máscara. *(c)* Ataque (grabado) vertical: el ataque (grabado) se efectúa verticalmente con poca socavación de la máscara. *Fuente*: Cortesía de K. R. Williams, Agilent Laboratories.

3. Transporte de los productos de la reacción lejos de la superficie.
4. Capacidad de detener el proceso de ataque con rapidez para obtener una mejor transferencia de patrones (**paro del ataque**), por lo general utilizando la capa subyacente con alta selectividad.

Si la primera o tercera condición limita la velocidad del proceso, la agitación o mezcla de la solución puede aumentar las velocidades de ataque. Si la segunda condición limita la velocidad del proceso, la velocidad del ataque depende en gran medida de la temperatura, el material de ataque y la composición de la solución. Por ende, un ataque confiable requiere tanto un buen control de temperatura como una buena capacidad repetible de agitación.

Atacantes isotrópicos. Se utilizan ampliamente para:

- Remoción de superficies dañadas.
- Redondeo de esquinas puntiagudas atacadas para evitar concentraciones de esfuerzos.
- Reducción de la rugosidad después del ataque anisotrópico.
- Creación de estructuras en secciones monocristalinas.
- Evaluación de defectos.

La fabricación de dispositivos microelectrónicos y sistemas microelectromecánicos, que se describe en el capítulo 29, requiere el maquinado preciso de estructuras fabricadas mediante el enmascaramiento. Sin embargo, éste es un desafío con atacantes isotrópicos. Los ácidos fuertes *(a)* atacan de manera agresiva a una velocidad hasta de 50 μm/min con un atacante de 66% de HNO_3 y 34% de HF, aunque las velocidades de ataque de 0.1 a 1 μm/s son más comunes, y *(b)* producen cavidades redondas. Además, la rapidez de ataque es muy sensible a la agitación y, por lo tanto, resulta difícil controlar los rasgos o características laterales y verticales.

El tamaño de los rasgos en un circuito integrado determina su rendimiento; por esta razón existe una fuerte tendencia a producir estructuras bien definidas, extremadamente pequeñas. Rasgos tan pequeños no pueden obtenerse mediante un ataque isotrópico, debido a la pobre definición producida por la socavación de los enmascaramientos.

Ataque anisotrópico (grabado anisotrópico). Éste ocurre cuando el ataque es extremadamente dependiente de las variaciones de composición o estructurales en el material. Existen dos clases básicas de ataque anisotrópico: *ataque dependiente de la orientación* (ODE, por sus siglas en inglés) y *ataque vertical*, aunque la mayor parte de este último se realiza con plasmas secos y se trata más adelante. Es común que el ataque dependiente de la orientación ocurra en un monocristal cuando el ataque sucede a diferentes velocidades en distintas direcciones, como se muestra en la figura 28.15b.

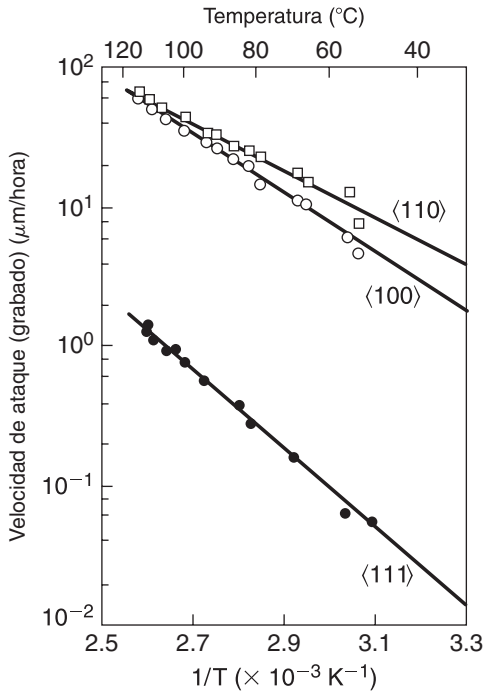


FIGURA 28.16 Velocidades de ataque (grabado) del silicio en diferentes orientaciones cristalográficas utilizando etilendiamina/pirocatecol en agua como solución. *Fuente*: Seidel, H. y otros, Journal Eletrochemical Society, 1990, páginas 3612-3626.

Cuando se realizan adecuadamente, estos atacantes producen formas geométricas con paredes definidas por los planos cristalográficos que resisten los atacantes. Por ejemplo, la figura 28.16 muestra la velocidad de ataque vertical del silicio en función de la temperatura. Como se puede ver, el ataque es de más de un orden de magnitud, más lento en la dirección [111] del cristal que en otras, por lo que se pueden obtener paredes bien definidas a lo largo de la dirección [111] del cristal.

La **relación de anisotropía** para el ataque se define mediante,

$$AR = \frac{E_1}{E_2} \tag{28.1}$$

donde E es la velocidad de ataque en una dirección cristalográfica de interés, y los subíndices se refieren a dos direcciones o materiales de interés. La **selectividad** se define de manera similar, pero se refiere a las velocidades de ataque entre los materiales de interés. La relación de anisotropía es unitaria para los atacantes isotrópicos y puede ser tan alta como 400/200/1 para el silicio (110)/(100)/(111). Los planos <111> siempre atacan al más bajo, pero los planos <100> y <110> pueden controlarse por medio de la química del atacante.

El enmascaramiento también es un problema para el ataque anisotrópico, aunque por razones diferentes de las del ataque isotrópico. El ataque anisotrópico es lento (por lo general, 3 μm/min), por lo que a través de una oblea puede tardar varias horas. El óxido de silicio puede ser atacado con demasiada rapidez para utilizarse como enmascaramiento, por lo que puede requerirse un enmascaramiento de nitruro de silicio de alta densidad.

Con frecuencia es importante detener súbitamente el proceso de ataque, lo que se conoce como *paro del ataque*. Es común que éste sea el caso cuando se van a manufacturar membranas delgadas o se necesiten características de control del espesor muy preciso. En términos conceptuales, esto se puede lograr extrayendo la oblea de la solución de ataque. Sin embargo, el ataque depende en gran medida de la capacidad para enviar ata-

cantes frescos a las ubicaciones convenientes. Como la circulación varía a través de la superficie de una oblea, esta estrategia de detener el proceso de ataque puede provocar grandes variaciones en la profundidad atacada.

La técnica más común para obtener tamaños uniformes de rasgos a través de una oblea es utilizando un *paro del ataque de boro*, en el que se difunde o implanta una capa de boro en el silicio. Ejemplos de paros del ataque comunes son la colocación de una capa dopada de boro debajo del silicio o la colocación de dióxido de silicio (SiO_2) debajo del nitruro de silicio (Si_3N_4). Debido a que los atacantes anisotrópicos no atacan el silicio dopado de boro con tanta agresividad como lo hacen con el silicio sin dopar, pueden crearse rasgos o membranas superficiales por **retroataque.** En la figura 28.17 se muestra un ejemplo de la técnica de paro del ataque de boro.

Se han desarrollado diversas formulaciones de atacantes, incluyendo ácido fluorhídrico, ácido fosfórico, mezclas de ácido nítrico y ácido fluorhídrico, hidroclorito de potasio, y mezclas de ácido fosfórico, ácido acético y agua. La limpieza de las obleas se realiza por medio de una solución que consta de ácido sulfúrico y peróxido (solución Piranha, nombre comercial). Con estas soluciones puede retirarse el fotoresist, aunque es más común el uso de la acetona para este propósito.

28.8.2 Ataque en seco (grabado en seco)

Los circuitos integrados modernos se atacan de manera exclusiva con *ataque o grabado en seco*, que comprende el uso de reactivos químicos en un sistema de baja presión. En contraste con el proceso en húmedo, el ataque en seco puede tener un alto grado de direccionalidad, que produce perfiles de ataque altamente anisotrópico (fig. 28.15c). Además, el proceso de ataque en seco requiere sólo pequeñas cantidades de los gases reactivos, en tanto que las soluciones utilizadas en el proceso de ataque o grabado en húmedo tienen que reponerse en forma periódica. En general, el ataque en seco comprende un plasma o descarga en áreas de elevados campos magnéticos y eléctricos; cualquier gas que esté presente se disocia para formar iones, fotones, electrones o moléculas altamente reactivas.

Existen diversas técnicas de ataque en seco especializadas, como se describe a continuación.

Ataque por chisporroteo. El *ataque por chisporroteo* (*grabado por pulverización*) retira material bombardeándolo con iones de gas noble, por lo general Ar^+. El gas se ioniza en presencia de un cátodo y un ánodo (fig. 28.18). Si el objetivo es una oblea de silicio, la transferencia del momento asociada con el bombardeo de átomos provoca el rompimiento de la unión y que el material sea expulsado o que chisporrotee. Si el sustrato es un chip de silicio, entonces el material en el objetivo se deposita sobre el silicio des-

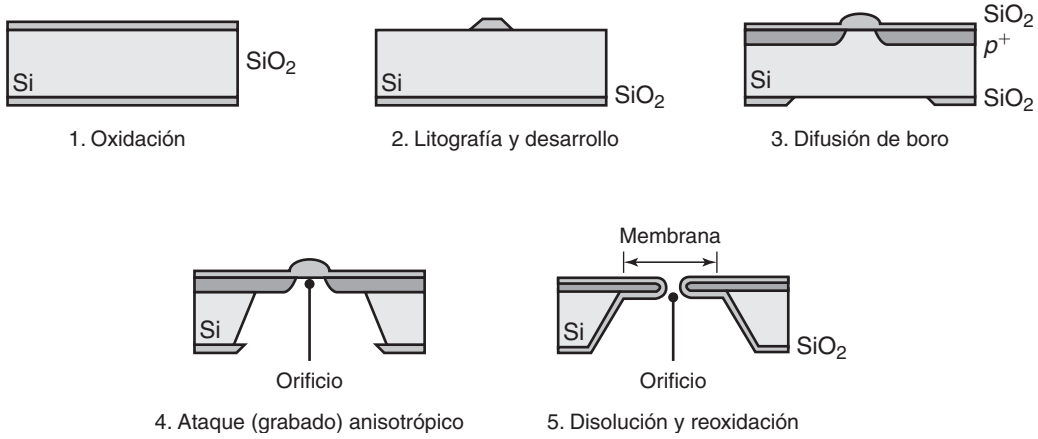


FIGURA 28.17 Aplicación de un paro de ataque (grabado) de boro y retroataque para formar una membrana y orificio. *Fuente*: Brodie, I. y Murray, J. J., *The Physics of Microfabrication*, Plenum Press, 1982.

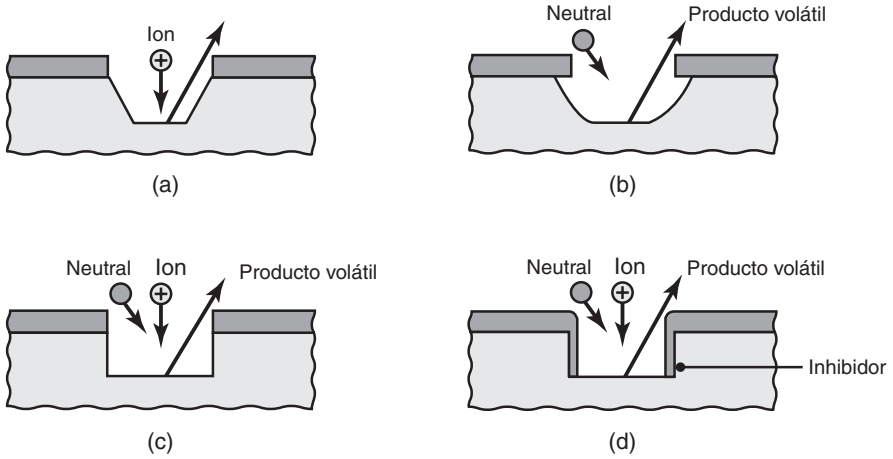


FIGURA 28.18 Perfiles de maquinado asociados con diferentes técnicas de ataque (grabado) en seco: *(a)* chisporroteo; *(b)* químico; *(c)* energético reforzado con iones. *(d)* Inhibidor de refuerzo de iones. *Fuente*: M. Madou.

pués de hacerlo chisporrotear mediante el gas ionizado. Algunas de las preocupaciones en el ataque por chisporroteo son las siguientes:

- El material expulsado puede volver a depositarse en el blanco, en especial con grandes relaciones de aspecto.
- El ataque por chisporroteo no tiene selectividad de material, porque la mayoría de los materiales se chisporrotean casi a la misma velocidad; por lo tanto, el enmascaramiento es difícil.
- El ataque por chisporroteo es lento, con velocidades de ataque limitadas a decenas de nm/min.
- El chisporroteo puede provocar daños o erosión excesiva del material.
- Es difícil retirar el *fotoresist*.

Ataque o grabado de plasma reactivo. También conocido como *ataque o grabado químico en seco*, el *ataque de plasma reactivo* comprende iones de cloro y flúor (generados por la excitación de RF) y otras especies moleculares que se difunden y reaccionan químicamente con el sustrato, formando un compuesto volátil que se retira por medio del sistema de vacío. En la figura 28.19 se muestra el mecanismo del ataque de plasma reactivo. En éste:

1: Se produce una especie reactiva (como CF_4), que se disocia al impacto con electrones energéticos para producir átomos de flúor.

2: Las especies reactivas se difunden hacia la superficie.

3: Se adsorbe.

4: La especie reactiva reacciona químicamente para formar un compuesto volátil.

5: El reactivo se desorbe de la superficie.

6: Se difunde en el gas volumétrico, del que se retira por medio del sistema de vacío.

Algunos reactivos se polimerizan en la superficie y requieren remoción adicional, ya sea con oxígeno en el reactor de plasma o con una operación externa de incineración. La carga eléctrica de las especies reactivas no es suficientemente grande para provocar daño mediante el impacto sobre la superficie, por lo que no ocurre chisporroteo. En consecuencia, el ataque es isotrópico y se presenta socavación del enmascaramiento (fig. 28.15a). En la tabla 28.2 se relacionan algunos de los atacantes en seco más comunes, sus materiales objetivo y las velocidades comunes de ataque.

Ataque o grabado físico-químico. Los procesos como el *ataque o grabado reactivo de haz de iones* (RIBE, por sus siglas en inglés) y el *ataque de haz de iones químicamente asistido* (CAIBE, por sus siglas en inglés) combinan las ventajas de los ataques físico y químico. Estos procesos utilizan una especie químicamente reactiva para efectuar

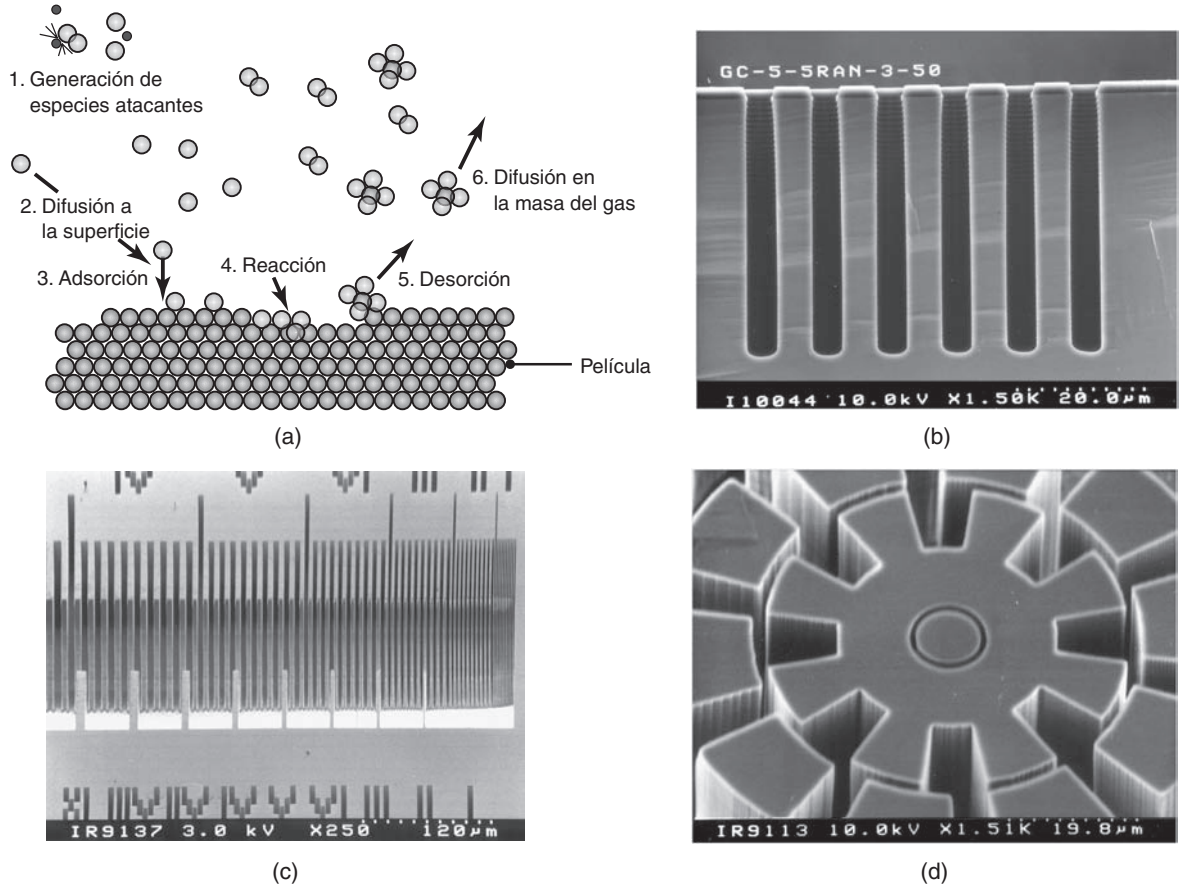


FIGURA 28.19 *(a)* Esquema de ataque (grabado) de plasma reactivo. *(b)* Ejemplo de una zanja con ataque profundo de iones reactivos. Obsérvese las socavaciones periódicas u ondas. *(c)* Paredes laterales casi verticales producidas mediante DRIE con un proceso de ataque (grabado) anisotrópico. *(d)* Ejemplo de ataque criogénico en seco que muestra una estructura de 145 μm de profundidad atacada en silicio mediante una capa de enmascaramiento de óxido de 2.0 μm de espesor. La temperatura del sustrato era de -140 °C durante el ataque (grabado). *Fuente*: *(a)* M. Madou. *(b)* a *(d)* R. Kassing e I. W. Rangelow, University of Kassel, Alemania.

la remoción de material, pero son asistidos físicamente por el impacto de los iones en la superficie. En el RIBE, también conocido como *ataque profundo de iones reactivos* (DRIE, por sus siglas en inglés), se pueden producir zanjas verticales de cientos de nanómetros de profundidad que interrumpen en forma periódica el proceso de ataque o grabado y depositan una capa de polímero, como se muestra en la figura 28.19d.

En el CAIBE, el bombardeo de iones puede ayudar al ataque químico en seco de la siguiente manera:

- Haciendo que la superficie sea más reactiva.
- Limpiando la superficie de los productos de reacción y permitiendo que las especies químicamente reactivas tengan acceso a las áreas limpias.
- Proporcionando la energía para activar las reacciones químicas superficiales; sin embargo, las especies neutrales efectúan la mayor parte del ataque.

El ataque físico-químico es muy útil porque el bombardeo de iones es direccional, de manera que el ataque resulta anisotrópico. Además, la energía del bombardeo de iones es baja y no contribuye mucho a la remoción de enmascaramiento. Esto permite generar paredes casi verticales con relaciones muy grandes de aspecto. Ya que el bombardeo de iones no retira material en forma directa, pueden utilizarse enmascaramientos.

Ataque o grabado criogénico en seco. Éste es un método utilizado para obtener rasgos muy profundos con paredes verticales. La pieza de trabajo se baja a temperaturas criogénicas y después se efectúa el proceso de ataque de haz de iones asistido químicamente. Las bajas temperaturas aseguran que no exista energía suficiente para que ocurra una reacción química superficial, a menos que el bombardeo de iones sea normal para la superficie. Los impactos oblicuos (como ocurre en las paredes laterales en hendiduras profundas) no pueden activar las reacciones químicas.

Debido a que el ataque o grabado en seco no es selectivo, los paros del ataque no se pueden aplicar en forma directa. Al retirar la película que es el blanco, deben terminarse las reacciones del ataque en seco. Es frecuente utilizar la espectroscopía de emisiones ópticas para determinar el "punto final" de una reacción. Pueden usarse filtros a fin de capturar la longitud de onda de la luz emitida durante una reacción en particular. En el punto del ataque, se detecta un cambio notable en la intensidad de la luz.

EJEMPLO 28.2 Comparación de los ataques o grabados en húmedo y en seco

Considérese el caso en que una oblea <100> tiene un enmascaramiento de óxido sobre ella para producir orificios u hoyos cuadrados o rectangulares. Los lados del cuadrado se orientan con precisión dentro de la dirección <110> (ver fig. 28.5) de la superficie de la oblea, como se muestra en la figura 28.20.

Se efectúa un ataque isotrópico en la cavidad, como se muestra en la figura 28.20a. Debido a que el ataque (grabado) ocurre a velocidades constantes en todas las direcciones, se realiza una cavidad redonda que socava el enmascaramiento. Un atacante dependiente de la orientación produce la cavidad que se muestra en la figura 28.20b. Como el ataque es mucho más rápido en las direcciones <100> y <110> que en la dirección <111>, se generan paredes laterales definidas por el plano <111>. En el caso del silicio, estas paredes laterales están a un ángulo de 54.74° de la superficie.

En la figura 28.20c se muestra el efecto de un enmascaramiento más grande o tiempo de ataque más corto. La fosa resultante está definida por paredes laterales <111> y por un fondo en la dirección <100> paralelo a la superficie. En la figura 28.20d se presenta un enmascaramiento rectangular y la fosa resultante. En la figura 28.20e se ilustra el ataque profundo de iones reactivos. Obsérvese que una capa de polímero se deposita periódicamente en las paredes laterales del orificio para permitir cavidades profundas, pero son inevitables las ondas (exageradas en gran medida en la ilustración). En la figura 28.20f se muestra un orificio producido por ataque de iones químicamente reactivos.

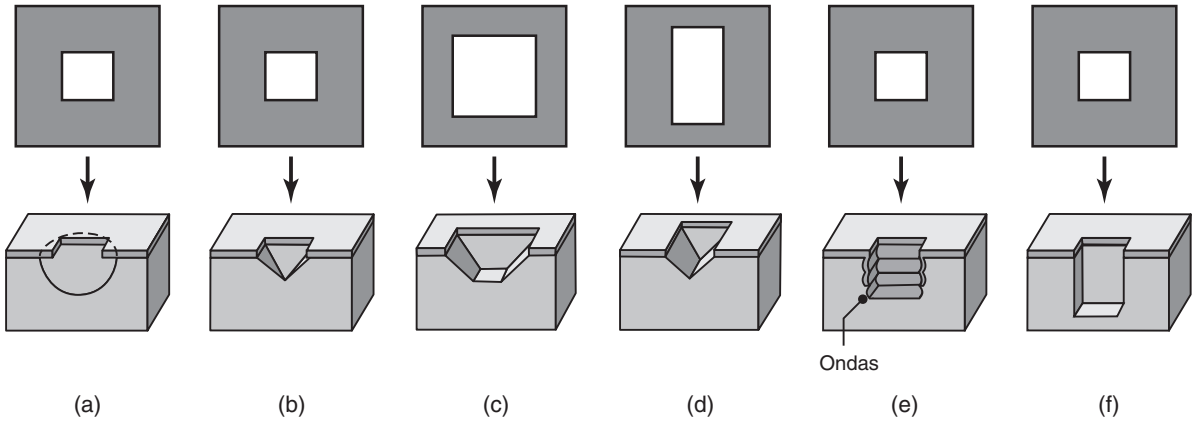


FIGURA 28.20 Diversos orificios generados por una máscara cuadrada en *(a)* ataque (grabado) (en húmedo) isotrópico; *(b)* ataque (grabado) dependiente de la orientación (ODE); *(c)* ODE con un orificio más grande; *(d)* ODE de un orificio rectangular; *(e)* ataque (grabado) profundo de iones reactivos, y *(f)* ataque (grabado) vertical. *Fuente*: M. Madou.

28.9 Difusión e implantación de iones

Cabe recordar que la operación eléctrica de los dispositivos microelectrónicos depende de regiones que tienen diferentes tipos y concentraciones de dopado. El carácter eléctrico de estas regiones se altera mediante la introducción de dopantes en el sustrato, que se logra por los *procesos de difusión* e *implantación de iones*. Este paso en la secuencia de fabricación se repite varias veces, ya que tienen que definirse diversas regiones de dispositivos microelectrónicos.

En el proceso de *difusión*, el movimiento de los átomos es resultado de la excitación térmica. Los dopantes pueden introducirse a la superficie del sustrato en forma de película depositada, o el sustrato puede colocarse en un contenedor de vapor que tenga la fuente del dopante. El proceso ocurre a temperaturas elevadas, por lo general de 800 °C a 1200 °C (1500 °F a 2200 °F). El movimiento del dopante en el interior del sustrato es estrictamente una función de la temperatura, el tiempo, el coeficiente de difusión (o difusividad) de las especies del dopante, así como del tipo y la calidad del material del sustrato.

Debido a la naturaleza de la difusión, la concentración del dopante es muy alta en la superficie del sustrato y cae abruptamente al alejarse de ella. Para obtener una concentración más uniforme en el interior del sustrato, la oblea se calienta a fin de introducir los dopantes mediante un proceso conocido como **difusión hacia dentro (recocido de difusión).** La difusión (deseable o no) siempre ocurre a altas temperaturas; este hecho suele tomarse en cuenta durante los pasos siguientes del procesamiento. Aunque el proceso de difusión es, hasta cierto punto económico, resulta altamente isotrópico.

La *implantación de iones* es un proceso mucho más extenso y requiere equipo especializado (fig. 28.21; ver también sección 34.7). La implantación se logra acelerando los iones a través de un campo de alto voltaje hasta de un millón de electrón-voltios y eligiendo después el dopante apropiado por medio de un separador de masa. De manera similar a los tubos de rayos catódicos, el haz barre la oblea mediante juegos de placas de deflexión, asegurando así la cobertura uniforme del sustrato. Todo el sistema de implantación debe operarse en vacío.

El impacto de alta velocidad de los iones en la superficie del silicio daña la estructura de la red y reduce la movilidad de los electrones. Esta condición es inconveniente, pero el daño se puede reparar con un paso de recocido, que consiste en calentar el sustrato a temperaturas relativamente bajas, por lo general de 400 °C a 800 °C (750 °F a 1500 °F) durante 15 o 30 minutos. Esto proporciona la energía que la red de silicio necesita para reordenarse y corregirse.

Otra función importante del recocido es la activación de los dopantes implantados. La sola implantación embebe los dopantes a menos de la mitad de una micra debajo de la superficie del silicio; el recocido permite que los dopantes se difundan a una profundidad más conveniente de algunas micras.

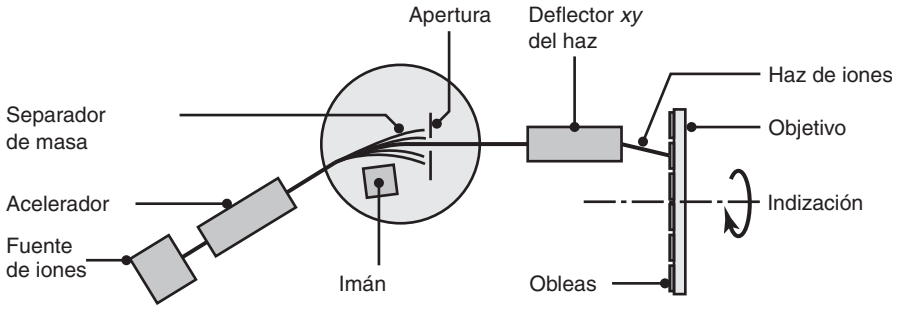


FIGURA 28.21 Esquema de un aparato para la implantación de iones.

EJEMPLO 28.3 Procesamiento de una región tipo *p* en silicio tipo *n*

Supóngase que se desea crear una región tipo *p* dentro de una muestra de silicio tipo *n*. Dibuje secciones transversales de la muestra en cada paso del procesamiento para lograrlo.

Solución Ver la figura 28.22. A este sencillo dispositivo se le conoce como *diodo de unión pn* y la física de su operación es el fundamento para la mayoría de los dispositivos semiconductores.

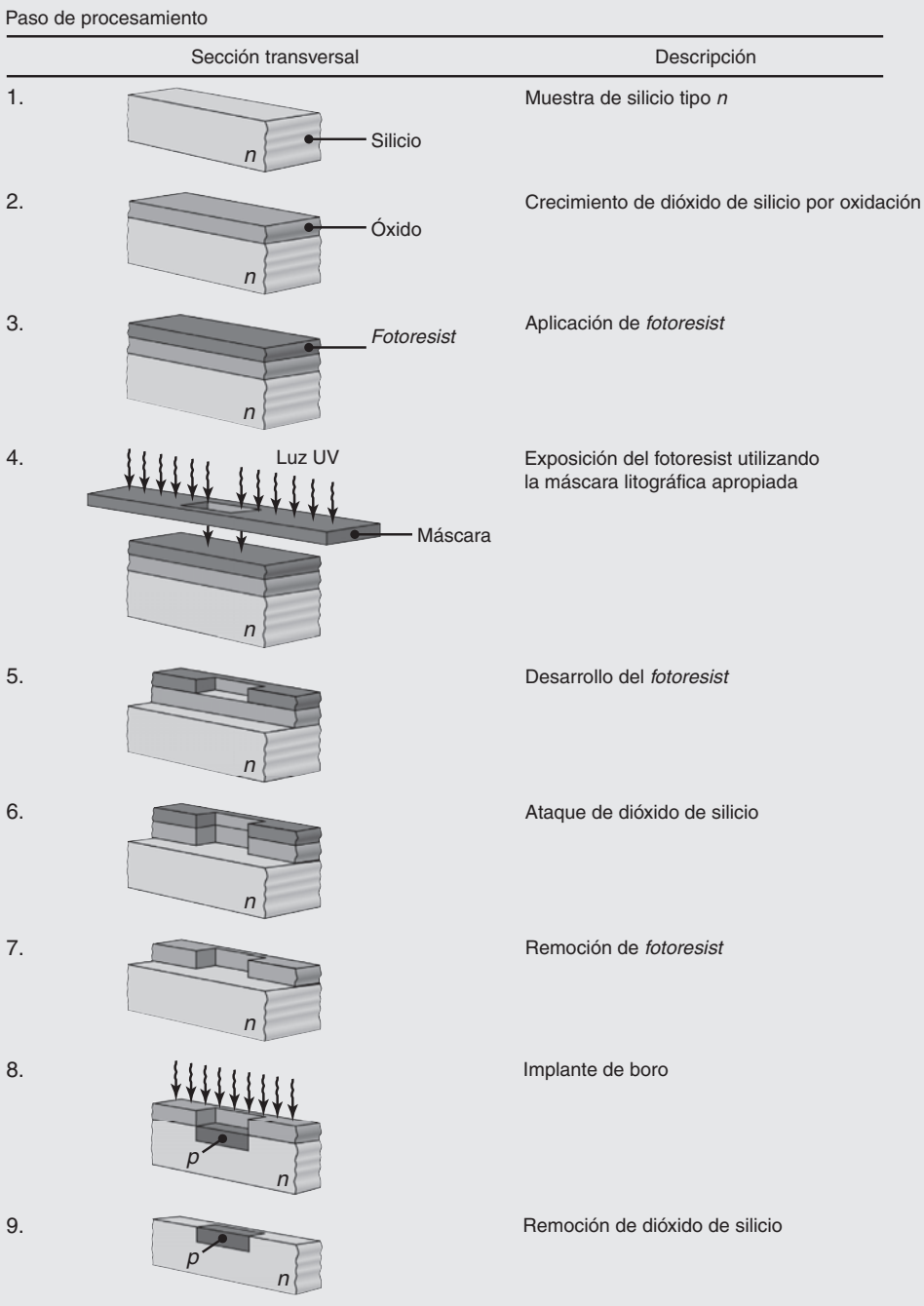


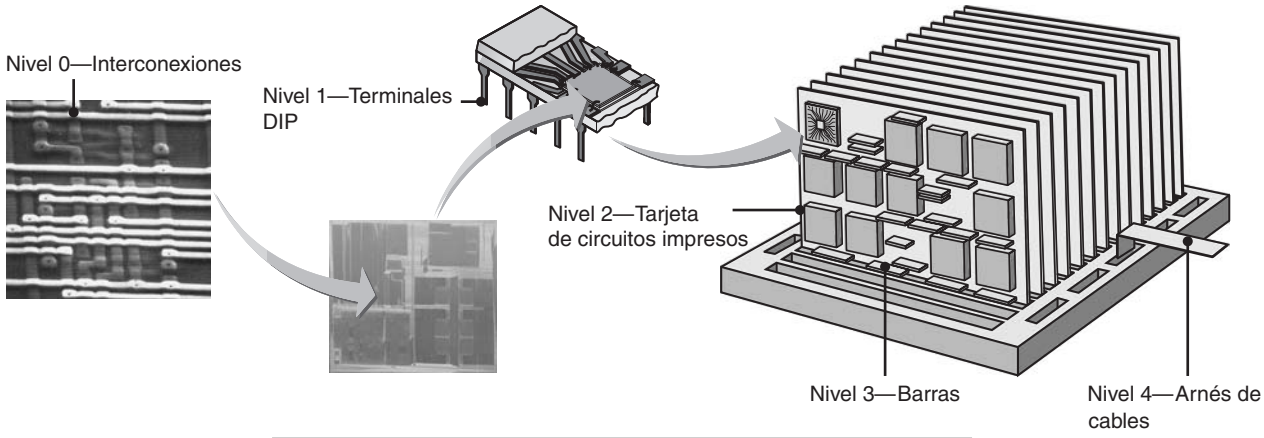
FIGURA 28.22 Secuencia de fabricación de un diodo de unión *pn*.

28.10 Metalización y prueba

En las secciones precedentes nos concentramos sólo en la fabricación de un dispositivo. Sin embargo, la generación de un circuito integrado completo y funcional requiere que estos dispositivos se interconecten, lo que debe ocurrir en varios niveles (fig. 28.23). Las **interconexiones** se fabrican con metales que tienen baja resistencia eléctrica y buena adhesión a las superficies de aislamiento dieléctrico. En la actualidad, el aluminio y las aleaciones de aluminio y cobre siguen siendo los materiales más utilizados para este propósito en la tecnología de VLSI.

Sin embargo, al seguir contrayéndose las dimensiones de un dispositivo, la electromigración se ha convertido en un problema con las interconexiones de aluminio. La **electromigración** es el proceso por el cual los átomos de aluminio se mueven físicamente debido al impacto de los electrones a la deriva en condiciones de alta corriente. En casos extremos, esto puede ocasionar conductores metálicos interrumpidos o puestos en corto. Las soluciones al problema de la electromigración incluyen *(a)* la adición de capas metálicas en sándwich como tungsteno y titanio, y más recientemente; *(b)* el uso de cobre puro, que tiene baja resistividad y mucho mejor comportamiento de electromigración que el aluminio.

Los metales se depositan utilizando técnicas estándar, y se generan patrones de interconexión mediante los procesos litográficos y de ataque, como ya se indicó. Por lo



Nivel	Ejemplo de elemento	Método de interconexión
Nivel 0	Transistor dentro de un IC	Metalización de IC
Nivel 1	IC, otros componentes discretos	Terminales del empaque o interconexiones de módulos
Nivel 2	Empaques de IC	Tarjeta de circuitos impresos
Nivel 3	Tarjetas de circuitos impresos	Conectores (barras)
Nivel 4	Chasis o caja	Conectores/arneses de cables
Nivel 5	Sistema; por ejemplo, computadora	

FIGURA 28.23 Conexiones entre elementos en la jerarquía de circuitos integrados.

común, los IC modernos tienen de una a seis capas de metalización, en cuyo caso cada capa de metal se aísla con un dieléctrico.

La **planarización** (que produce una superficie plana) de estos dieléctricos entre capas es decisiva para reducir cortos entre metales y en la variación de la anchura de línea de la interconexión. Un método común utilizado para obtener una superficie plana es un proceso de ataque de óxido que alise los "picos" y "valles" de la capa dieléctrica.

Sin embargo, el estándar actual para la planarización de interconexiones de alta densidad se ha convertido con rapidez en *pulido químico-mecánico* (CMP, por sus siglas en inglés). Este proceso implica pulir físicamente la superficie de la oblea de manera similar a la que una lijadora de disco o banda aplana los bordes en una pieza de madera. Un proceso común de CMP combina un medio abrasivo con un compuesto de pulido (o lodo) y puede pulir una oblea hasta a 300 Å (1.2×10^{-6} pulgadas) de quedar perfectamente plana.

Las capas de metal se conectan unas con otras mediante **vías**; el acceso a los dispositivos en el sustrato se logra por medio de **contactos** (fig. 28.24). En años recientes, al volverse más pequeños y rápidos los dispositivos, el tamaño y la velocidad de algunos chips se han visto limitados por el propio proceso de metalización.

El procesamiento de la oblea se completa con la aplicación de una *capa de pasivación*, por lo general de nitruro de silicio (Si_3N_4). Éste actúa como barrera para los iones de sodio y también proporciona excelente resistencia a raspaduras.

El siguiente paso consiste en probar cada uno de los circuitos individuales en la oblea. Cada chip (también conocido como **dado**) se prueba mediante una plataforma con sondas controladas por computadora que contiene sondas tipo aguja, las cuales tienen acceso a las terminales de unión en el dado. Las sondas son de dos formas:

1. **Patrones de prueba o estructuras.** La sonda mide las estructuras de prueba (frecuentemente afuera del dado activo) colocadas en la *línea de trazo* (el espacio vacío entre los dados). Éstas constan de transistores y estructuras de interconexión que miden diversos parámetros de procesamiento, como resistividad, resistencia de contacto y electromigración.
2. **Sonda directa**. Este método utiliza la prueba al 100% en las terminales de unión de cada dado.

La plataforma barre a través de la oblea y prueba si cada circuito funciona en forma adecuada con ondas de tiempo generadas por computadora. Si se encuentra un chip

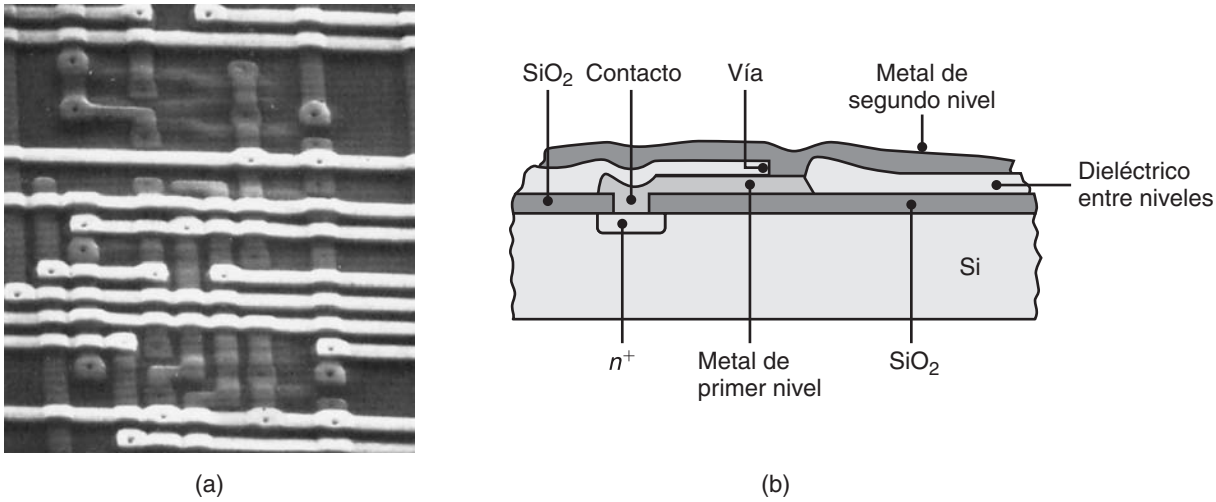


FIGURA 28.24 *(a)* Fotografía de microscopio electrónico de barrido (SEM) de una interconexión metálica de dos niveles. Obsérvese la topografía variable de la superficie. *(b)* Esquema de una estructura de interconexión metálica de dos niveles. *Fuente*: *(a)* Cortesía de National Semiconductor Corporation. *(b)* R. C. Jaeger.

defectuoso, se marca con una gota de tinta. Durante esta prueba se puede alcanzar hasta un tercio del costo de un circuito microelectrónico.

Después de concluir la prueba al nivel de la oblea, puede volverse a rectificar para retirar una gran cantidad del sustrato original. El espesor del dado final depende del requisito de empaque, pero en cualquier caso puede retirarse de 25% a 75% del espesor de la oblea. Tras el rectificado, se separa cada dado de la oblea. El *corte con sierra de diamante* es una técnica de separación utilizada comúnmente y produce filos muy rectos con daño mínimo por astillado y agrietamiento. Luego se clasifican los chips; los dados funcionales se envían para empaque (encapsulado) y se descartan los dados entintados.

28.11 Unión de cables y empaque

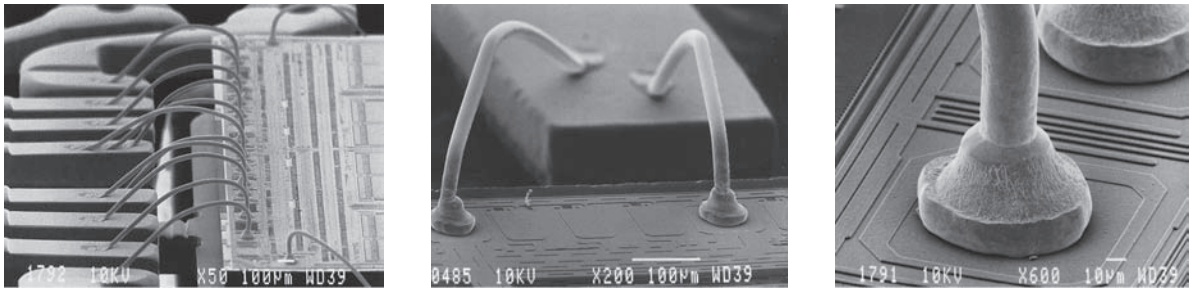
Los dados útiles deben sujetarse a una base más robusta para asegurar su confiabilidad. Un método simple consiste en sujetar un dado a su material de empaque con un cemento epóxico. Otro método utiliza una unión o soldadura eutéctica, que se efectúa calentando sistemas de aleaciones metálicas (ver sección 4.3). Una mezcla usada ampliamente es 96.4% de Au y 3.6% de Si y tiene un punto eutéctico de 370 °C (700 °F).

Una vez que el chip se sujeta a su sustrato, debe conectarse eléctricamente a las terminales del empaque (encapsulado). Esto se logra con la **unión de cables** muy delgados de oro (25 μm de diámetro; 0.001 μin) de las terminales del empaque a las placas de unión localizadas alrededor del perímetro o abajo del centro del dado (fig. 28.25). Las placas de unión en el dado se extienden por lo común de 75 a 100 μm (0.003 a 0.004 pulgada) por lado y los alambres de unión se sujetan mediante técnicas de termocompresión, ultrasónicas o termosónicas (fig. 28.26).

Ahora el circuito conectado está listo para el empaque final. El proceso de *empaque* (encapsulado) determina el costo global de cada IC terminado, ya que los circuitos se producen en masa en la oblea, pero después se empacan de manera individual. Existen empaques en varios estilos; el apropiado debe reflejar los requisitos operativos.

La consideración de un empaque de circuito incluye: el tamaño del chip, el número de terminales externas, el ambiente operativo, la disipación de calor y los requisitos de potencia. Por ejemplo, los IC que se utilizan en aplicaciones industriales y militares requieren empaques de resistencia particularmente elevada, tenacidad y resistencia a la temperatura.

Los empaques se producen con polímeros, metales o cerámicos. Los contenedores *metálicos* se fabrican con aleaciones como Kovar (una aleación de hierro, cobalto y níquel con un bajo coeficiente de expansión), que proporcionan un sello hermético y buena conductividad térmica, pero se limitan en cuanto a la cantidad de terminales que pueden utilizarse. Por lo general, se producen empaques *cerámicos* de Al_2O_3; son hermé-



(a) (b) (c)

FIGURA 28.25 *(a)* Fotografía del SEM de uniones de alambres que conectan las terminales del empaque (lado izquierdo) a las placas de unión del dado. *(b)* y *(c)* Vistas detalladas de *(a)*. *Fuente*: Cortesía de Micron Technology, Inc.

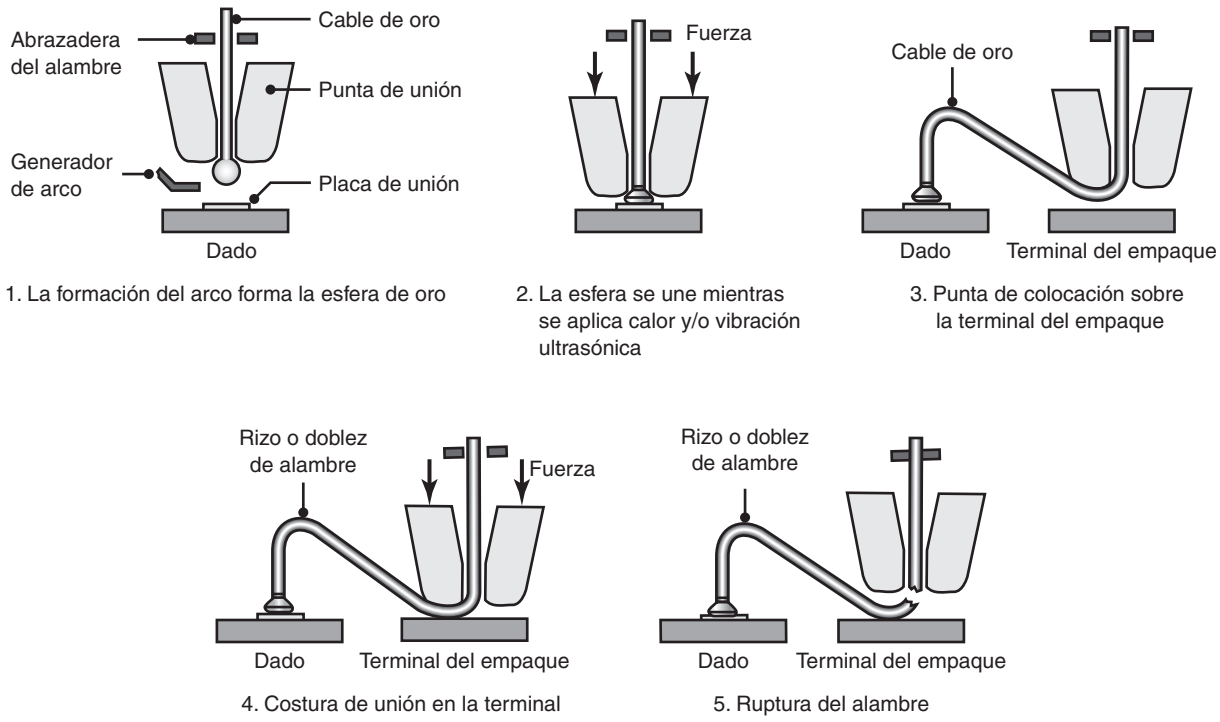


FIGURA 28.26 Esquema de soldadura termosónica de alambres de oro de las terminales del empaque a las placas de unión.

ticos asimismo y tienen buena conductividad térmica, pero poseen conteos de terminales más altos que los empaques de metal. Sin embargo, también son más costosos. Los empaques de *plástico* cuestan poco y tienen altos conteos de terminales, pero se caracterizan por su alta resistencia térmica y no son herméticos.

Un estilo más antiguo de empaque es el **empaque dual en línea** o **de doble línea** (DIP, por sus siglas en inglés), que se muestra en el esquema de la figura 28.27a. Caracterizados por su bajo costo y facilidad de manejo, los empaques DIP están hechos de termoplásticos, epóxicos o cerámicos y pueden tener de 2 a 500 cables externos. Los empaques cerámicos están diseñados para usarse en una variedad más amplia de temperaturas y en aplicaciones de alta confiabilidad y militares, por lo que cuestan mucho más que los empaques de plástico.

La figura 28.27b muestra un empaque plano, cerámico, en el que el empaque y todas las terminales están en el mismo plano. Este estilo de empaque no ofrece la facilidad de manejo o el diseño modular del DIP. Por esta razón, generalmente se fija de manera permanente a una tarjeta de circuitos de múltiples niveles en la que es necesario el perfil bajo del empaque plano.

Los **empaques de montaje superficial** se han convertido en el estándar de los circuitos integrados actuales. Algunos ejemplos comunes se muestran en la figura 28.27c, donde puede verse que la principal diferencia entre ellos está en la forma de los conectores.

La conexión del DIP a la superficie de la tarjeta se efectúa con clavijas (que se insertan en los orificios correspondientes), en tanto que un montaje superficial se suelda en una placa de unión o *descanso* fabricado especialmente. Un *descanso* es una plataforma de soldadura elevada para interconexiones de componentes en una tarjeta de circuitos impresos. El tamaño y los arreglos del empaque se seleccionan a partir de patrones estándar y, por lo general, requieren unión adhesiva del empaque a la tarjeta seguida de **soldadura de onda** (u **olas**) de las conexiones (ver la sección 32.3.3).

Los chips más rápidos y versátiles requieren conexiones con espacios cada vez más ajustados. Los **arreglos de rejilla de pernos** (PGA, por sus siglas en inglés) utilizan pernos

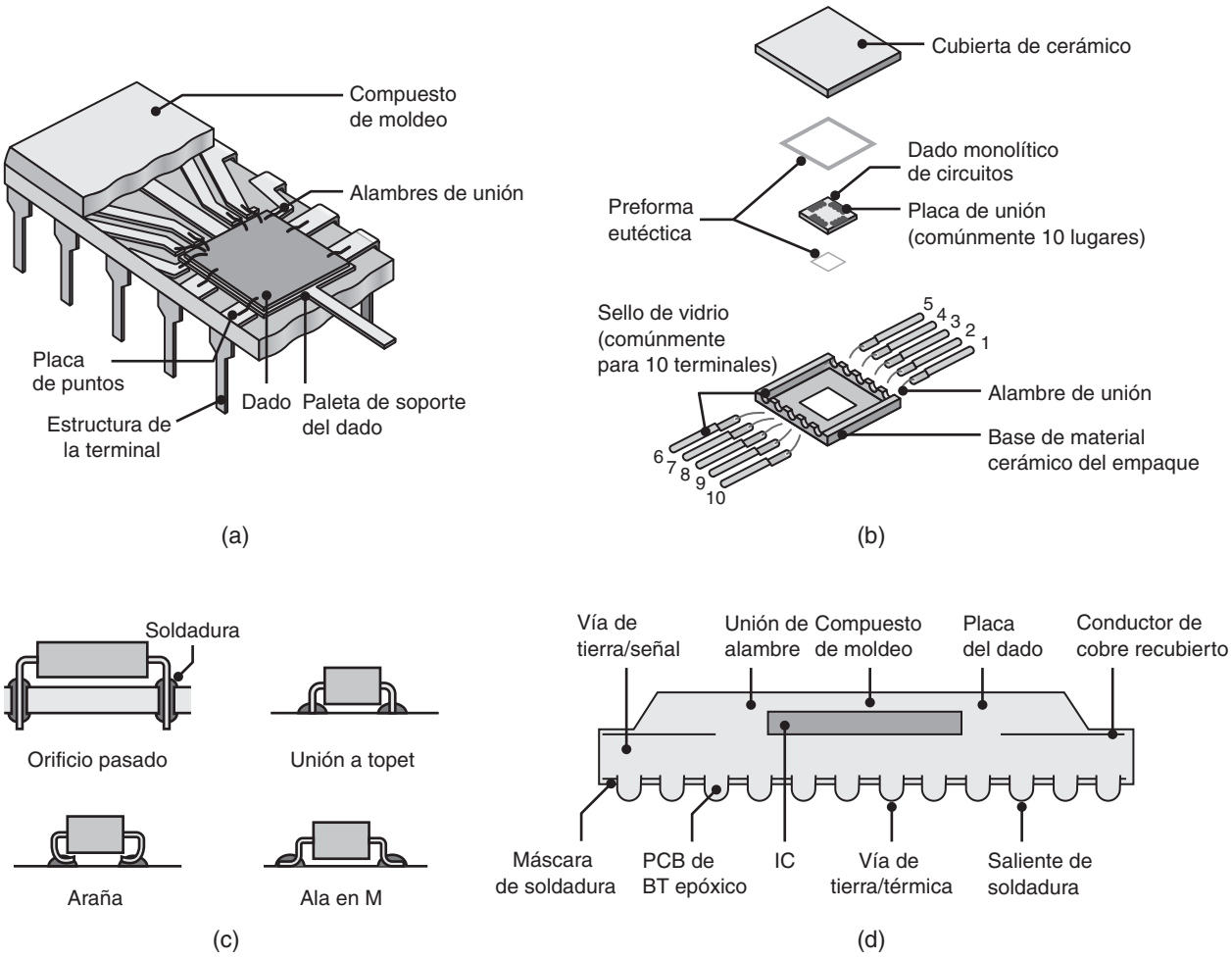


FIGURA 28.27 Esquemas de diversos empaques de IC: *(a)* empaque dual en línea (DIP); *(b)* empaque plano, cerámico; *(c)* configuraciones comunes de montaje de superficie; *(d)* arreglos de rejillas esféricas.

empacados de manera ajustada, que se conectan por medio de orificios pasados en tarjetas de circuitos impresos. Sin embargo, los PGA y otros empaques en línea y de montaje superficial son muy susceptibles a la deformación plástica de los cables y patas, sobre todo en cables de diámetro pequeño, con espaciado estrecho. Una manera de lograr el empaque justo de las conexiones y evitar las dificultades de conexiones delgadas es mediante **arreglos de rejillas esféricas** (BGA, por sus siglas en inglés), como se muestra en la figura 28.27d. Este tipo de arreglos tiene un recubrimiento de soldadura depositada sobre varias esferas metálicas espaciadas en forma estrecha en el lado inferior del empaque. El espaciado entre las esferas puede ser hasta de 50 μm (2000 μpulg), pero es más común que se estandarice a 1.0 mm (0.040 pulgada), 1.27 mm (0.050 pulgada) o 1.5 mm (0.060 pulgada).

Aunque los BGA se pueden diseñar hasta con 1000 conexiones, es muy poco común y, por lo general, son suficientes de 200 a 300 conexiones para las aplicaciones de demanda. Al utilizar la **soldadura de reflujo** (sección 32.3), la soldadura sirve para centrar el BGA por tensión superficial, lo que produce conexiones eléctricas bien definidas para cada esfera. La **tecnología de chip invertido** (FCT, por sus siglas en inglés) se refiere al procedimiento de sujeción de arreglos de rejilla esférica y se ilustra en la figura 28.28. El encapsulado final con epóxico es necesario no sólo para una sujeción más segura del empaque del IC a la tarjeta de circuitos impresos, sino también para transferir calor de modo uniforme durante su operación.

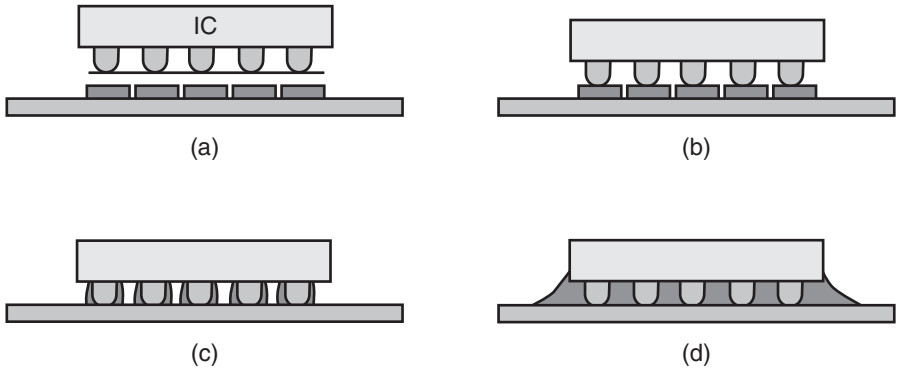


FIGURA 28.28 Ilustración de tecnología de chip invertido. Empaque de chip invertido: *(a)* con esferas y placas metálicas recubiertas de soldadura en la tarjeta de circuitos impresos; *(b)* con aplicación y colocación de fundente; *(c)* con soldadura de reflujo; *(d)* con encapsulado.

Después de sellar el chip en el empaque, se somete a una prueba final. Debido a que uno de los propósitos principales del empaque es el aislamiento del ambiente, por lo general los ensayos en esta etapa comprenden calor, humedad, impacto mecánico, corrosión y vibración. También se realizan pruebas destructivas para investigar la efectividad del sellado.

28.12 Rendimiento y confiabilidad

El **rendimiento** se define como la relación de los chips funcionales contra el número total de chips producidos. El rendimiento general del proceso total de manufactura de IC es el producto del rendimiento de las obleas, el de la unión, el del empaque y el de la prueba. Este rendimiento va desde un pequeño porcentaje para procesos nuevos hasta más de 90% para líneas maduras de manufactura.

La mayor parte de la pérdida de rendimiento ocurre durante el procesamiento de las obleas, debido a la naturaleza más compleja de este tipo de procesamiento. Es común separar las obleas por regiones de chips adecuados y deficientes. Las fallas en esta etapa pueden surgir por defectos de puntos (como picadura de óxido), contaminación de películas, partículas metálicas y defectos del área (como deposición irregular de la película o irregularidad del ataque).

Una preocupación principal respecto de los IC terminados es su **confiabilidad** e **índice de falla.** Debido a que ningún dispositivo tiene un tiempo infinito de vida, se utilizan métodos estadísticos para determinar los tiempos de vida esperados y los índices de falla de los dispositivos microelectrónicos. La unidad para el índice de falla es el FIT, que se define como "una falla por mil millones de horas-dispositivo". Sin embargo, los sistemas completos pueden tener millones de dispositivos, de manera que el índice general de falla en todos los sistemas es, por lo tanto, mayor.

De igual importancia en el análisis de fallas está la determinación del *mecanismo de falla* (es decir, el proceso real que hace que el dispositivo falle). Las fallas comunes debido al procesamiento son las siguientes:

- Regiones de difusión (flujo de corriente irregular y ruptura de la unión).
- Capas de óxido (ruptura del dieléctrico y acumulación de carga superficial).
- Litografía (definición desequilibrada de rasgos y desalineación de la máscara).
- Capas metálicas (contacto deficiente y electromigración que se producen por altas densidades de corriente).

- Otras fallas pueden ser causadas por un montaje inapropiado de los chips, uniones de cables formadas de manera deficiente y pérdida de hermeticidad del empaque.

Como los tiempos de vida de los dispositivos son muy largos, es poco práctico estudiar la falla de los mismos en condiciones operativas normales. Un método eficiente de estudio de las fallas se conoce como **prueba de vida acelerada** y comprende la aceleración de las condiciones cuyos efectos provocan la falla del dispositivo. Se usan variaciones cíclicas en la temperatura, humedad, voltaje y corriente para someter a esfuerzos los componentes. El montaje y empaque de los chips se deforman por las variaciones cíclicas de la temperatura. Los datos estadísticos tomados de estas pruebas se utilizan para predecir modos de falla de los dispositivos y la vida de éstos en condiciones operativas normales.

28.13 Tarjetas de circuitos impresos

Rara vez se utilizan circuitos integrados empacados por sí solos; por el contrario, suelen combinarse con otros IC para servir como bloques de construcción de un sistema aún más grande. Una *tarjeta de circuitos impresos* (PCB, por sus siglas en inglés) es el sustrato para las interconexiones finales entre todos los chips terminados y sirve como lazo de comunicación entre el mundo exterior y los circuitos microelectrónicos en el interior de cada IC empacado. Además de los IC, por lo general las tarjetas de circuitos contienen componentes de circuitos discretos (como resistores y capacitores) que ocupan mucho "espacio útil" sobre la superficie limitada del silicio, tienen requisitos especiales de disipación de potencia, o no pueden implantarse en un chip. Otros componentes comunes discretos son los inductores (que no pueden integrarse en la superficie de silicio), transistores de alto desempeño, capacitores grandes, resistores de precisión y cristales (para control de frecuencia).

Una tarjeta de circuitos impresos es básicamente un material plástico (resina) que contiene diversas capas de lámina delgada (fig. 28.29). Las PCB de *un solo lado* tienen pistas de cobre sólo en un lado del sustrato de aislamiento; las tarjetas de *doble lado* tienen pistas o capas de cobre en ambos lados. También pueden construirse tarjetas multicapa, alternando capas de cobre y aislante. Las tarjetas de lado simple son las formas más simples de tarjetas de circuitos.

Por lo general, las tarjetas de doble lado deben tener ubicaciones en las que se establece conectividad eléctrica entre los elementos en ambos lados de la tarjeta. Esto se logra mediante vías, como se muestra en la figura 28.29. Las tarjetas multicapas pueden tener vías parciales, enterradas o de orificio pasado para permitir PCB extremadamente flexibles. Las tarjetas de doble lado y multicapas son benéficas, porque se pueden unir empaques de IC a ambos lados de la tarjeta, lo que permite diseños más compactos.

Es usual que el material aislante sea una resina epóxica de 0.25 mm a 3 mm (0.01 a 0.12 pulgada) de espesor, reforzada con una fibra de epóxico o vidrio y que se conoce como vidrio E (ver sección 9.2.1). El ensamble se efectúa impregnando láminas de fibra de vidrio con epóxico y prensando las capas entre placas o rodillos calientes. El calor y la presión curan la tarjeta, lo que produce una base rígida y resistente para las tarjetas de circuitos impresos.

Las tarjetas se cizallan al tamaño conveniente y después se taladran o troquelan orificios de localización de casi 3 mm de diámetro en las esquinas de la tarjeta para permitir la alineación y ubicación apropiada de la mismas en el interior de las máquinas de inserción de chips. Los orificios para vías y conexiones se troquelan o producen mediante taladrado CNC; pueden taladrarse pilas de tarjetas de manera simultánea a fin de aumentar la capacidad de producción.

Los patrones conductivos en las tarjetas de circuitos se definen mediante litografía, aunque originalmente se producían con tecnologías serigráficas, de ahí el término de tar-

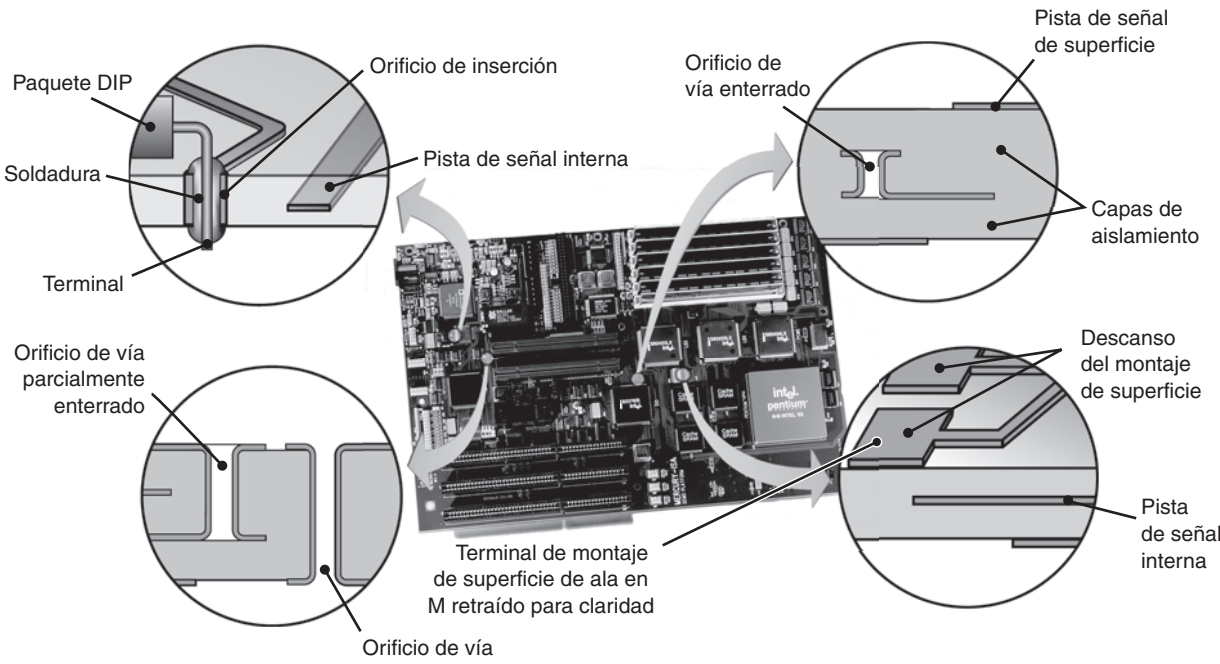


FIGURA 28.29 Estructuras y características de diseño de tarjeta de circuitos impresos.

jeta de circuitos *impresos* o *tarjeta de cableado impreso* (PWB, por sus siglas en inglés). En el *método sustractivo*, se une una lámina delgada de cobre a la tarjeta de circuitos. El patrón deseado en la tarjeta se define con un enmascaramiento positivo desarrollado por fotolitografía y el cobre remanente se retira por ataque (grabado) en húmedo. En el *método aditivo*, se coloca un enmascarado negativo directamente sobre un sustrato aislante para definir la forma deseada. La deposición sin electricidad y la electrodeposición de cobre sirven para definir las conexiones, pistas y descansos en la tarjeta de circuitos.

Después se sujetan a la tarjeta los IC y otros componentes discretos mediante soldadura. Éste es el paso final en la incorporación de los circuitos integrados y los dispositivos microelectrónicos que contienen en sistemas más grandes, mediante conexiones en tarjetas de circuitos impresos. La *soldadura por ola* y la *soldadura de pasta de reflujo* (ver sección 32.3 y ejemplo 32.1) son los métodos preferidos de soldadura de los IC en tarjetas de circuitos.

Algunas de las consideraciones de diseño en el arreglo de las PCB son las siguientes:

1. La soldadura por ola debe utilizarse sólo en uno de los lados de la tarjeta; por lo tanto, todos los componentes montados en los orificios pasados deben insertarse del mismo lado. Los dispositivos de montaje superficial colocados del lado de la inserción de la tarjeta se deben unir con soldadura de reflujo en su lugar; los dispositivos de montaje superficial del lado de las terminales se pueden unir con soldadura por ola.
2. Para permitir un buen flujo de soldadura en la soldadura por ola, los empaques de los IC deben acomodarse con cuidado en la tarjeta de circuitos impresos. La inserción de los empaques en la misma dirección es benéfica para la colocación automatizada, porque las orientaciones aleatorias pueden provocar problemas en el flujo de la soldadura a través de todas las conexiones.

3. El espaciado de los IC se determina principalmente por la necesidad de eliminar calor durante la operación. Se requiere espacio suficiente entre los empaques y las tarjetas adyacentes para permitir el flujo de aire forzado y la convección de calor.
4. También debe existir suficiente espacio alrededor de cada paquete de IC para permitir trabajos adicionales y reparaciones sin afectar los dispositivos adyacentes.

RESUMEN

- La industria microelectrónica se está desarrollando con rapidez. Las posibilidades de nuevos conceptos de dispositivos y diseños de circuitos parecen infinitas. La fabricación de dispositivos microelectrónicos y circuitos integrados comprende diversos tipos de procesos, muchos de los cuales se han adaptado de los de otros campos de manufactura.
- Mediante el proceso Czochralski se obtiene una forma aproximada de silicio monocristalino. Esta forma se rectifica como un cilindro de dimensiones bien controladas, en el que se maquina una muesca o superficie plana. Después el cilindro se rebana en obleas cuyos filos se rectifican y se someten a pulido químico-mecánico para terminarlos.
- Después de preparar las obleas sin acabado, se someten a una repetida oxidación o deposición y a pasos litográficos o de ataque a fin de abrir ventanas en la capa de óxido para tener acceso al sustrato de silicio.
- El ataque (grabado) en húmedo es isotrópico y relativamente rápido. Sin embargo, el ataque (grabado) en seco (utilizando plasmas de gas) es anisotrópico y permite una litografía más precisa e integración a gran escala de los circuitos integrados.
- Después de concluir cada ciclo de procesamiento, se introducen dopantes en varias regiones de la estructura de silicio por medio de difusión e implantación de iones. Luego se interconectan los dispositivos con capas metálicas múltiples y el circuito terminado se empaca y se hace accesible a través de conexiones eléctricas.
- Por último, el circuito empaquetado y otros dispositivos discretos se sueldan a una tarjeta de circuitos impresos para su instalación final.

TÉRMINOS CLAVE

Anchura de línea
Arseniuro de galio
Ataque (grabado)
Ataque (grabado) en húmedo
Ataque (grabado) en seco
Chip (pastilla)
Chisporroteo (pulverización catódica)
Circuito integrado
Cocción posterior
Cocción previa
Confiabilidad
Contactos
Dado
Deposición de película
Deposición química de vapor
Difusión
Dopantes
Electromigración
Empaque
Empaque de montaje superficial
Empaque dual en línea
Enmascaramiento
Epitaxia
Evaporación

Fotorresistente
Implantación de iones
Índice de falla
Integración a muy gran escala
Litografía
Metalización
Oblea *(wafer)*
Oxidación
Oxidación en húmedo
Oxidación en seco
Oxidación selectiva
Planarización
Proceso Czochralski
Prueba de vida acelerada
Pulido químico-mecánico
Registro
Rendimiento
Retícula
Selectividad
Semiconductor
Silicio
Tarjeta de circuitos impresos
Unión
Unión de cables
Vías

BIBLIOGRAFÍA

Bakoglu, H. B., *Circuits, Interconnections, and Packaging for VLSI*, Addison-Wesley, 1990.

Berger, L. I., *Semiconductor Materials*, CRC Press, 1997.

Brar, A. S. y Narayan, P. B., *Materials and Processing Failures in the Electronics and Computer Industries: Analysis and Prevention*, ASM International, 1993.

Campbell, S. A., *The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication*, Oxford University Press, 1996.

Capillo, C., *Surface Mount Technology*, McGraw-Hill, 1990.

Chandrakasan, A. y Brodersen, R. (eds.), *Low Power CMOS Design*, IEEE, 1998.

Chandrakasan, A. y Brodersen, R., *Low Power Digital CMOS Design*, Kluwer Academic Pub., 1995.

Coombs, C. F., Jr. (ed.), *Printed Circuits Handbook*, 4a. ed., McGraw-Hill, 1995.

Edwards, P. R., *Manufacturing Technology in the Electronics Industry*, Chapman & Hall, 1991.

Electronic Materials Handbook, Vol. 1: *Packaging*. ASM International, 1989.

Ghandhi, S. K., *VLSI Fabrication Principles: Silicon and Gallium Arsenide*, 2a. ed., Wiley, 1993.

Harper, C. A. (ed.), *Electronic Packaging and Interconnection Handbook*, 2a. ed., McGraw-Hill, 1996.

Humpston, G. y Jacobson, D. M., *Principles of Soldering*, ASM International, 2004.

Hwang, J. S., *Modern Solder Technology for Competitive Electronics Manufacturing*, McGraw-Hill, 1996.

Jackson, K. A. y Schroter, W. (eds.), *Handbook of Semiconductor Technology*, Vol. 2: *Processing of Semiconductors*, Wiley, 2000.

Judd, M. y Brindley, K., *Soldering in Electronics Assembly*, 2a. ed., Newnes, 1999.

Lambert, L. P., *Soldering for Electronic Assemblies*, Marcel Dekker, 1988.

Lau, J. H. (ed.), *Electronic Packaging: Design, Materials, Process, and Reliability*, McGraw-Hill, 1998.

Lee, H. H., *Fundamentals of Microelectronics Processing*, McGraw-Hill, 1990.

Madou, M. J., *Fundamentals of Microfabrication*, CRC Press, 2a. ed., 2002.

Mahajan, S. y Harsha, K. S. S., *Principles of Growth and Processing of Semiconductors*, McGraw-Hill, 1998.

Manko, H. H., *Soldering Handbook for Printed Circuits and Surface Mounting*, Van Nostrand Reinhold, 1995.

Marks, L., *Printed Circuit Assembly Design*, McGraw-Hill, 2000.

Matisoff, B. S., *Handbook of Electronics Manufacturing*, 3a. ed., Chapman & Hall, 1996.

Mroczkowski, R. S., *Electronic Connector Handbook: Theory and Applications*, McGraw-Hill, 1997.

Pecht, M. (ed.), *Electronic Packaging Materials and Their Properties*. CRC Press, 1998.

Prasad, R. P., *Surface Mount Technology*, 2a. ed., Chapman & Hall, 1997.

Runyan, W. R. y Shaffner, T. J., *Semiconductor Measurements and Instrumentation*, 2a. ed., McGraw-Hill, 1998.

Schroder, D. K., *Semiconductor Material and Device Characterization*, 2a. ed., Wiley-Interscience, 1998.

Taur, Y. y Ning, T. H., *Fundamentals of Modern VLSI Devices*, Cambridge, 1998.

Tummala, R., Rymaszewski, E. J. y Klopfenstein, A. G., *Microelectronics Packaging Fundamentals*, Chapman & Hall, 1999.

Van Zant, P., *Microchip Fabrication*, 4a. ed., McGraw-Hill, 2000.

Wolf, W. H., *Modern VLSI Design: Systems on Silicon*, 2a. ed., Prentice Hall, 1998.

Sze, S. M. (ed.), *High Speed Semiconductor Devices*, Wiley, 1993.

_____, *Modern Semiconductor Device Physics*, Wiley, 1997.

Wolf, S. y Tauber, R. N., *Silicon Processing for the VLSI Era*, Vol. 1: *Process Technology*, 1986; Vol. 2: *Process Integration*, Lattice Press, 1990.

Yeap, G., *Practical Low Power Digital VLSI Design*, Kluwer Academic Pub., 1997.

PREGUNTAS DE REPASO

28.1 Defina los términos oblea, chip, dado, dispositivo, circuito integrado, anchura de línea, registro, montaje superficial, prueba de vida acelerada y rendimiento.
28.2 ¿Por qué el silicio es el semiconductor más utilizado en la tecnología de IC?
28.3 ¿Qué significan VLSI, IC, CVD, CMP y DIP?
28.4 ¿En qué se diferencian los dopantes tipo *n* y tipo *p*?
28.5 ¿En qué se diferencia la epitaxia de otras técnicas utilizadas para deposición?
28.6 Explique las diferencias entre oxidación en seco y en húmedo.
28.7 ¿Cómo se utiliza el nitruro de silicio en la oxidación?
28.8 ¿Cuál es el propósito del cocimiento previo y del cocimiento posterior en litografía?
28.9 Defina selectividad e isotropía y su importancia en relación con el ataque (grabado).
28.10 Compare la difusión y la implantación de iones.
28.11 ¿Cuál es la diferencia entre evaporación y chisporroteo?
28.12 ¿Qué significan BJT y MOSFET?
28.13 ¿Cuáles son los niveles de interconexión?
28.14 ¿Cuál es más limpio, un cuarto limpio clase 10 o uno clase 1?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

28.15 En un reactor epitaxial horizontal (fig. P28.15), las obleas se colocan en una etapa (susceptor) que se inclina un poco, por lo general 1° a 3°. ¿Por qué se hace esto?

28.16 La siguiente tabla describe tres cambios de manufactura de obleas: aumento del diámetro de la oblea, reducción del tamaño del chip e incremento de la complejidad del proceso. Complete la tabla llenándola con "aumento", "disminución" o "sin cambio" e indique el efecto que cada cambio tendría en el rendimiento de la oblea y en la cantidad global de chips funcionales.

Efectos de cambios en la manufactura

Cambio	Rendimiento de la oblea	Cantidad de chips funcionales
Aumento de diámetro de la oblea		
Reducción de tamaño de los chips		
Aumento de complejidad del proceso		

28.17 La velocidad de un transistor es directamente proporcional a la anchura de su compuerta de polisilicio: una compuerta más estrecha produce un transistor más rápido y una más amplia produce un transistor más lento. Si el proceso de manufactura tiene cierta variación en la anchura de la compuerta (por decir, $\pm 0.1\ \mu$m), ¿cómo podría alterar un diseñador el tamaño de la compuerta de un circuito crítico para minimizar su variación de velocidad? ¿Existe algún efecto negativo por este cambio?

28.18 Un problema común en la implantación de iones es la canalización, en la que los iones de alta velocidad viajan a profundidad en el material a través de los canales, a lo largo de los planos cristalográficos, antes de detenerse finalmente. ¿Cuál es una manera simple de detener este efecto?

28.19 Examine los perfiles de orificios en la figura P28.19 y explique cómo se podrían producir.

28.20 Respecto de la figura 28.20, dibuje los orificios generados a partir de una máscara circular.

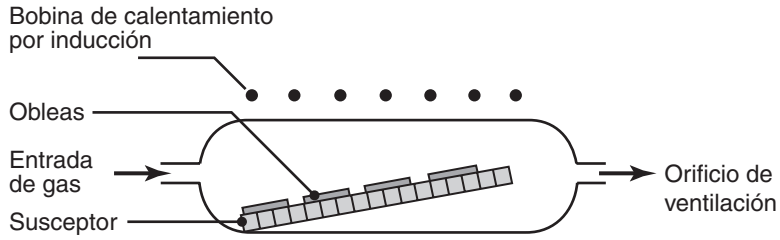


FIGURA P28.15

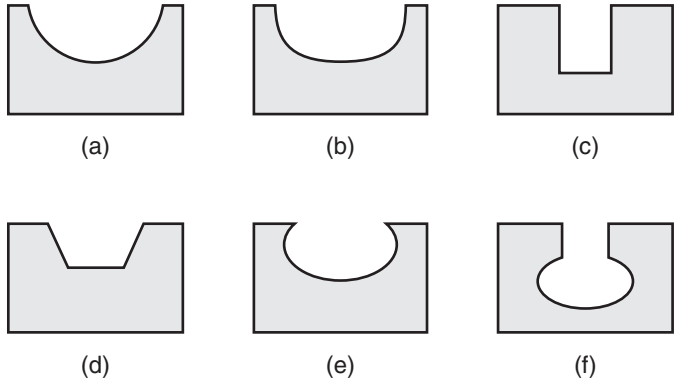


FIGURA P28.19

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

28.21 Cierto fabricante de obleas produce dos obleas de igual tamaño, una con 500 chips y la otra con 300 chips. Después de probarlas, se observa que 50 chips en cada oblea están defectuosos. ¿Cuáles son los rendimientos de ambas? ¿Puede obtenerse alguna relación entre el tamaño del chip y el rendimiento?

28.22 Un proceso de ataque de polisilicio con base de cloro muestra una selectividad de polisilicio a resist de 4:1 y una selectividad de polisilicio a óxido de 50:1. ¿Cuánto resist y óxido expuesto se consumen en el ataque de 3500 Å de polisilicio? ¿Cuál tendría que ser la selectividad de polisicio a óxido para reducir la pérdida a sólo 40 Å de óxido expuesto?

28.23 Durante una secuencia de procesamiento, se hacen crecer tres capas de dióxido de silicio por oxidación a: 2500 Å, 4000 Å y 1500 Å. ¿Cuánto sustrato de silicio se consume?

28.24 Cierta norma de diseño requiere líneas metálicas que no sean menores a 2 μm de ancho. Si una capa metálica de 1 μm de espesor se va a atacar en húmedo, ¿cuál es la anchura mínima del fotoresist permitido (suponiendo que el ataque en húmedo es perfectamente isotrópico)? ¿Cuál sería la anchura mínima del fotoresist si se utiliza un proceso de ataque en seco perfectamente anisotrópico?

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

28.25 Inspeccione diversos equipos electrónicos y de cómputo, desármelos hasta donde se pueda e identifique los componentes que pudieran haberse manufacturado mediante las técnicas descritas en este capítulo.

28.26 ¿Alguno de los aspectos del contenido y los procesos descritos en este capítulo tienen cierta similitud con los procesos presentados en partes anteriores de este libro? Explique y describa cuáles son.

28.27 Describa qué es lo que comprende sobre las características importantes de los cuartos limpios y cómo se mantienen.

28.28 Describa productos que no existirían sin el conocimiento y las técnicas descritas en este capítulo. Explique su respuesta.

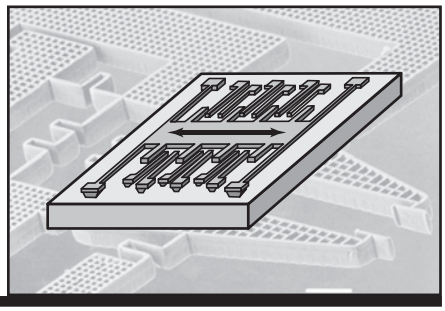
28.29 Revise la bibliografía técnica y proporcione más detalles sobre el tipo y la forma del disco abrasivo utilizado en el proceso de corte de obleas que se muestra en el paso 2 de la figura 28.2.

28.30 Como sabe, los dispositivos microelectrónicos pueden someterse a ambientes hostiles (como alta temperatura, humedad y vibración) y a abuso físico (como dejarlos caer sobre una superficie dura). Opine sobre la forma en que probaría estos dispositivos en cuanto a su resistencia a estas condiciones.

28.31 Revise los dispositivos específicos indicados en la figura V.2. Elija cualquiera de estos dispositivos e investigue qué son, sus características, cómo se manufacturan y a qué costos.

CAPÍTULO

29 Fabricación de dispositivos y sistemas microelectro-mecánicos (MEMS)



29.1 Introducción 908
29.2 Micromaquinado de los dispositivos MEMS 909
29.3 El proceso de microfabricación LIGA 920
29.4 Fabricación sin materia sólida de dispositivos 927

EJEMPLOS:

29.1 Micromaquinado superficial de una bisagra 913
29.2 Dispositivo digital de microespejo 914
29.3 Secuencia de operación y fabricación de una impresora térmica de inyección de tinta 918
29.4 Producción de imanes de tierras raras 924

ESTUDIO DE CASO:

29.1 Acelerómetro para bolsas de aire automotrices 928

Muchos de los procesos y materiales empleados en dispositivos microelectrónicos también se utilizan en la manufactura de dispositivos micromecánicos y sistemas microelectromecánicos. En este capítulo se describe lo siguiente:

- Procesos especializados para manufacturar dispositivos MEMS.
- Micromaquinado de características tridimensionales.
- Micromaquinado de superficies.
- Ataque (grabado) en seco y ataque en húmedo.
- Electroformado.

Productos comunes fabricados: sensores, actuadores, acelerómetros, interruptores ópticos, mecanismos de impresión por inyección de tinta, microespejos, micromáquinas y microdispositivos.

29.1 Introducción

En el capítulo anterior se trató la manufactura de circuitos integrados y productos que operan completamente con base en principios eléctricos o electrónicos, llamados *dispositivos microelectrónicos*. Con frecuencia estos dispositivos, basados en semiconductores, poseen características comunes de miniaturización extrema. Existe una gran cantidad de dispositivos que son mecánicos por naturaleza y de un tamaño similar a los dispositivos microelectrónicos. Un *dispositivo micromecánico* es un producto de naturaleza mecánica en su totalidad y tiene dimensiones entre unos cuantos milímetros y escalas de longitud atómica, como algunos engranes y bisagras muy pequeñas.

Los *dispositivos microelectromecánicos* (MEMS, por sus siglas en inglés) son productos que combinan elementos mecánicos y eléctricos o electrónicos a estas escalas mínimas. Los *sistemas microelectromecánicos* (MEMS) son dispositivos microelectromecánicos que también incorporan un sistema eléctrico integrado en un producto. Ejemplos comunes de dispositivos micromecánicos son los sensores de todos los tipos (fig. 29.1). Los sistemas microelectromecánicos son menos comunes; sus ejemplos son los sensores de bolsas de aire y los dispositivos de microespejos digitales.

Muchos materiales y métodos de manufactura y sistemas descritos en el capítulo 28 también se aplican a la manufactura de dispositivos y sistemas microelectromecánicos. Los dispositivos microelectrónicos se basan en semiconductores, en tanto que los microelectromecánicos y porciones de los MEMS no tienen esta restricción de materia-

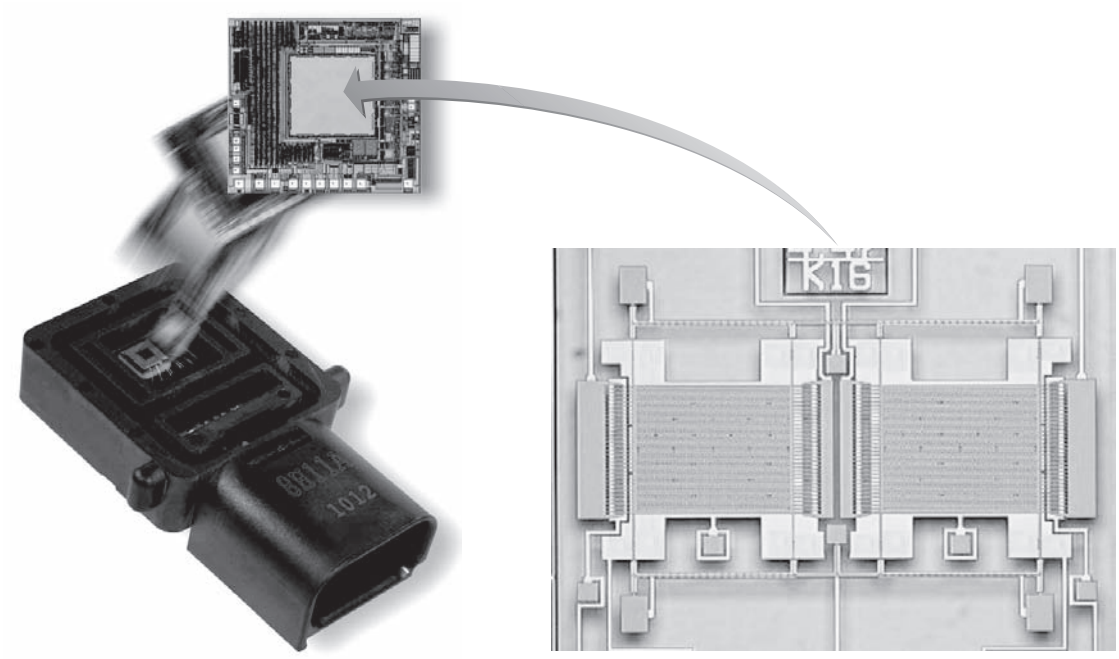


FIGURA 29.1 Sensor de giroscopio utilizado para aplicaciones automotrices que combina sistemas mecánicos y electrónicos. Quizá el uso más difundido de los dispositivos MEMS está en sensores de todas las clases. *Fuente*: Cortesía de Motorola Corporation.

les. Esto permite el uso de muchos materiales más y el desarrollo de procesos adecuados para ellos. No obstante, con frecuencia se utiliza silicio porque se han desarrollado diversos procesos de manufactura muy avanzada y confiable para aplicaciones microelectrónicas. En este capítulo se destacan los procesos de manufactura que pueden emplearse específicamente en los dispositivos y sistemas microelectromecánicos, aunque debe considerarse que también se aplican procesos y conceptos como litografía, metalización, ataque (grabado), recubrimiento y empaque.

El campo de los MEMS y los dispositivos MEMS está avanzando con rapidez y continuamente se desarrollan nuevos procesos o variaciones de procesos ya existentes. Se ha sugerido que la tecnología de los MEMS puede tener aplicaciones industriales de gran difusión; sin embargo, hasta ahora sólo algunas industrias los han explotado. Muchos de los procesos descritos en este capítulo todavía no se aplican de manera amplia, pero son de interés para investigadores y practicantes de MEMS.

29.2 Micromaquinado de los dispositivos MEMS

En la manufactura de dispositivos MEMS se pueden utilizar la litografía y el ataque para obtener rasgos bidimensionales o de dos y media dimensiones en las superficies de las obleas: *wafers*; sin embargo, con frecuencia se requieren rasgos tridimensionales. A la producción de rasgos, que va desde micras hasta milímetros, se le denomina *micromaquinado*. Como se describe en la sección 28.8, el uso de técnicas de ataque anisotrópico permite fabricar dispositivos con paredes bien definidas y altas relaciones de aspecto. Por esta razón, se han fabricado algunos dispositivos MEMS de silicio monocristalino.

Una de las dificultades reconocidas que se relacionan con el uso del silicio en dispositivos MEMS es la alta adhesión encontrada a pequeñas escalas de longitud y el rápido desgaste asociado. La mayoría de los dispositivos comerciales están diseñados para evitar la fricción, por ejemplo, utilizando resortes de flexión en lugar de bujes; sin embargo, esto complica los diseños y hace que algunos dispositivos MEMS no sean viables. En la actualidad se realizan investigaciones importantes para identificar materiales y lubricantes que proporcionen una vida y un desempeño razonables. Se han estudiado el carburo de silicio, el diamante y metales (entre ellos aluminio, tungsteno y níquel) como materiales potenciales para los MEMS.

También se han investigado los lubricantes. Por ejemplo, se sabe que rodear el dispositivo MEMS con un aceite de silicio prácticamente elimina el desgaste adhesivo (ver sección 33.5), pero al mismo tiempo limita el desempeño del dispositivo. Se investigan además capas de autoensamble de polímeros, así como materiales novedosos con características de autolubricación. Sin embargo, la tribología (fricción, desgaste y lubricación) de los dispositivos MEMS sigue siendo la principal barrera tecnológica para que su uso tenga una gran difusión.

29.2.1 Micromaquinado volumétrico

Hasta principios de la década de 1980, el *micromaquinado volumétrico* era el método más común de maquinado a escalas micrométricas. Este proceso utiliza ataques (grabados) dependientes de la orientación en silicio monocristalino (ver fig. 28.15b). Esta técnica depende del ataque en una superficie, deteniéndose en ciertas superficies del cristal, regiones dopadas y películas atacables para formar una estructura deseada. Como ejemplo de este proceso considérese la fabricación de la viga en voladizo de silicio que se muestra en la figura 29.2. Mediante las técnicas de enmascaramiento descritas en la sección 28.7, un parche rectangular de sustrato de silicio tipo *n* se cambia a silicio tipo *p* dopado con boro. Los atacantes como el hidróxido de potasio no pueden retirar grandes cantidades de silicio dopado con boro, por lo que no atacan este parche.

Después se produce una máscara, como el nitruro de silicio sobre el silicio. Cuando se ataca con hidróxido de potasio el silicio sin dopar se elimina con rapidez, en tanto que la máscara y el parche dopado básicamente no se ven afectados. El ataque avanza hasta que los planos (111) quedan expuestos en el sustrato de silicio tipo *n*; socavan el parche, dejando una viga en voladizo tal como se muestra.

29.2.2 Micromaquinado de superficies

El micromaquinado volumétrico es útil para producir formas muy simples. Está restringido a materiales monocristalinos, ya que los materiales policristalinos no se maquinan a diferentes velocidades en distintas direcciones cuando se usan atacantes en húmedo. Mu-

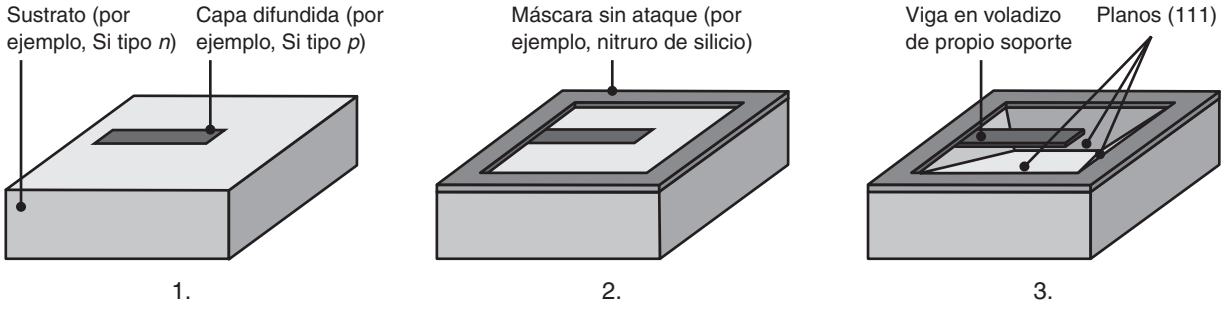


FIGURA 29.2 Esquema de micromaquinado volumétrico. (1) Difusión del dopante con el patrón deseado. (2) Depósito y película de patrón de enmascaramiento. (3) El ataque dependiente de la orientación (ODE) deja una estructura de soporte propio. *Fuente*: Cortesía de K. R. Williams, Agilent Laboratories.

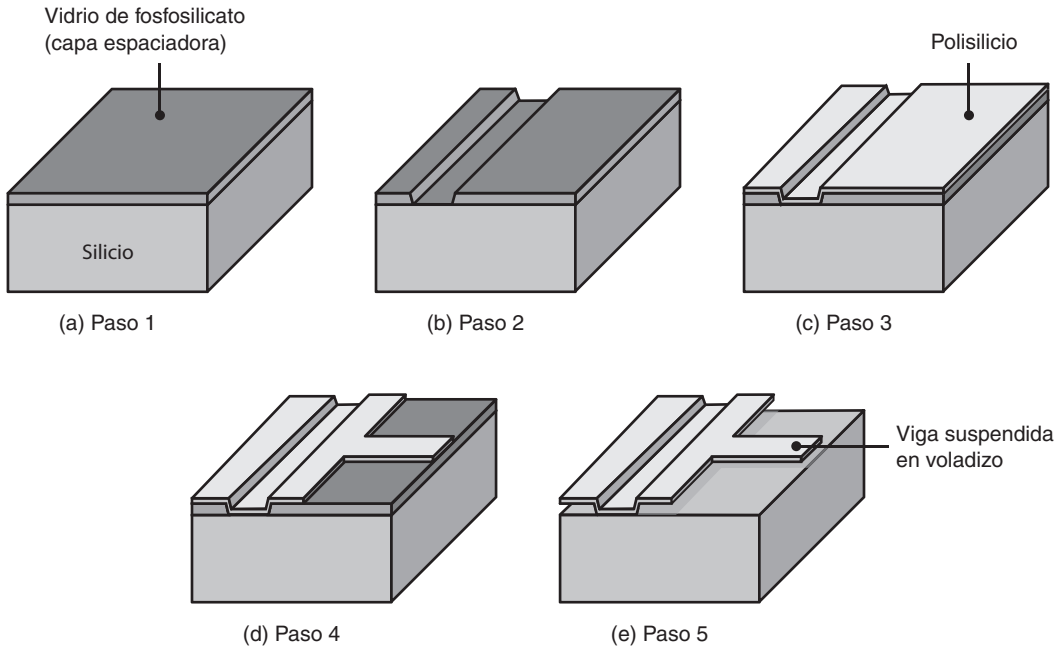


FIGURA 29.3 Esquema de los pasos en el micromaquinado de superficies: *(a)* deposición de una capa espaciadora de vidrio de fosfosilicato (PSG); *(b)* ataque (grabado) de la capa espaciadora; *(c)* deposición de polisilicio; *(d)* ataque (grabado) de polisilicio; *(e)* ataque (grabado) selectivo en húmedo de PSG, dejando sin afectar el sustrato de silicio y el polisilicio depositado.

chas aplicaciones de MEMS requieren el uso de otros materiales, por lo que se necesitan opciones al micromaquinado volumétrico. Una de ellas es el *micromaquinado de superficies*. En la figura 29.3 se ilustran los pasos básicos de este tipo de micromaquinado para dispositivos de silicio. Se deposita un espaciador o capa de sacrificio sobre el sustrato de silicio recubierto con una pequeña capa de material dieléctrico (conocida como *capa de aislamiento* o *de reducción*).

El vidrio de fosfosilicato depositado por el método de deposición química de vapor es el material más común para la capa espaciadora, porque el ácido fluorhídrico la ataca con mucha rapidez. En la figura 29.3b se muestra dicha capa después de la aplicación de la máscara y el ataque. En esta etapa se deposita una delgada película estructural sobre la capa espaciadora; la película puede ser polisilicio, metal, aleación metálica o un dieléctrico (fig. 29.3c). Posteriormente se modela la película estructural, en general por ataque (grabado) en seco para mantener paredes verticales y tolerancias dimensionales estrechas. Por último, el ataque en húmedo de la capa de sacrificio deja una estructura tridimensional que se soporta por sí misma, como se muestra en la figura 29.3e. La oblea debe recocerse pare eliminar esfuerzos residuales en el metal depositado antes de modelarla. Si no se hace, la película estructural se alabea severamente al retirar la capa espaciadora.

En la figura 29.4 se muestra una microlámpara que emite una luz blanca cuando pasa la corriente a través de ella. Se produjo por una combinación de micromaquinado superficial y volumétrico. La capa superior modelada tiene 2.2 μm de espesor de tungsteno sometido a ataque de plasma, creando un filamento en forma de serpentín y una placa de unión. La proyección rectangular es de nitruro de silicio sometido a ataque (grabado) en seco. La capa muy inclinada es de vidrio de fosfosilicato sometido a ataque (grabado) en húmedo por HF. El sustrato es silicio, que se ataca mediante ODE.

Debe elegirse con cuidado el atacante utilizado para remover la capa espaciadora. De preferencia, tiene que disolver dicha capa al tiempo que deja el dieléctrico, el silicio y

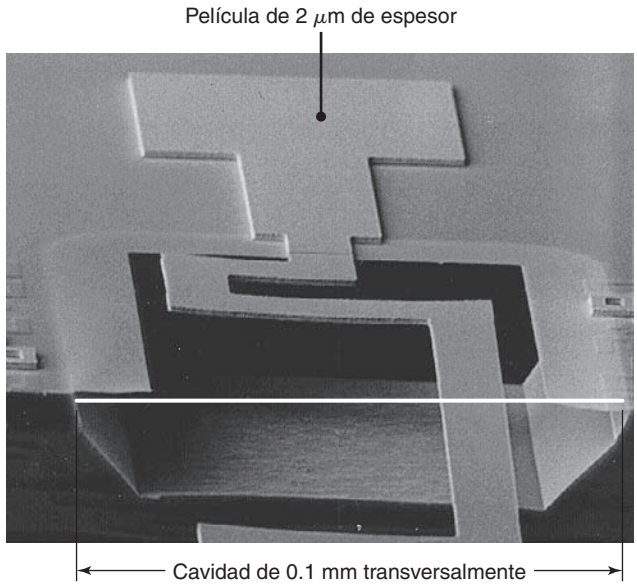


FIGURA 29.4 Microlámpara producida mediante una combinación de procesos de micromaquinado volumétrico y de superficies. *Fuente*: Cortesía de K. R. Williams, Agilent Technologies.

la película estructural tan intactos como sea posible. Con rasgos grandes y capas espaciadoras angostas, se vuelve muy difícil hacerlo y el ataque puede tardar muchas horas. Para reducir el tiempo de ataque, es posible diseñar orificios adicionales de ataque en las microestructuras a fin de aumentar el acceso del atacante a la capa espaciadora.

Otra dificultad que se debe resolver es la **fricción estática** (***stiction***) después del ataque en húmedo. Considérese la situación ilustrada en la figura 29.5. Después de remover la capa espaciadora, el atacante líquido se seca desde la superficie de la oblea. Un menisco formado entre las capas produce fuerzas capilares que pueden deformar la película y provocar que entren en contacto con el sustrato al evaporarse el líquido. Debido a que las fuerzas adhesivas son más significativas a pequeñas escalas de longitud, es posible que la película se adhiera de manera permanente a la superficie y así no se producen los rasgos o características tridimensionales deseadas.

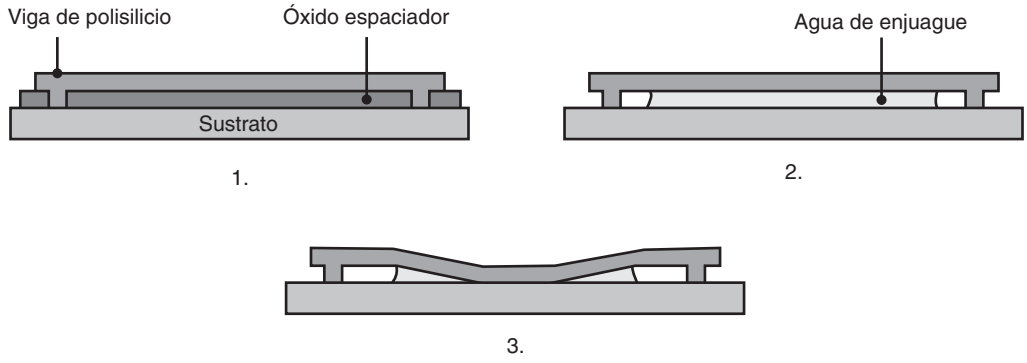


FIGURA 29.5 Fricción estática después del ataque (grabado) en húmedo: (1) viga sin liberar; (2) viga liberada antes del secado; (3) viga liberada jalada hacia la superficie por las fuerzas capilares durante el secado. Al hacer el contacto, las fuerzas adhesivas evitan que la viga regrese a su forma original, *Fuente*: B. Bhushan.

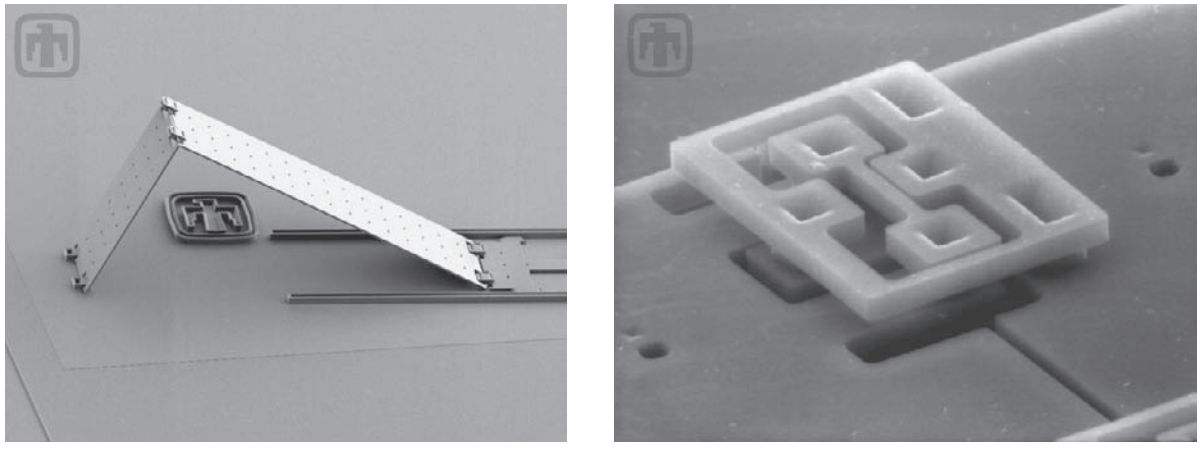
EJEMPLO 29.1 Micromaquinado superficial de una bisagra

El micromaquinado de superficies es una tecnología muy difundida en la producción de MEMS. Las aplicaciones incluyen acelerómetros, sensores de presión, microbombas, micromotores, actuadores y mecanismos microscópicos de fijación. Con frecuencia, estos dispositivos requieren estructuras verticales muy grandes, que no se pueden manufacturar de modo directo debido precisamente a que es difícil depositar una estructura vertical de dimensiones enormes. Esto se resuelve maquinando en forma horizontal grandes estructuras planas y después girándolas o doblándolas en posición vertical, como se muestra en la figura 29.6.

En la figura 29.6a se presenta un microespejo que se inclinó respecto de la superficie en la que se manufacturó. Dichos sistemas pueden utilizarse para reflejar luz (que es oblicua a una superficie) sobre los sensores o hacia otros sensores. Es evidente que un dispositivo de tal profundidad y que tiene la relación de aspecto del espejo desplegado es muy difícil de maquinar directamente. En su lugar, es más fácil someter el espejo a micromaquinado de superficie junto con un actuador lineal y después doblar el espejo en posición desplegada. Para hacerlo, se integran bisagras especiales (como la que se muestra en la figura 29.6b) en el diseño.

En la figura 29.7 se presenta la sección transversal de una bisagra durante su manufactura. En la producción correspondiente se aplican los siguientes pasos:

1. Se deposita una capa de 2 μm de espesor de vidrio de fosfosilicato (PSG) en el material del sustrato.
2. Se deposita una capa de 2 μm de espesor de polisilicio (Poli-1 en la fig. 29.7a) en el PSG, se modela por fotolitografía y se ataca en seco para formar los elementos estructurales deseados, incluyendo los pasadores de la bisagra.
3. Se deposita una segunda capa de PSG de sacrificio con un espesor de 0.5 μm (fig. 29.7b).
4. Las ubicaciones de las conexiones se atacan a través de ambas capas de PSG (fig. 29.7c).
5. Se deposita, modela y ataca una segunda capa de polisilicio (Poli-2 en la fig. 29.7d).
6. Las capas de sacrificio de PSG se eliminan por ataque en húmedo.



(a) (b)

FIGURA 29.6 *(a)* Imagen de SEM de un microespejo desplegado. *(b)* Detalle de la bisagra del microespejo. *Fuente*: Cortesía de Sandia National Laboratories.

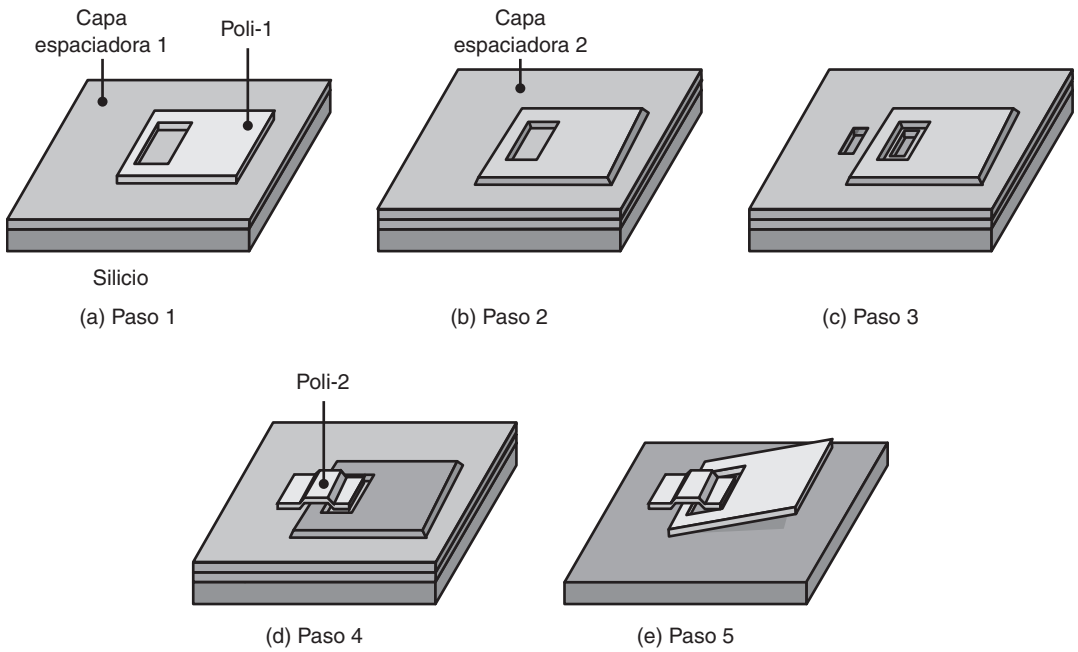


FIGURA 29.7 Esquema de los pasos requeridos para manufacturar una bisagra. *(a)* Deposición de una capa espaciadora de vidrio de fosfosilicato (PSG) y capa de polisilicio (ver fig. 29.3). *(b)* Deposición de una segunda capa espaciadora. *(c)* Ataque selectivo de PSG. *(d)* Deposición de polisilicio para formar una grapa para la bisagra. *(e)* Después del ataque selectivo en húmedo del PSG, la bisagra puede rotar.

Bisagras como éstas tienen una fricción muy elevada. Si los espejos (ver fig. 29.6) se manipulan manual y cuidadosamente con agujas de sondeo, se mantienen en su posición. Dichos espejos se combinan a menudo con actuadores lineales para controlar su despliegue con precisión.

EJEMPLO 29.2 Dispositivo digital de microespejo

Un ejemplo de producto comercial basado en un MEMS es el dispositivo de tecnología de pixeles digitales (DPT^{MR}), que se ilustra en la figura 29.8. Utiliza un arreglo de *dispositivos digitales de microespejos* (DMD^{MR}) para proyectar una imagen digital, como en los sistemas de proyección accionados por computadora. Los espejos de aluminio se pueden inclinar de manera que la luz se dirija al interior o fuera de la óptica que enfoca la luz sobre una pantalla. Así, cada espejo puede representar un píxel de la resolución de una imagen. El espejo permite la proyección de pixeles claros u oscuros, aunque también se pueden manejar niveles de gris. Puesto que el tiempo de conmutación es de unos 15 μs (mucho más rápido que la respuesta del ojo humano), el espejo puede conmutar entre los estados de encendido y apagado para reflejar la dosis de luz apropiada a la óptica.

En la figura 29.9 se muestran los pasos de fabricación para producir el dispositivo DMD. Esta secuencia es similar a otros ejemplos de micromaquinado de superficies, pero tiene las siguientes diferencias importantes:

- Todos los pasos de micromaquinado suceden a temperaturas por debajo de 400 °C, las cuales son lo suficientemente bajas para asegurar que el circuito electrónico no sufra daños.
- Se deposita una capa gruesa de dióxido de silicio y se somete a pulido químico-mecánico para proporcionar una cimentación adecuada al dispositivo MEMS.

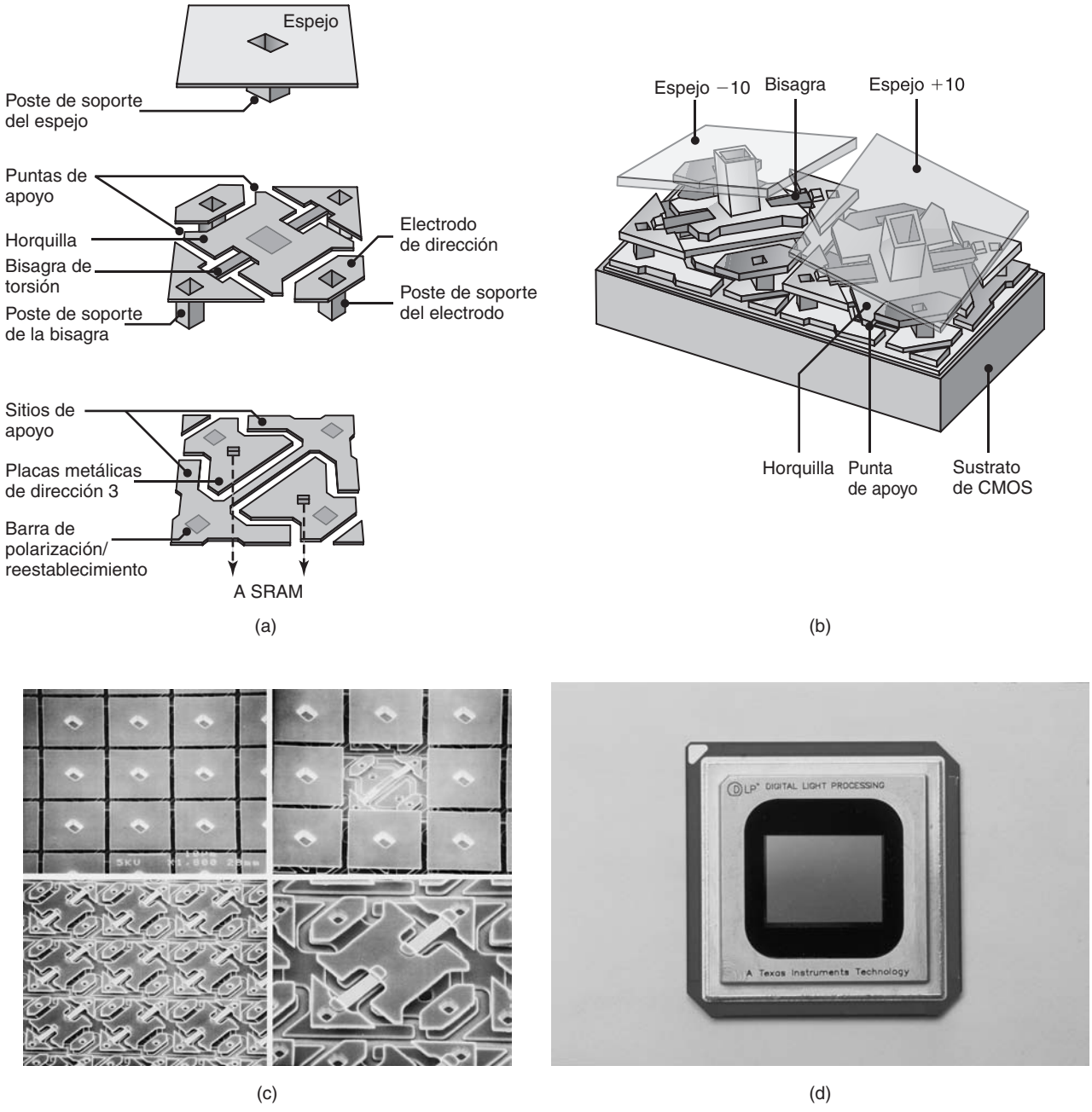


FIGURA 29.8 Dispositivo de tecnología de pixeles digitales de Texas Instruments (DPT^{MR}). *(a)* Vista esquemática de un dispositivo digital de microespejo simple (DMD^{MR}). *(b)* Vista de dos pixeles adyacentes de DMD. *(c)* Imágenes de arreglos de DMD sin algunos espejos para mayor claridad; cada espejo mide unos 17 μm (670 μipulg) de lado. *(d)* Dispositivo común de DPT utilizado para sistemas de proyección digital, televisores de alta resolución y otros sistemas de pantallas de imagen. El dispositivo mostrado contiene 1,310,720 microespejos y mide menos de 50 mm (2 pulgadas) por lado. *Fuente*: Cortesía de Texas Instruments Corp.

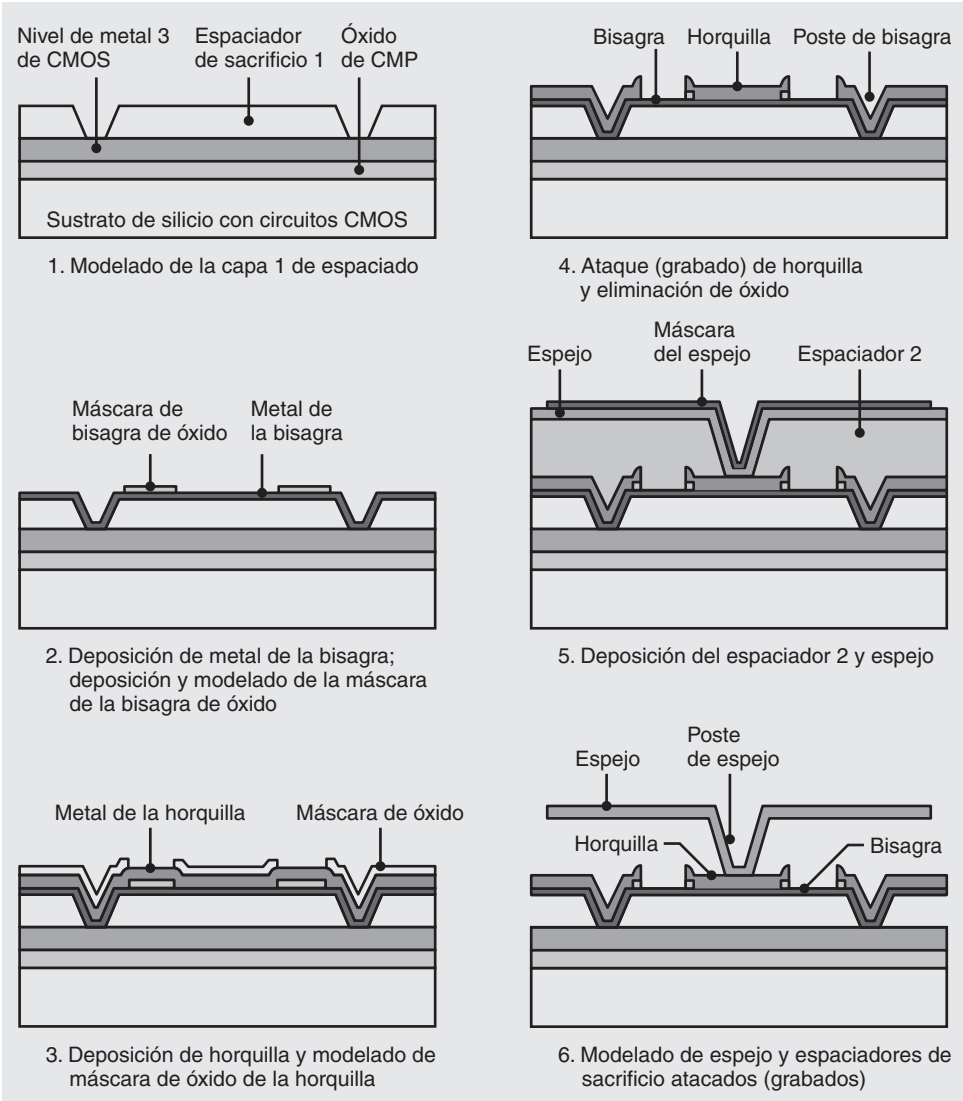


FIGURA 29.9 Secuencia de manufactura del dispositivo DMD de Texas Instruments.

- Las placas de apoyo y los electrodos se producen con aluminio, que se deposita por chisporroteo.
- La alta confiabilidad requiere bajos esfuerzos y alta resistencia en la bisagra de torsión, que se produce con una aleación apropiada de aluminio.
- La porción MEMS del DMD es muy delicada y debe tenerse mucho cuidado al separar los dados. Cuando se termina, un disco de sierra para obleas (ver fig. 28.6c) corta una zanja a lo largo de los bordes del DMD, lo que permite que los dados individuales se dividan en una etapa posterior.
- Mediante un paso especial, se deposita una capa que evita la adhesión entre la horquilla y las placas de apoyo.
- El DMD se coloca en un empaque de cerámico herméticamente sellado (fig. 29.10) con una ventana óptica.

Un arreglo de estos espejos representa una pantalla de escala de grises. El uso de tres espejos (uno para cada color: rojo, verde y azul claro) para cada píxel produce una imagen de color con millones de colores discretos. La tecnología digital de pixeles

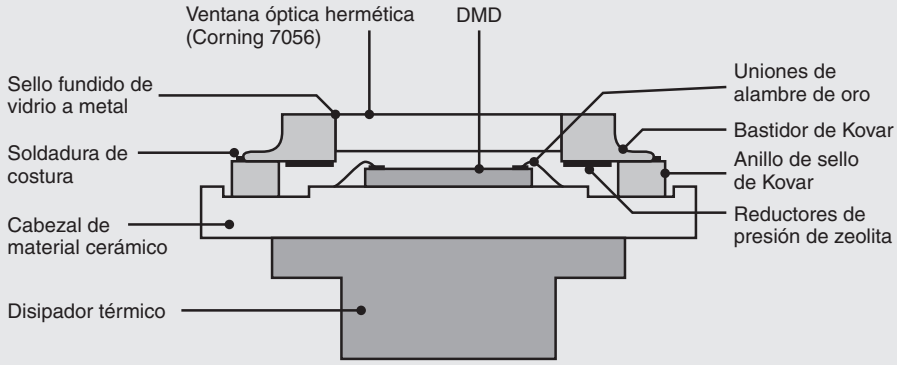


FIGURA 29.10 Construcción de empaque plano de material cerámico utilizado para el dispositivo DMD.

se aplica con amplitud en sistemas de proyección digital, televisores de alta definición y otras aplicaciones ópticas. Sin embargo, para producir el dispositivo que se muestra en la figura 29.8 se requieren rasgos o características de mucho más de dos y media dimensiones, así que se deben manufacturar ensambles totalmente tridimensionales de partes múltiples.

SCREAM. Otro método para fabricar estructuras MEMS muy profundas es el proceso SCREAM (siglas en inglés de *ataque reactivo de silicio monocristalino y metalización*), que se representa en la figura 29.11. En esta técnica, los procesos estándar de litografía y ataque producen zanjas de 10 a 50 μm (400 a 2000 μpulg) de profundidad, que después se protegen con una capa de óxido de silicio depositada mediante deposición química de vapor. Un paso de ataque (grabado) anisotrópico retira el óxido sólo en la parte inferior de la zanja y después ésta se amplía por ataque en seco. Un ataque isotrópico (utilizando hexafluoruro de azufre, SF_6) ataca lateralmente las paredes laterales expuestas en la parte inferior de la zanja. Esta socavación (cuando se traslapa sobre socavaciones adyacentes) libera las estructuras maquinadas.

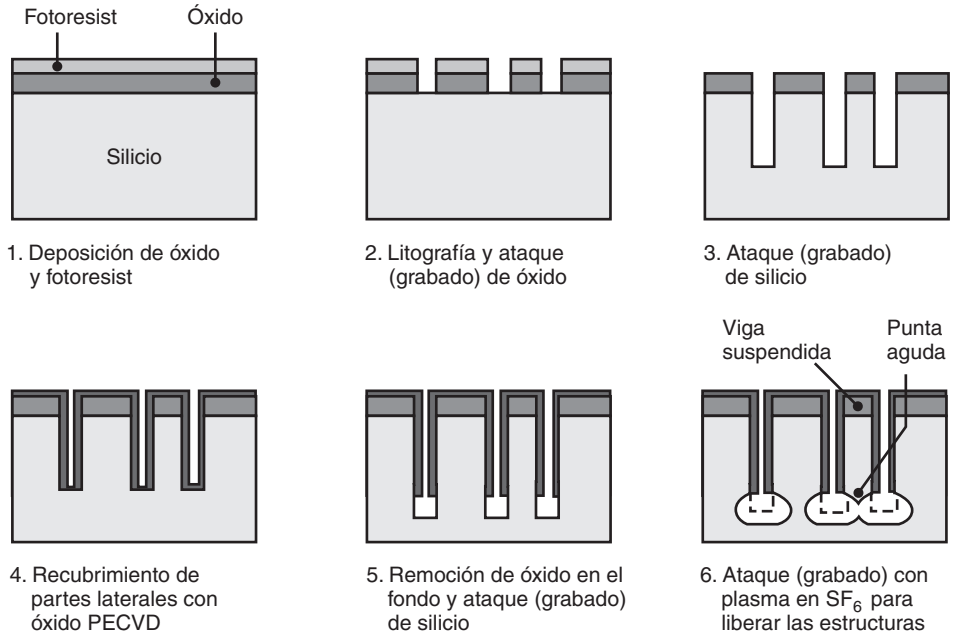


FIGURA 29.11 Proceso SCREAM. *Fuente*: N. Maluf.

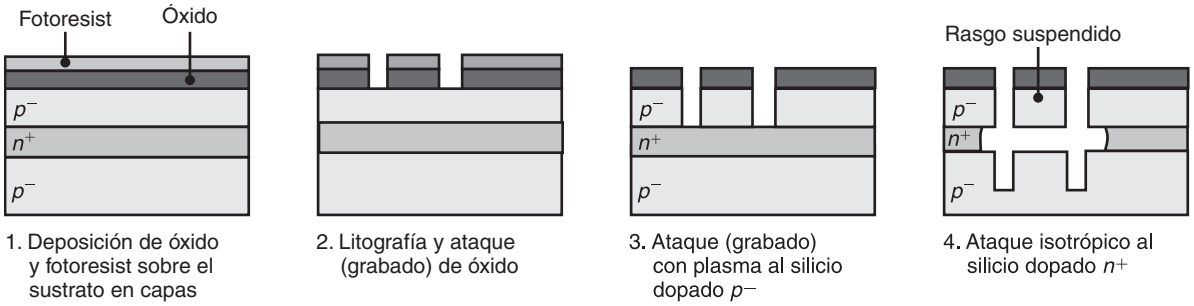


FIGURA 29.12 Esquema de micromaquinado de silicio mediante el proceso de ataque con plasma de un solo paso (SIMPLE).

SIMPLE. Una alternativa al SCREAM es la técnica SIMPLE (siglas en inglés de *micromaquinado de silicio por ataque de plasma de un solo paso*), como se representa en la figura 29.12. Esta técnica utiliza un proceso de ataque de plasma de gas de cloro que maquina en forma anisotrópica silicio dopado *p* o ligeramente dopado, pero de manera isotrópica silicio fuertemente dopado *n*. Así, se puede producir un dispositivo MEMS suspendido en un dispositivo de ataque de plasma, como se muestra en la figura.

Algunas de las consideraciones con el proceso SIMPLE son:

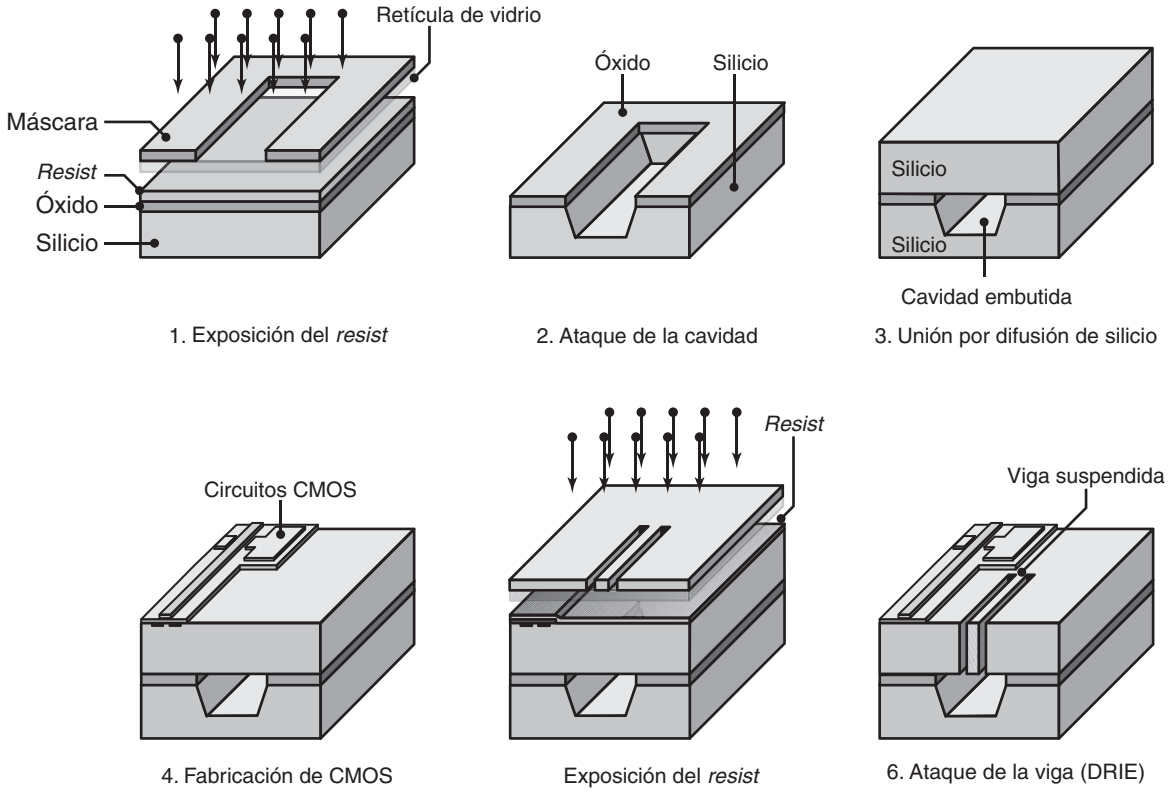
- La máscara de óxido se maquina (aunque a una velocidad más lenta) con el plasma de gas de cloro. Por lo tanto, se requieren máscaras de óxido relativamente gruesas.
- La velocidad de ataque isotrópico es baja, por lo general de 50 nm/min. En consecuencia, es un proceso muy lento.
- La capa debajo de las estructuras desarrolla zanjas profundas, que pueden afectar el movimiento de las estructuras suspendidas.

Ataque (grabado) combinado con unión por difusión. Pueden producirse estructuras muy altas en silicio cristalino mediante una combinación de *unión por difusión de silicio* y *ataque (grabado) profundo de iones reactivos* (SFB-DRIE, por sus siglas en inglés), como se ilustra en la figura 29.13. Primero se prepara una oblea de silicio con una capa de óxido de aislamiento, con las áreas profundas de las zanjas definidas por un procedimiento litográfico estándar. A este paso le sigue el ataque (grabado) convencional en húmedo o en seco para formar una gran cavidad. Una segunda capa de silicio se une por fusión a esta capa, que después puede rectificarse y lapearse a los espesores deseados, en caso necesario. En esta etapa se manufacturan circuitos integrados mediante los pasos que se indican en la figura 28.2. Se aplica y expone un *resist* de protección y se atacan las zanjas deseadas por medio de un ataque profundo de iones reactivos en la cavidad de la primera capa de silicio.

EJEMPLO 29.3 Secuencia de operación y fabricación de una impresora térmica de inyección de tinta

Quizá las impresoras térmicas de inyección de tinta sean hasta ahora la aplicación más exitosa de MEMS. Operan expulsando nano o picolitros (10^{-12} litros) de tinta de una boquilla hacia el papel. Las impresoras de inyección de tinta utilizan varios diseños, pero la tecnología de maquinado de silicio es la más aplicable a las impresoras de alta resolución. Una resolución de 1200 dpi (puntos por pulgada) requiere un espaciado de boquillas de unos 20 μm.

En la figura 29.14 se muestra el modo de operación de una impresora de inyección de tinta. Cuando se va a generar y expulsar una gota de tinta, se calienta una resistencia de tantalio debajo de una boquilla. Ésta calienta una película delgada de tinta de manera que se forma una burbuja en cinco microsegundos (la cual se expande rápidamente) con presiones internas que alcanzan 1.4 MPa (200 psi). El resultado



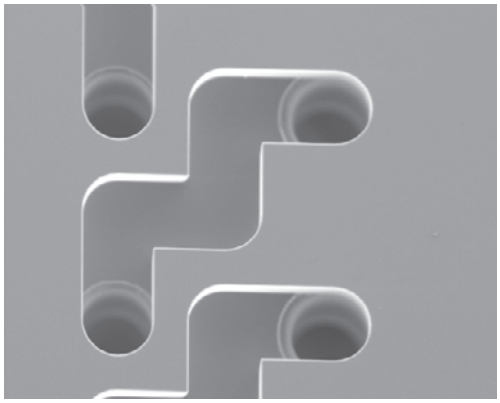


FIGURA 29.13 *(a)* Esquema de unión por difusión de silicio, combinada con ataque (grabado) profundo de iones reactivos para producir vigas grandes en voladizo. *(b)* Dispositivo de flujo de microfluido manufacturado por ataque (grabado) DRIE para separar dos obleas alineándolas y uniéndolas por fusión de silicio. Después, se une anódicamente una capa de Pirex (que no se muestra) sobre la parte superior para suministrar una ventana por la que se observa el flujo del fluido. *Fuente*: *(a)* N. Maluf. *(b)* Cortesía de K. R. Willams, Agilent Technologies.

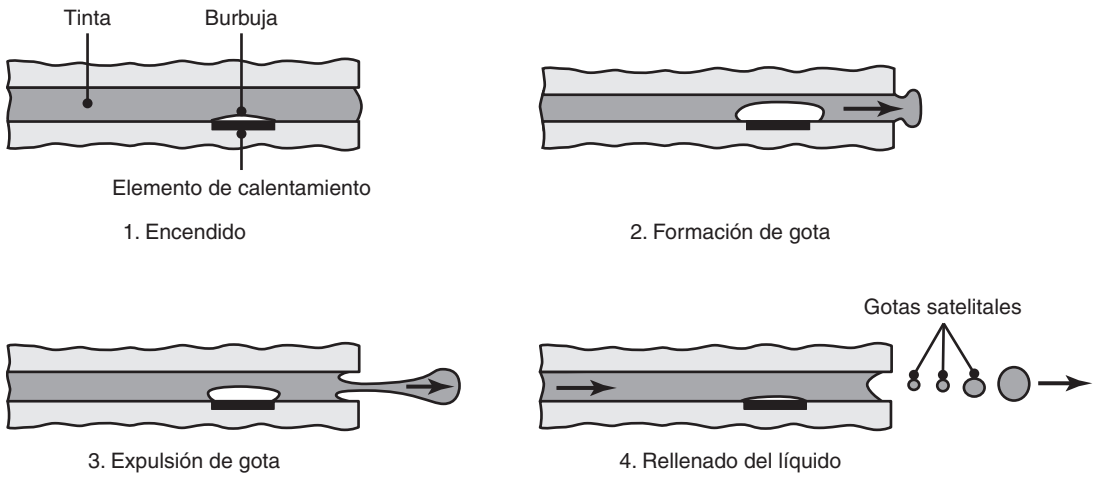


FIGURA 29.14 Secuencia de operación de una impresora térmica de inyección de chorro de tinta. (1) El elemento de calentamiento resistivo se enciende, vaporizando rápidamente la tinta y formando una burbuja. (2) En 5 μm, la burbuja se ha dilatado y desplazado tinta líquida de la boquilla. (3) La tensión superficial rompe la corriente de tinta en una burbuja, que se descarga a alta velocidad. En este momento se apaga el elemento de calentamiento, de manera que la burbuja se colapsa al tiempo que se transfiere calor a la tinta circundante. (4) En 24 μs, se expulsa una gota de tinta (y las gotas satelitales indeseables) y la tensión superficial de la tinta extrae más líquido del depósito. *Fuente*: De Tseng, F.-G., "Microdroplet Generators", *The MEMS Handbook*, M. Gad-el-Hak (ed.), CRC Press, 2002.

es que se fuerza un fluido a salir con rapidez de la boquilla. En 24 μs, la cola de la gota de inyección de tinta se separa debido a la tensión superficial, se retira la fuente de calor (se desactiva) y la burbuja se colapsa en el interior de la boquilla. En un periodo de 50 s, se extrae suficiente tinta de un depósito hacia la boquilla para formar un menisco conveniente para la siguiente gota.

Las cabezas tradicionales de las impresoras de inyección de tinta se fabricaban con boquillas de níquel electroformadas, producidas de manera independiente a los circuitos integrados y requerían una operación de unión para sujetar estos dos componentes. Con el aumento de resolución de las impresoras, es más difícil unir los componentes con una tolerancia de menos de algunas micras. Por esta razón existe el interés de fabricar componentes individuales o monolíticos.

En la figura 29.15 se muestra la secuencia de fabricación de una cabeza monolítica de una impresora de inyección de tinta. Se prepara una oblea de silicio y se recubre con un patrón de vidrio de fosfosilicato (PSG) y un recubrimiento de nitruro de silicio de bajo esfuerzo. El depósito de tinta se obtiene por ataque isotrópico de la parte posterior de la oblea, seguido de la remoción del PSG y el alargamiento del depósito. Después se produce el CMOS (semiconductor de óxido metálico complementario) requerido, que controla los circuitos, y se deposita la placa calentadora de tantalio. Se forma la interconexión de aluminio entre dicha placa y el circuito CMOS y se produce la boquilla mediante ablación por láser. Es posible colocar un arreglo de dichas boquillas en el interior de una cabeza de impresión de inyección de tinta y obtener resoluciones de 2400 dpi o más.

29.3 Proceso de microfabricación LIGA

LIGA es un acrónimo alemán del proceso combinado de litografía por rayos X, electrodeposición y moldeo (**X-ray *li*thographie, *g*alvanoformung und *a*bformung**). En la figura 29.16 se muestra un esquema de este proceso.

El proceso LIGA comprende los siguientes pasos:

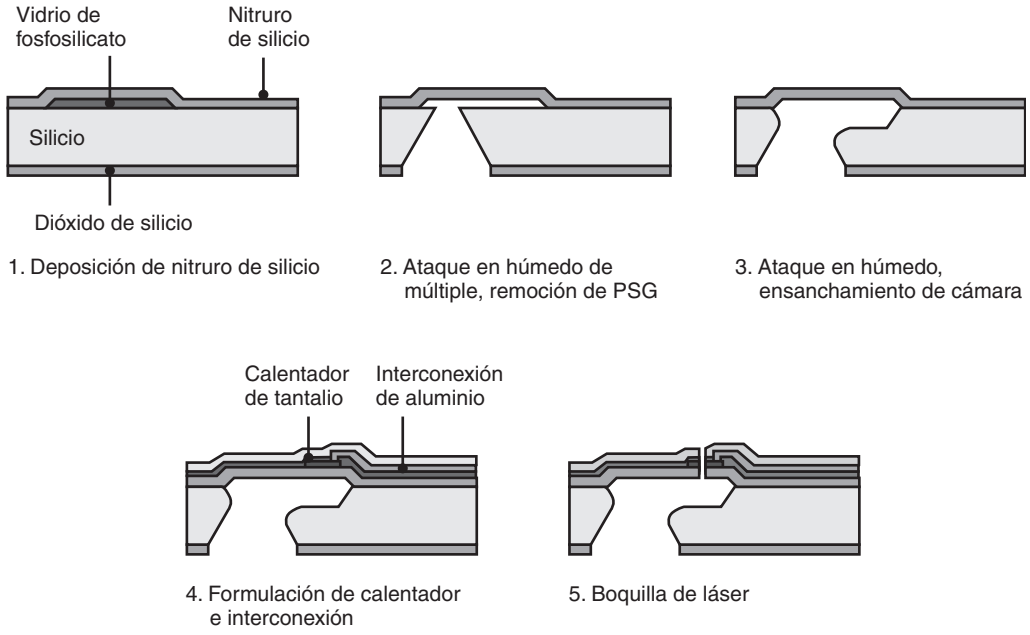


FIGURA 29.15 Secuencia de manufactura para producir cabezas de impresora térmica de inyección de tinta. *Fuente*: De Tseng, F.-G., "Microdroplet Generators", *The MEMS Handbook,* M. Gad-el-Hak (ed.), CRC Press, 2002.

1. Se deposita una capa muy gruesa de *resist* (hasta de cientos de micras) de polimetilmetacrilato (PMMA) sobre un sustrato primario.
2. El PMMA se expone a rayos X en columnas y se desarrolla.
3. Se electrodeposita metal en el sustrato principal.
4. Se elimina o retira el PMMA, lo que produce una estructura metálica que se soporta a sí misma.
5. Se efectúa el moldeo por inyección de plástico.

Dependiendo de la aplicación, el producto final de un proceso LIGA puede consistir en:

- Una estructura metálica que se soporta a sí misma como resultado del proceso de electrodeposición.
- Una estructura moldeada por inyección de plástico.
- Una parte metálica fundida por revestimiento utilizando la estructura moldeada por inyección como pieza en bruto.
- Una parte de material cerámico fundido en barbotina producida con las partes moldeadas por inyección como moldes.

El sustrato utilizado en LIGA es un conductor o aislador cubierto con un conductor. Algunos ejemplos de materiales de sustratos primarios incluyen una placa de acero austenítico, obleas de silicio con una capa de titanio y cobre recubierto con oro, titanio o níquel. También se ha usado material cerámico y vidrio con recubrimiento metálico. La superficie se puede desbastar por chorro de arena abrasiva para fomentar la adhesión apropiada del material resistente.

Los materiales resistentes deben tener alta sensibilidad a los rayos X, resistencia al ataque (*grabado*) en seco y en húmedo cuando no se exponen y estabilidad térmica. El material resistente más común es el polimetilmetacrilato, que tiene un peso molecular muy elevado (más de 10^6 gramos por mol). Los rayos X rompen los enlaces químicos, lo que causa la producción de radicales libres y un peso molecular muy reducido en la región expuesta. Los solventes orgánicos disuelven preferentemente el PMMA expuesto

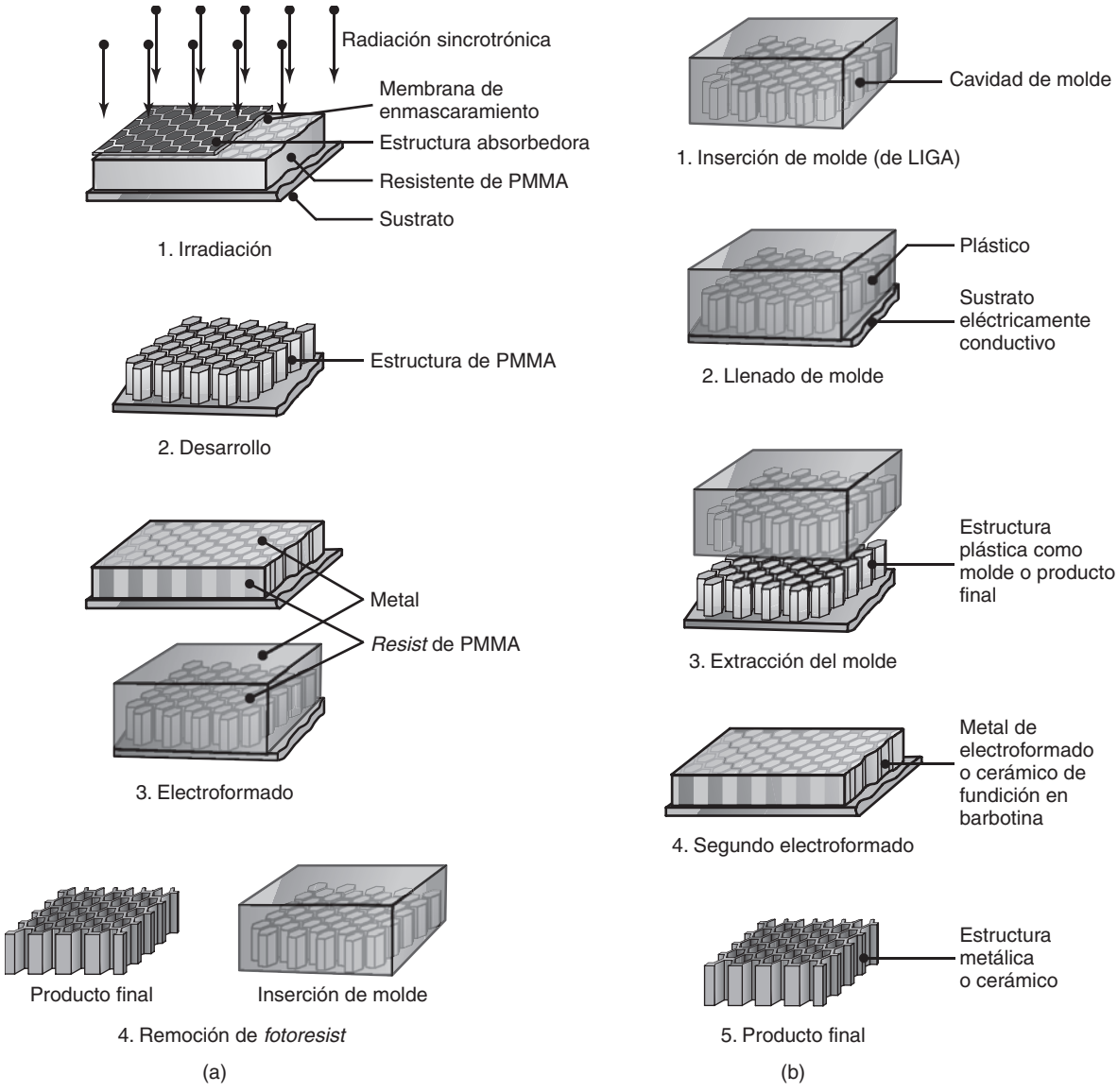


FIGURA 29.16 Técnica de LIGA (litografía, electrodeposición y moldeo). *(a)* Producción primaria de un producto final metálico o inserto de molde. *(b)* Uso de la parte primaria para operaciones secundarias o replicación. *Fuente*: Cortesía de IMM Institut für Mikrotechnik.

mediante un proceso de ataque (grabado) en húmedo. Después de su desarrollo, la estructura tridimensional restante se enjuaga y seca, o se somete a centrifugado y chorro con nitrógeno seco.

Por lo general, la electrodeposición del metal comprende la electrodeposición de una película delgada de níquel. Éste se deposita en áreas expuestas del sustrato; llena la estructura de PMMA e incluso puede recubrir el *resist* (fig. 29.16a). El níquel es el material elegido debido a la relativa facilidad de electrodepositar películas delgadas con velocidades de deposición bien controladas. También es posible recubrir con níquel sin electricidad y puede depositarse en forma directa sobre los sustratos aislados eléctricamente. Sin embargo, debido a que el níquel presenta altas velocidades de desgaste en los MEMS, se han enfocado importantes investigaciones hacia el uso de otros materiales o recubrimientos.

Después de depositar la estructura metálica, el rectificado de precisión retira el material del sustrato o una capa de níquel depositado, a lo que se conoce como *planarización* (produciendo una superficie plana; ver la sección 28.10). La necesidad de planarización es obvia cuando se reconoce que los dispositivos MEMS tridimensionales requieren tolerancias micrométricas en capas de muchos cientos de micras de espesor. Es difícil lograr la planarización; el lapeado convencional produce una remoción preferencial de PMMA blando y manchado del metal. Por lo general, la planarización se logra con un procedimiento de lapeado de diamante conocido como *nanorrectificado*. En éste, se utiliza una placa metálica blanda con carga de lodo de diamante para retirar material a fin de mantener la planicidad en 1 μm (40 μpulg) sobre un sustrato de 75 mm (3 pulgadas) de diámetro.

Si es de cadena cruzada, el *resist* de PMMA se expone a radiación sincrotrónica de rayos X y se retira por medio de exposición a un plasma de oxígeno o mediante la extracción por solvente. El resultado es una estructura metálica que puede utilizarse para procesamiento posterior. En la figura 29.17 se muestran ejemplos de estructuras metálicas de autosoporte producidas por electrodeposición de níquel.

Los pasos del proceso utilizados para fabricar estructuras metálicas de soporte propio consumen demasiado tiempo y son muy costosos. La ventaja principal de LIGA es que estas estructuras sirven como moldes para la rápida replicación de rasgos micrométricos mediante operaciones de moldeo. En la tabla 29.1 se muestran y comparan los procesos que se pueden usar para producir micromoldes; es posible ver que LIGA proporciona ciertas ventajas obvias. También se han empleado el moldeo por inyección de reacción, el moldeo por inyección y el moldeo por compresión, para fabricar estos micromoldes (ver capítulo 19).

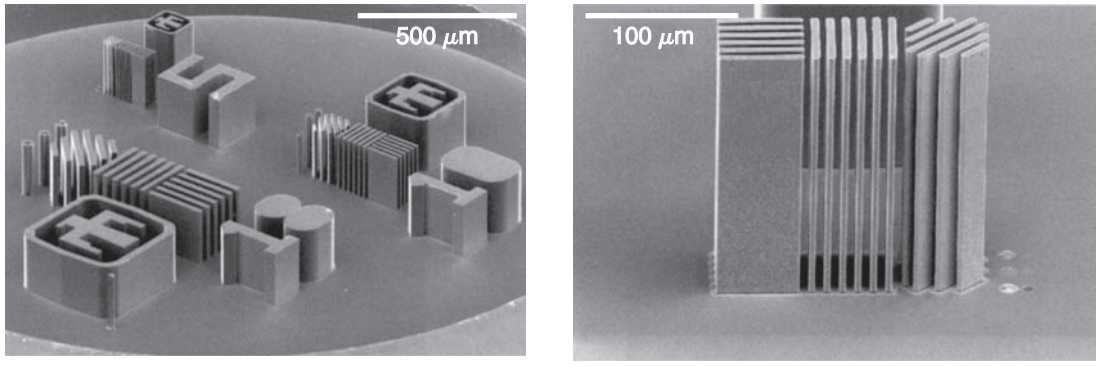


FIGURA 29.17 *(a)* Estructuras de níquel electroformadas de 200 μm de alto; *(b)* detalle de líneas y espacios de níquel de 5 μm de ancho. *Fuente*: T. Christenson, *MEMS Handbook*, CRC Press, 2002.

TABLA 29.1

Comparación de técnicas de manufactura de micromoldes

	Técnica de producción		
	LIGA	Maquinado con láser	EDM
Relación de aspecto	10-50	10	Hasta 100
Rugosidad superficial	<50 nm	100 nm	0.3–1 μm
Precisión	<1 μm	1–3 μm	1–5 μm
¿Requiere máscara?	Sí	No	No
Altura máxima	1–500 μm	200–500 μm	Micra a milímetros

Fuente: Weber, L., Ehrfeld, W., Freimuth, H., Lacher, M., Lehr, M. y Pech, P., *SPIE Micromachining and Microfabrication Process Technology II*, Austin, Texas, 1996 y K. R. Williams, Agilent Laboratories.

EJEMPLO 29.4 Producción de imanes de tierras raras

Varios problemas de escamas en los dispositivos electromagnéticos indican que existe una ventaja en el uso de imanes de tierras raras de las familias de cobalto de samario (SmCo) y neodimio hierro boro (NdFeB), disponibles en forma de polvo. Son de interés debido a que pueden producir imanes con un orden de magnitud más poderoso que los imanes convencionales (tabla 29.2). Estos materiales pueden utilizarse cuando se van a producir transductores electromagnéticos miniatura efectivos.

En la figura 29.18 se muestran los pasos de procesamiento para manufacturar estos imanes. El molde de polimetilmetacrilato se produce por exposición a la radiación de rayos X y extracción por medio de solventes. Los polvos de tierras raras se mezclan con un aglutinante epóxico y se aplican al molde de PMMA mediante una combinación de calandreado (ver fig. 19.22) y prensado. Después de curar el sustrato en una prensa a una presión de alrededor de 70 MPa (10 ksi), se planariza. Luego, el sustrato se somete a un campo magnético de por lo menos 35 kilo-oerstedios (kOe) en la orientación deseada. Una vez que el material se ha magnetizado, se disuelve el sustrato de PMMA, dejando los imanes de tierras raras, como se muestra en la figura 29.19.

Fuente: Cortesía de T. Christenson, Sandia National Laboratories.

TABLA 29.2

Comparación de propiedades de materiales de imanes permanentes

Material	Producto de energía (Gauss-Oersted $\times 10^{-6}$)
Acero al carbono	0.20
Acero al cobalto 36%	0.65
Alnico I	1.4
Vicalloy I	1.0
Platino-cobalto	6.5
$Nd_2Fe_{14}B$, totalmente denso	40
$Nd_2Fe_{14}B$, aglutinado	9

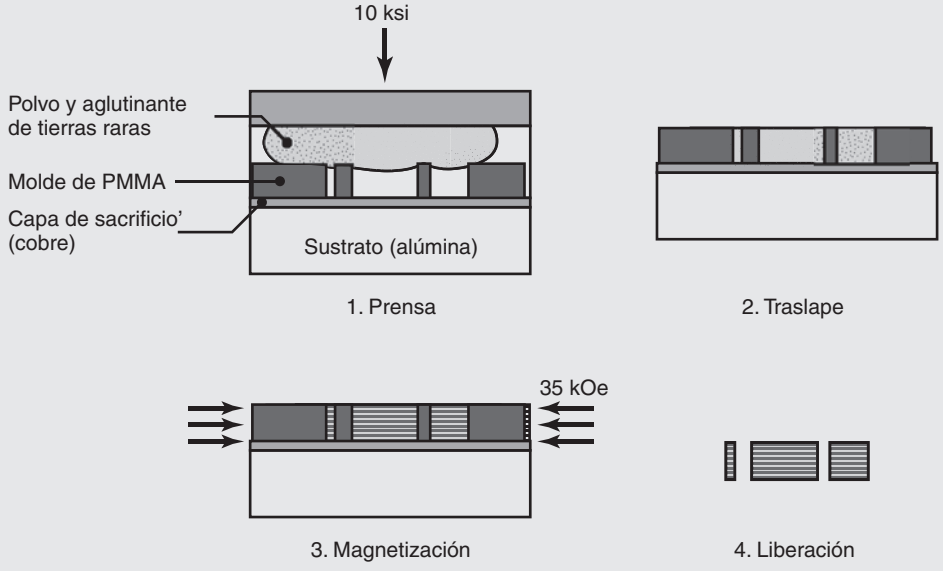
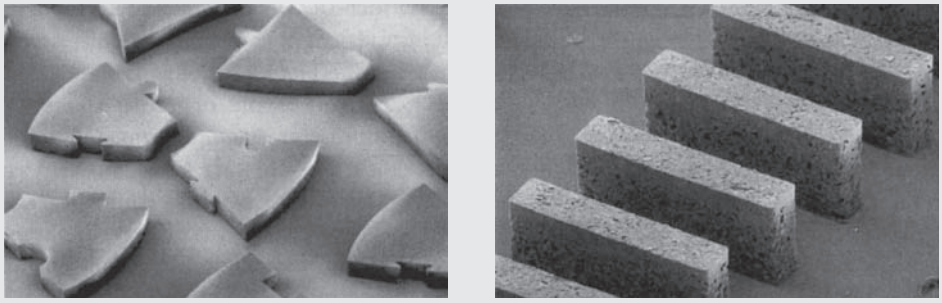


FIGURA 29.18 Proceso de fabricación utilizado para producir imanes de tierras raras para microsensores. *Fuente*: Cortesía de T. Christenson, Sandia National Laboratories.

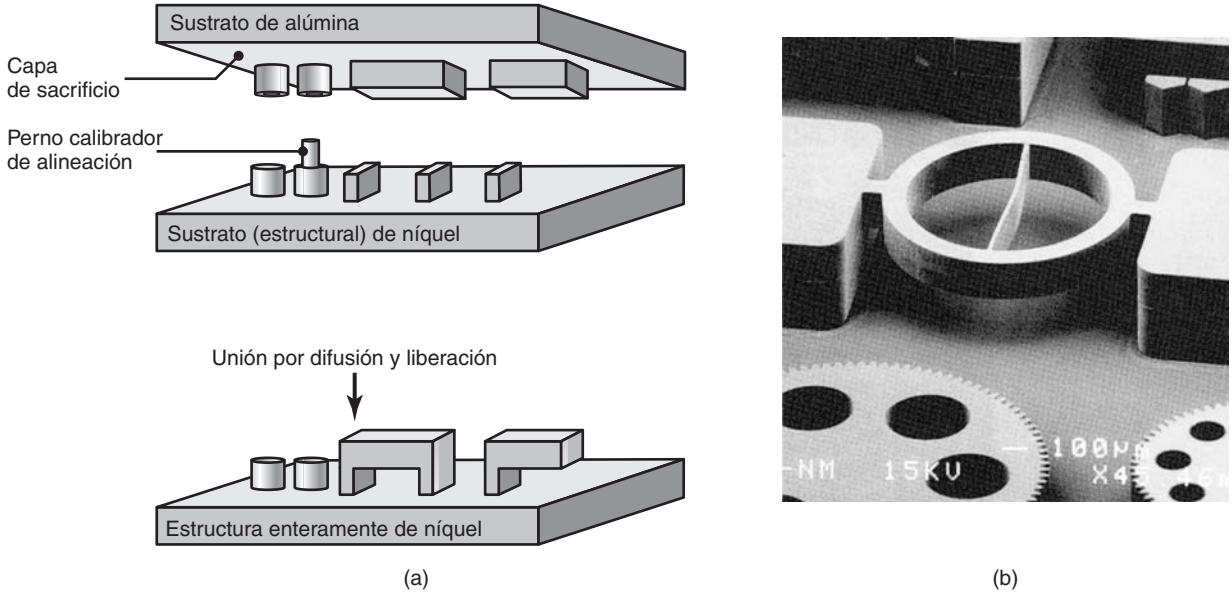


(a) (b)

FIGURA 29.19 Imágenes de SEM de imanes permanentes de $Nd_2Fe_{14}B$. El tamaño de las partículas de polvo va de 1 a 5 μm y el aglutinante es una epóxica resistente al cloruro de metileno. Existe una distorsión moderada en la imagen, debido a la perturbación magnética de los electrones de imagen. Con este proceso se han obtenido productos con una energía máxima de 9 MGOe. *Fuente*: Cortesía de T. Christenson, Sandia National Laboratories.

Litografía de rayos X multicapas. La técnica LIGA es muy poderosa para producir dispositivos MEMS con relaciones de aspecto grandes y formas reproducibles. A menudo es útil obtener una estructura escalonada multicapa que no se puede hacer producir directamente mediante LIGA. Para geometrías sin salientes o voladizos, puede aplicarse electrodepósito directo. Con esta técnica, se produce una capa de un metal electrodepositado con PMMA circundante, como ya se indicó. Después se une una segunda capa de *resist* de PMMA a esta estructura y se expone a los rayos X con una máscara de rayos X alineados.

A menudo es útil tener geometrías con salientes en dispositivos MEMS complejos. Para este propósito se ha desarrollado un procedimiento de unión por difusión en lotes y liberación, como se esquematiza en la figura 29.20a. Este proceso comprende la prepara-



(a) (b)

FIGURA 29.20 *(a)* Esquema de fabricación de MEMS de niveles múltiples por unión por difusión a escala de oblea. *(b)* Estructura de anillo suspendido para medición de deformación por tensión, formado mediante la unión por difusión de dos capas a escala de oblea. *Fuente*: *(b)* Cortesía de T. Christenson, Sandia National Laboratories.

ción de dos capas de PMMA modeladas y electroformadas, retirando posteriormente el PMMA. Después, las obleas se alinean cara a cara con pernos guía que se ajustan a presión en estructuras complementarias en la superficie opuesta. Luego se unen los sustratos en una prensa caliente y se ataca (retirándola) una capa de sacrificio en uno de los sustratos, dejando unida una capa a la otra. En la figura 29.20b se muestra un ejemplo de dicha estructura.

HEXSIL. El proceso *HEXSIL*, que se ilustra en la figura 29.21, combina estructuras de panal *hex*agonales, micromaquinado de *sil*icio y deposición de una película delgada para producir estructuras que se soportan por sí mismas, con relación de aspecto elevada. El HEXSIL puede producir estructuras altas con una definición de forma que compite con LIGA.

En HEXSIL, primero se produce una zanja profunda en silicio monocristalino utilizando ataque (grabado) en seco, seguido de ataque en húmedo poco profundo para hacer que las paredes de la zanja sean más lisas. La profundidad de la zanja coincide con la altura deseada de la estructura y se limita prácticamente a alrededor de 100 μm. Después se hace crecer o se deposita una capa de óxido en el silicio, seguida de una capa de silicio policristalino sin dopar, que produce un buen llenado del molde y una buena definición de forma. Sigue una capa de silicio dopado, que proporciona una parte resistiva del mi-

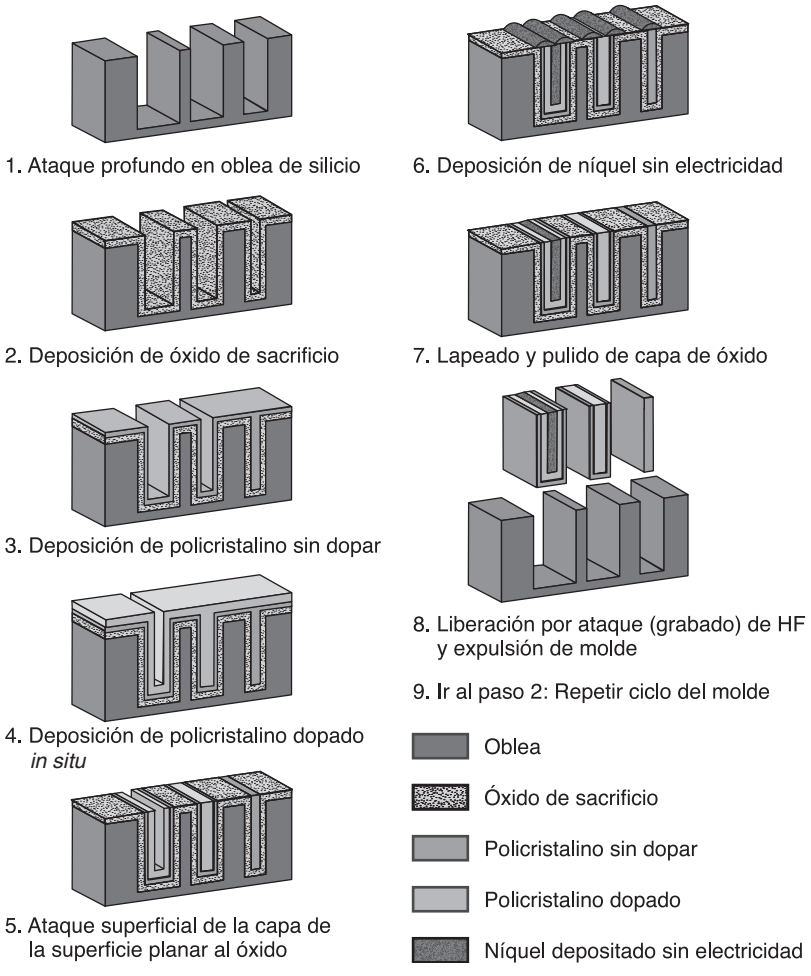
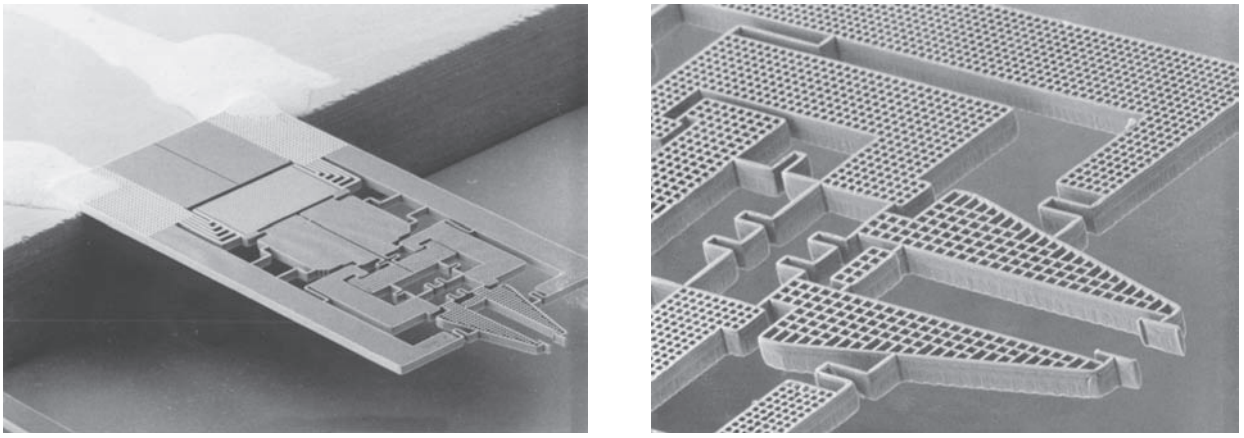


FIGURA 29.21 Esquema de la estructura de panal *hexa*gonal, micromaquinado de *sil*icio y deposición de película delgada: proceso HEXSIL.



(a) (b)

FIGURA 29.22 *(a)* Imagen de SEM de pinzas a microescala utilizadas en aplicaciones de microensamble y microcirugía. *(b)* Vista detallada del sujetador. *Fuente*: Cortesía de MEMS Precision Instruments (memspi.com).

crodispositivo. Después se deposita una placa de níquel por depósito sin electricidad o por electrodeposición. En la figura 29.21 se muestran diversas anchuras de zanja para demostrar las diferentes estructuras que se pueden producir mediante HEXSIL.

En la figura 29.22 se presentan unas pinzas a microescala producidas mediante el proceso HEXSIL. Estas pinzas utilizan una barra activada térmicamente que activa las pinzas. Se usan para aplicaciones de microensamble y microcirugía.

29.4 Fabricación sin materia sólida de dispositivos

La *fabricación sin materia sólida* es otro término empleado para elaborar prototipos rápidos, como se describe en el capítulo 20. Este método es único porque las estructuras tridimensionales complejas se producen mediante manufactura aditiva, en oposición a la remoción de material. Muchos avances en la elaboración rápida de prototipos también son aplicables a la manufactura de MEMS para procesos con resolución suficientemente alta. Recuérdese que la *estereolitografía* comprende el curado de un polímero termofijo líquido utilizando un fotoiniciador y una fuente de luz muy concentrada. La estereolitografía convencional usa capas entre 75 y 500 μm de espesor con punto de láser enfocado en un diámetro de 0.05 mm a 0.25 mm.

Microestereolitografía. En la *microestereolitografía,* el proceso utiliza la misma técnica básica que en la estereolitografía (ver sección 20.3.2). Sin embargo, existen diferencias importantes entre ambas, incluyendo:

- El láser se concentra aún más (hasta un diámetro de 1 μm), en comparación con la cifra de 10 a más de 100 μm en la estereolitografía.
- Los espesores de capa son de alrededor de 10 μm, que es un orden de magnitud más pequeño que en la estereolitografía.
- Los fotopolímeros utilizados deben tener viscosidades inferiores para asegurar la formación de capas uniformes.
- Las estructuras de soporte no son necesarias en la microestereolitografía, ya que se pueden soportar estructuras más pequeñas con el fluido de manera apropiada.

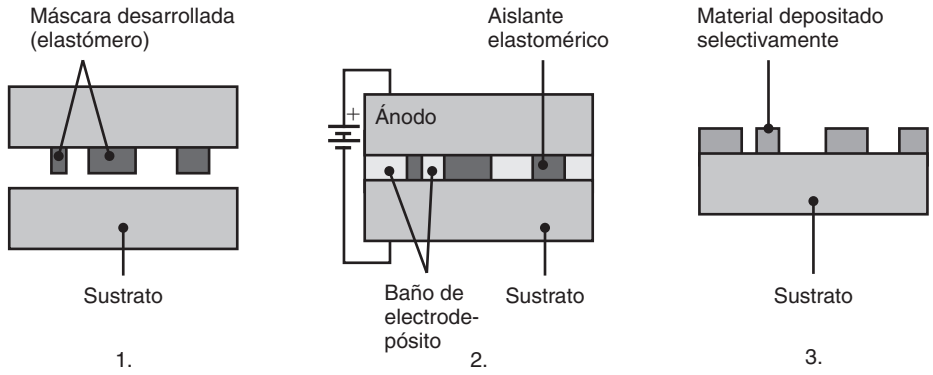


FIGURA 29.23 Proceso de enmascaramiento instantáneo: (1) sustrato sin revestir; (2) durante la deposición con el sustrato y la máscara instantánea en contacto; (3) depósito del patrón resultante. *Fuente*: Cortesía de A. Cohen, MEMGen Corporation.

- Las partes con contenido metálico y cerámico significativo se pueden producir suspendiendo nanopartículas en el fotopolímero líquido.

La técnica de microestereolitografía tiene muchas ventajas en el costo, pero los dispositivos MEMS fabricados por este método son difíciles de integrar en los circuitos de control.

Fabricación electroquímica. El enmascaramiento instantáneo es una técnica para producir dispositivos MEMS (fig. 29.23). La fabricación sin materia sólida de dispositivos MEMS utilizando enmascaramiento instantáneo se llama *fabricación electroquímica* (EFAB, por sus siglas en inglés). Primero se produce una máscara de material elastomérico por medio de las técnicas de fotolitografía convencional descritas en la sección 28.7. La máscara se prensa contra el sustrato en un baño de electrodeposición, de manera que el elastómero se conforma al sustrato y excluye la solución de deposición de áreas de contacto. La electrodeposición ocurre en las áreas que no están enmascaradas, produciendo al final una imagen idéntica a la de la máscara. Mediante un relleno de sacrificio fabricado de un segundo material, se pueden producir formas tridimensionales complejas completas con voladizos, arcos y otros rasgos, usando la tecnología de enmascaramiento instantáneo.

ESTUDIO DE CASO 29.1 Acelerómetro para bolsas de aire automotrices

En la actualidad, los acelerómetros basados en resonadores laterales representan la aplicación comercial más grande de micromaquinado de superficies y se utilizan ampliamente como sensores para sistemas de apertura de bolsas de aire en automóviles. En la figura 29.24 se muestra la parte del sensor de dicho acelerómetro. Se suspende una masa central sobre el sustrato pero se ancla a través de cuatro vigas delgadas, que actúan como resortes para centrar la masa en condiciones de equilibrio estático. Una aceleración provoca que la masa se mueva, reduciendo o aumentando el espacio entre las aletas en la masa y los dedos estacionarios en el sustrato. Si se mide la capacitancia eléctrica entre la masa y las aletas, puede medirse directamente la deflexión de la masa (y, por lo tanto, la aceleración o desaceleración del sistema). En la figura 29.24 se muestra un arreglo de la medición de aceleración en una dirección, pero los sensores comerciales emplean diversas masas de manera que las aceleraciones se pueden medir en múltiples direcciones en forma simultánea.

En la figura 29.25 se presenta el acelerómetro de superficie micromaquinada de 50 g (ADXL-50) con acondicionamiento de señales a bordo y electrónica de autodiag-

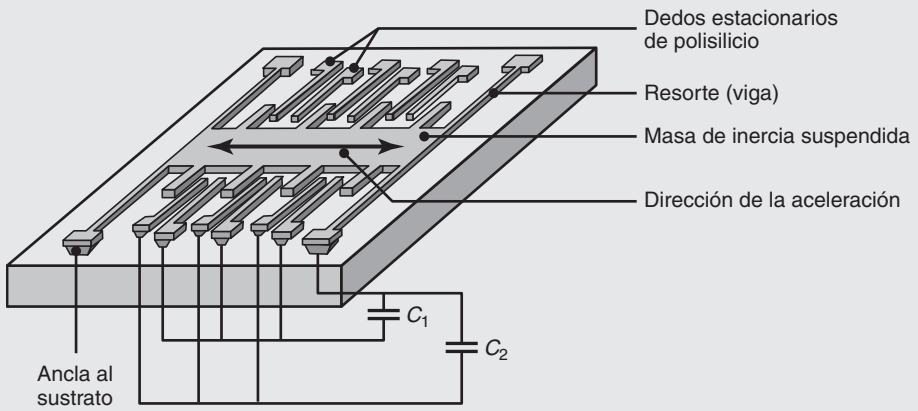


FIGURA 29.24 Esquema de un sensor de microaceleración. *Fuente*: N. Maluf.

nóstico. El elemento sensor de polisilicio (visible en el centro del dado) ocupa sólo 5% del área total del dado y todo el chip mide 500 × 625 μm (0.020 × 0.025 pulgada). La masa es de casi 0.3 μg y el sensor tiene una precisión de medición de 5% sobre un intervalo de ±50 g.

La fabricación del acelerómetro demostró ser un desafío, ya que se requería integrar una secuencia de fabricación de un *semiconductor de óxido metálico complementario* (CMOS) estrechamente con un método de micromaquinado de superficies. Analog Devices, Inc., pudo modificar una técnica de producción de CMOS para incorporar directamente el micromaquinado de superficies. En el diseño del sensor, pasos inferiores *n*+ conectan el área del sensor a los circuitos electrónicos, reemplazando las líneas usuales de conexión de aluminio sensibles al calor. La mayor parte del procesamiento del detector se inserta en el proceso de fabricación justo después de una planarización de vidrio de borosilicato.

Después de la planarización, se despeja una región designada de detector o *foso* en el centro del dado (fig. 29.26a). Luego se deposita un óxido delgado para pasivar

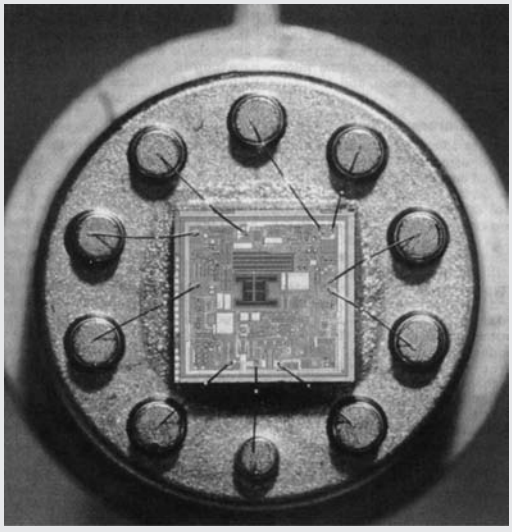


FIGURA 29.25 Fotografía de acelerómetro ADXL-50 de Analog Devices con un sensor capacitivo micromaquinado (al centro), excitación en el chip, circuitos de autodiagnóstico y acondicionamiento de señales. Todo el chip mide 0.500 × 0.625 mm. *Fuente*: De R. A. Core, entre otros, *Solid State Technology,* páginas 39-47, octubre de 1993.

las conexiones de paso inferior $n+$, seguido de un nitruro delgado, depositado mediante vapor químico de baja presión (LPCVD) que actúa como paro de ataque para el ataque final del polisilicio liberado (fig. 29.26b). El espaciador u óxido de sacrificio utilizado es un óxido de baja temperatura densificado de 1.6 μm (64 μpulg) (LTO, por sus siglas en inglés), depositado sobre todo el dado (fig. 29.26c).

En un primer ataque (grabado), se crean pequeñas depresiones que forman protuberancias u hoyuelos en la parte inferior del sensor de polisilicio en la capa de LTO. Estas protuberancias limitan las fuerzas de adhesión y la adherencia en caso de que el sensor entre en contacto con el sustrato. Un ataque posterior corta las anclas en la capa espaciadora para proporcionar regiones de contacto eléctrico y mecánico (fig. 29.26c). Se deposita, implanta, recoce y modela el sensor de 2 μm (80 μpulg) de espesor de la capa de polisilicio (fig. 29.27a).

Sigue la metalización, que se inicia con la remoción del óxido espaciador de sacrificio del área del circuito, junto con nitruro LPCVD y la capa de LTO. Se deposita un óxido de temperatura baja sobre la parte de polisilicio del sensor y aparecen aberturas de contacto en la parte del circuito integrado del dado, donde se deposita platino para formar siliciuro de platino (fig. 29.27b). Se depositan por chisporroteo y se mo-

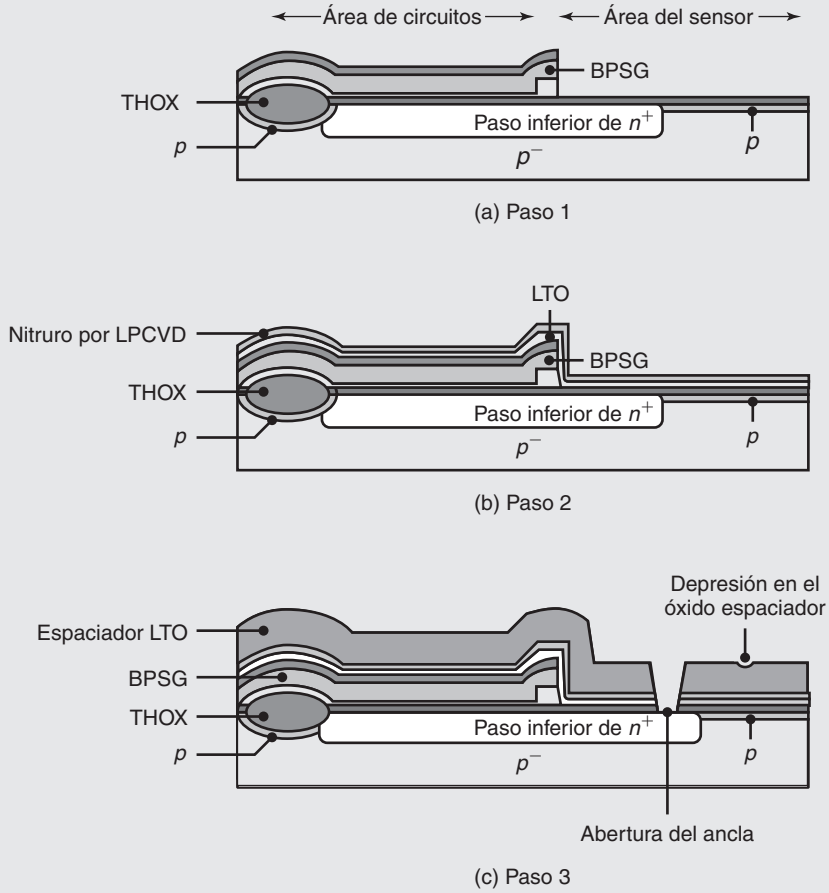


FIGURA 29.26 Preparación de chip de IC para polisilicio. *(a)* Planarización posterior al BPSG del área del sensor y máscara del foso. *(b)* Deposición de capa de óxido delgado y capa delgada de nitruro. *(c)* Protuberancias y anclas fabricadas en una capa espaciadora de LTO. *Fuente*: De R. A. Core, entre otros, *Solid State Technology,* páginas 39-47, octubre de 1993.

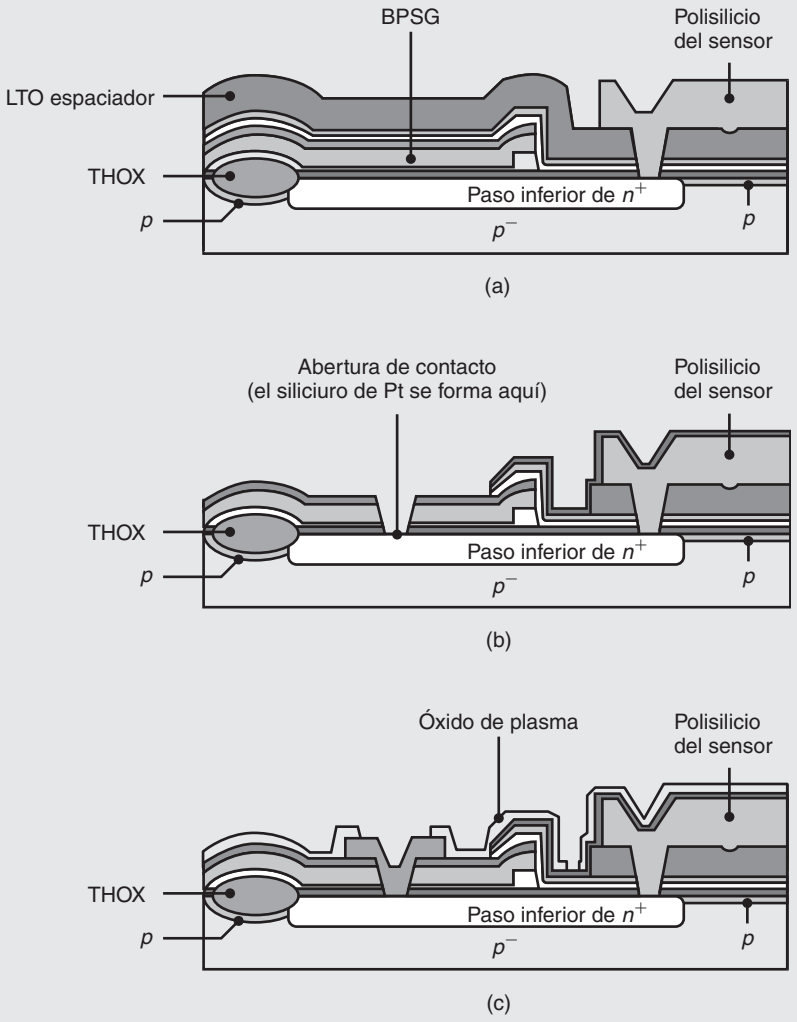


FIGURA 29.27 Deposición de polisilicio y metalización de IC. *(a)* Vista transversal después de deposición, implantación, recocido y modelado del polisilicio. *(b)* Área del sensor después de la remoción de dieléctricos del área de circuitos, máscara de contacto y siliciuro de platino. *(c)* Esquema de metalización y pasivación y modelado de óxido de plasma. *Fuente*: De R. A. Core, entre otros, *Solid State Technology*, páginas 39-47, octubre de 1993.

dela el material de la película delgada recortable, una barrera metálica de TiW y el metal de interconexión de Al/Cu, sobre el área del circuito integrado.

Después se pasiva el área del circuito en dos pasos de deposición por separado. Primero, se deposita y modela óxido mediante plasma (fig. 29.27c). Luego sigue un nitruro por medio de plasma (fig. 29.28a) para formar un sello con el nitruro ya depositado mediante LCVD. El nitruro actúa como una barrera para el ácido fluorhídrico en la siguiente liberación por ataque en el micromaquinado de la superficie. El óxido de plasma que queda en el sensor actúa como un paro de ataque para la remoción del nitruro de plasma (fig. 29.28a). Después se prepara el área del sensor para el ataque final de liberación. Se retiran los dieléctricos del detector y se aplica la pantalla

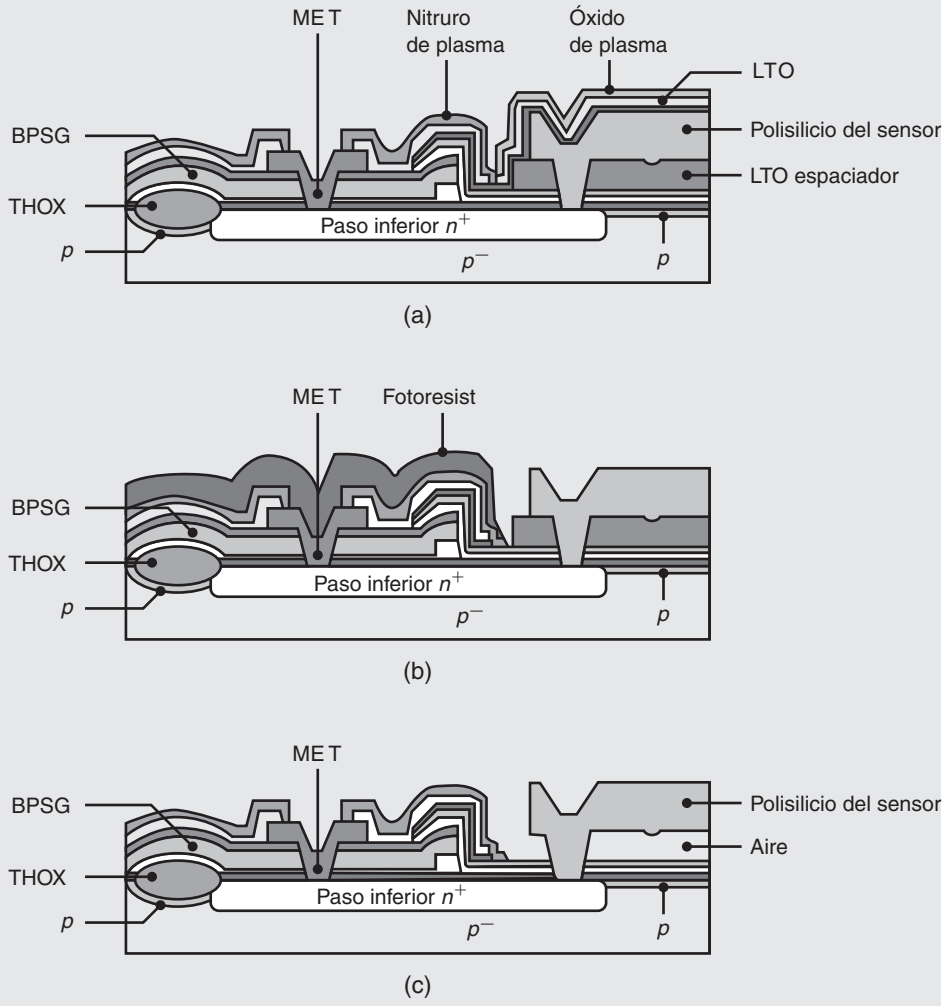


FIGURA 29.28 Preparación de preliberación y liberación. (a) Etapa posterior a la pasivación con nitruro de plasma y modelado. (b) Protección con fotoresist del IC. (c) Viga de polisilicio liberada, sostenida por sí misma. *Fuente:* De R.A. Core, entre otros, *Solid State Technology*, pp. 39-47, octubre de 1993.

de *resist* de protección final. El *fotoresist* protege el área de los circuitos del ataque reducido de largo plazo del óxido (fig. 29.28b). En la figura 29.28c se muestra la sección transversal del dispositivo final.

Fuente: Adaptado de M. Madou, *Fundamentals of Microfabrication*, 2ª. ed., CRC Press, 2002.

RESUMEN

- El campo de los MEMS es relativamente nuevo y se desarrolla con rapidez. Las aplicaciones comerciales más exitosas de los MEMS se encuentran en las industrias óptica, de impresión y de sensores. Las posibilidades de nuevos conceptos de dispositivos y diseños de circuitos parecen ser infinitas.
- Los dispositivos MEMS se manufacturan mediante técnicas y con materiales que (en la mayoría de los casos) han sido pioneros en la industria de la microelectrónica. El

micromaquinado volumétrico y el de superficies son procesos que están bien desarrollados para el silicio monocristalino.
- Los procesos especializados de MEMS incluyen variaciones de maquinado, como DRIE, SIMPLE y SCREAM. Estos procesos producen estructuras mecánicas de silicio que se soportan por sí mismas.
- Los MEMS de polímeros se pueden manufacturar mediante LIGA o microestereolitografía. LIGA combina la litografía de rayos X y el electroformado para producir estructuras tridimensionales. Los procesos relacionados con éste incluyen la litografía de rayos X de multicapas y HEXSIL.

TÉRMINOS CLAVE

EFAB
Fabricación electroquímica
Fricción estática
HEXSIL
LIGA
Litografía de rayos X de multicapas
MEMS
Microestereolitografía
Micromaquinado
Micromaquinado de superficies
Micromaquinado volumétrico
Planarización
SCREAM
SIMPLE
Unión por difusión

BIBLIOGRAFÍA

Bakoglu, H. B., *Circuits, Interconnections, and Packaging for VLSI*, Addison-Wesley, 1990.

Berger, L. I., *Semiconductor Materials*, CRC Press, 1997.

Brar, A. S. y Narayan, P. B., *Materials and Processing Failures in the Electronics and Computer Industries*: *Analysis and Prevention*, ASM International, 1993.

Campbell, S. A., *The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication*, Oxford, 1996.

Chandrakasan, A. y Brodersen, R. (eds.), *Low Power CMOS Design*, IEEE, 1998.

Chandrakasan, A. y Brodersen, R., *Low Power Digital CMOS Design*, Kluwer, 1995.

Chang, C.-Y. y Sze, S. M. (eds.), *ULSI Devices,* Wiley-Interscience, 2000.

Colclaser, R. A., *Microelectronics: Processing and Device Design*, Wiley, 1980.

Electronic Materials Handbook, Vol. 1: *Packaging*, ASM International, 1989.

Elwenspoek, M. y Jansen, H., *Silicon Micromachining*, Cambridge University Press, 1998.

Elwenspoek, M. y Wiegerink, R., *Mechanical Microsensors*, Springer, 2001.

Gad-el-Hak, M. (ed.), *The MEMS Handbook*, CRC Press, 2002.

Ghandhi, S. K., *VLSI Fabrication Principles*, 2a. ed., Wiley-Interscience, 1993.

Griffin, P. B., Plummer, J. D. y Deal, M. D., *Silicon VLSI Technology: Fundamentals, Practice and Modeling*, Prentice Hall, 2000.

Harper, C. A. (ed.), *Electronic Packaging and Interconnection Handbook*, 3a. ed., McGraw-Hill, 2000.

_____, *High-Performance Printed Circuit Boards*, McGraw-Hill, 2000.

Hwang, J. S., *Modern Solder Technology for Competitive Electronics Manufacturing*, McGraw-Hill, 1996.

Javits, M. W. (ed.), *Printed Circuit Board Materials Handbook*, McGraw-Hill, 1997.

Judd, M. y Brindley, K., *Soldering in Electronics Assembly*, 2a. ed., Newnes, 1999.

Kovacs, G. T. A., *Micromachined Transducers Sourcebook*, McGraw-Hill, 1998.

Madou, M. J., *Fundamentals of Microfabrication*, CRC Press, 2a. ed., 2002.

Mahajan, S. y Harsha, K. S. S., *Principles of Growth and Processing of Semiconductors*, McGraw-Hill, 1998.

Maluf, N., *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering*, Artech House, 2000.

Manko, H. H., *Soldering Handbook for Printed Circuits and Surface Mounting*, Van Nostrand Reinhold, 1995.

Matisoff, B. S., *Handbook of Electronics Manufacturing*, 3a. ed., Chapman & Hall, 1996.

Nishi, Y. y Doering, R. (eds.), *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technologies*, Marcel Dekker, 2000.

Pierret, R. F. y Neudeck, G. W., *Semiconductor Device Fundamentals*, Addison-Wesley, 1996.

Quirk, M. y Serda, J., *Semiconductor Manufacturing Technology*, Prentice Hall, 2000.

Sze, S. M. (ed.), *Modern Semiconductor Devices Physics*, Wiley, 1997.

_____, *Semiconductor Devices: Physics and Technology*, Wiley, 2001.

Taur, Y. y Ning, T. H., *Fundamentals of Modern VLSI Devices*, Cambridge, 1998.
van Zant, P., *Microchip Fabrication: A Practical Guide to Semiconductor Processing*, 4a. ed., McGraw-Hill, 2000.
Varadan, V. K., Jiang, X. y Varadan, V., *Microstereolithography and other Fabrication Techniques for 3D MEMS*, Wiley, 2001.
Wise, K. D. (ed.), *Special Issue on Integrated Sensors, Microactuators and Microsystems (MEMS)*, Proceedings of the IEEE, 1998.
Wolf, S. y Tauber, R. N., *Silicon Processing for the VSLI Era: Process Technology*, 2a. ed., Lattice Press, 1999.
Yeap, G., *Practical Low Power Digital VLSI Design*, Kluwer, 1997.

PREGUNTAS DE REPASO

29.1 Defina MEMS.

29.2 ¿Por qué frecuentemente se utiliza silicio con MEMS y los dispositivos MEMS?

29.3 Describa micromaquinado volumétrico y de superficies.

29.4 ¿Cuál es el propósito de una capa espaciadora en el micromaquinado de superficies?

29.5 ¿Qué significan SIMPLE y SCREAM?

29.6 Compare el ataque (grabado) en húmedo y en seco.

29.7 ¿Cuál es la limitación principal para la aplicación exitosa de MEMS?

29.8 ¿Qué es la Ley de Moore?

29.9 ¿Cuáles son las aplicaciones comunes de MEMS y los dispositivos MEMS?

29.10 ¿Qué es LIGA? ¿Cuáles son sus ventajas?

29.11 ¿Qué proceso o procesos en este capítulo permiten la fabricación de productos de polímeros?

29.12 ¿Qué es una capa de sacrificio?

29.13 ¿Qué es HEXSIL?

29.14 ¿Cuáles son las diferencias entre la estereolitografía y la microestereolitografía?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

29.15 ¿Cuál es la diferencia entre ataque (grabado) isotrópico y anisotrópico?

29.16 La litografía produce formas proyectadas, de manera que es más difícil producir las formas tridimensionales reales. ¿Qué procesos de litografía son más capaces de producir formas tridimensionales, como los lentes?

29.17 ¿Cuál es la diferencia entre un ataque (grabado) químico con iones reactivos y un ataque de plasma en seco?

29.18 Los dispositivos MEMS tratados en este capítulo aplican a elementos de máquinas a macroescala, como engranes rectos, bisagras y vigas. ¿Cuáles de los siguientes elementos de máquinas pueden y no pueden aplicarse a MEMS, y por qué? *(a)* rodamientos de bolas, *(b)* engranes cónicos; *(c)* engranes sin fin; *(d)* levas; *(e)* resortes helicoidales; *(f)* remaches, y *(g)* pernos.

29.19 En relación con la figura 28.20, dibuje los orificios generados con una máscara circular.

29.20 Explique cómo produciría un engrane recto si su espesor fuera de una décima de su diámetro y su diámetro fuera *(a)* 10 μm; *(b)* 100 μm; *(c)* 1 mm; *(d)* 10 mm, y *(e)* 100 mm.

29.21 Liste las ventajas y desventajas del micromaquinado de superficies en comparación con el micromaquinado volumétrico.

29.22 ¿Cuáles son las principales limitaciones del proceso LIGA?

29.23 ¿Qué otros procesos distintos al HEXSIL pueden utilizarse para hacer las micropinzas de la figura 29.22?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

29.24 Un *fotoresist* de poliamida necesita 100 mJ/cm^2 por micra de espesor para desarrollarse apropiadamente. ¿Cuánto tiempo necesita una película de 150 μm para desarrollarse si se expone mediante una fuente de luz de 1000 W/m^2?

29.25 Calcule la socavación en el ataque (grabado) de una zanja de 10 μm de profundidad si la relación anisotrópica es: *(a)* 200; *(b)* 2, y *(c)* 0.5. ¿Cuál es la pendiente de las paredes laterales para estos casos?

29.26 ¿Cuántos niveles se necesitan para producir el micromotor mostrado en la figura 28.19d?

29.27 Investigue en Internet y determine el orificio de diámetro más pequeño que se puede producir mediante *(a)* taladrado, *(b)* troquelado; *(c)* corte por inyección de agua; *(d)* maquinado con láser; *(e)* ataque (grabado) químico, y *(f)* EDM.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

29.28 Liste las similitudes y diferencias entre las tecnologías de IC estudiadas en el capítulo 28 y las tecnologías de miniaturización presentadas en este capítulo.

29.29 La figura I.11 en la Introducción General muestra un espejo suspendido en una viga de torsión y puede inclinarse por atracción electrostática aplicando un voltaje en cada lado del espejo en el fondo de la zanja. Realice un diagrama de flujo de las operaciones de manufactura requeridas para producir este dispositivo.

29.30 En relación con la figura 29.5, diseñe un estudio experimental para encontrar las dimensiones críticas de una viga en voladizo que no se pegue al sustrato.

29.31 Diseñe un acelerómetro utilizando *(a)* el proceso SCREAM, y *(b)* el proceso HEXSIL.

29.32 Diseñe una micromáquina o dispositivo que permita la medición directa de las propiedades mecánicas de una película delgada.

29.33 Investigue en la bibliografía y redacte un resumen de una hoja sobre las aplicaciones en biomems.

PARTE

VI

Procesos y equipo para unión

Al revisar diversos productos a nuestro alrededor, notamos que algunos de ellos cuentan con un solo componente, como los sujetadores para papel, clavos, bolas de acero para rodamientos, grapas, tornillos y pernos. Sin embargo, casi todos se ensamblan a partir de componentes que se han manufacturado como partes individuales. Incluso los productos relativamente simples constan, cuando menos, de dos partes diferentes unidas por distintos medios. Por ejemplo: *(a)* algunos cuchillos de cocina tienen mangos de madera o plástico que se sujetan a las hojas metálicas mediante sujetadores; *(b)* las cacerolas y sartenes para cocina tienen asas y perillas de metal, madera o plástico, que se sujetan a ellas por diversos métodos, y *(c)* la goma para borrar de un lápiz común se sujeta con un manguito de latón.

En una escala mayor, observamos cómo se ensamblan y unen los numerosos componentes de computadoras, motocicletas, lavadoras, herramientas eléctricas y aeroplanos, de manera que puedan funcionar en forma confiable y que sea económico producirlos. Como también se muestra en la tabla I.1 de la Introducción General, una podadora de pasto tiene unas 300 partes y un piano de cola 12,000 partes. Un aeroplano de transporte C-5A posee más de 4 millones de partes y un avión Boeing 747-400 más de 6 millones de partes. Un automóvil común cuenta con 15,000 componentes, algunos de los cuales se muestran en la figura VI.1.

Unión es un término que incluye todo; cubre procesos como soldadura, soldadura fuerte, soldadura blanda, unión con adhesivos y sujeción mecánica. Estos procesos son

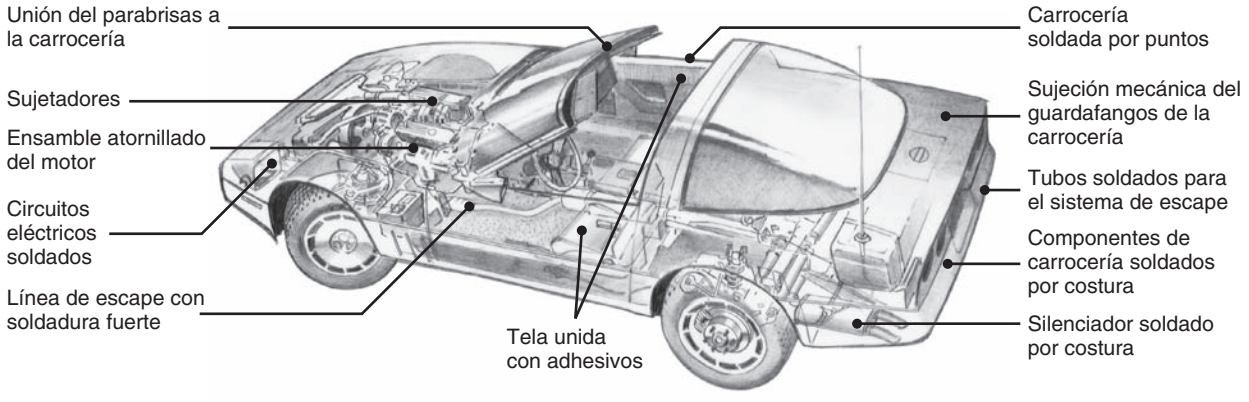


FIGURA VI.1 Diversas partes de un automóvil común ensamblado utilizando los procesos descritos en la parte VI.

un aspecto fundamental e importante de las operaciones de manufactura y *ensamble*, debido a una o más de las siguientes razones:

- Es casi imposible manufacturar productos que tengan una *sola pieza*, incluso un producto relativamente simple. Considérese, por ejemplo, la construcción tubular mostrada en la figura VI.2a. Supongamos que cada uno de los brazos de este producto mide 5 m (15 pies) de largo, los tubos tienen 100 mm (4 pulgadas) de diámetro y el espesor de pared es 1 mm (0.04 pulgada). Después de revisar todos los procesos de manufactura descritos en los capítulos precedentes, concluiríamos que sería imposible o no económico manufacturar este producto como una sola pieza.
- Es *más económico* manufacturar el producto (por ejemplo, una cacerola de cocina con un asa) como componentes individuales, que después se ensamblan.
- En el caso de productos como los motores de automóvil, secadoras para el cabello e impresoras, es necesario diseñarlos de manera que se puedan *desarmar* para darles mantenimiento o reemplazar sus partes.
- Para propósitos funcionales del producto, es posible que sean deseables *diferentes propiedades*. Por ejemplo, las superficies sujetas a fricción, desgaste, corrosión o ataque ambiental, por lo general requieren características que difieren de manera significativa de las del resto del componente. Como ejemplos tenemos: *(a)* las brocas para concreto con puntas de carburo soldadas al zanco de la broca (fig. VI.2b); *(b)* las zapatas para frenos automovilísticos, y *(c)* los discos de rectificado aglutinados sobre un metal de soporte (sección 26.2).
- El *transporte* del producto en forma de componentes individuales y su ensamble posterior en la casa o planta del cliente pueden ser más fáciles y menos costosos que el transporte del producto completo. La mayoría de las bicicletas, juguetes grandes, anaqueles de metal o madera y máquinas herramienta y prensas se ensamblan después de haberse transportado al sitio apropiado los componentes o subensambles.

Aunque existen diferentes formas de clasificar la amplia variedad de procesos de unión disponibles, seguiremos la clasificación de la American Welding Society (AWS).

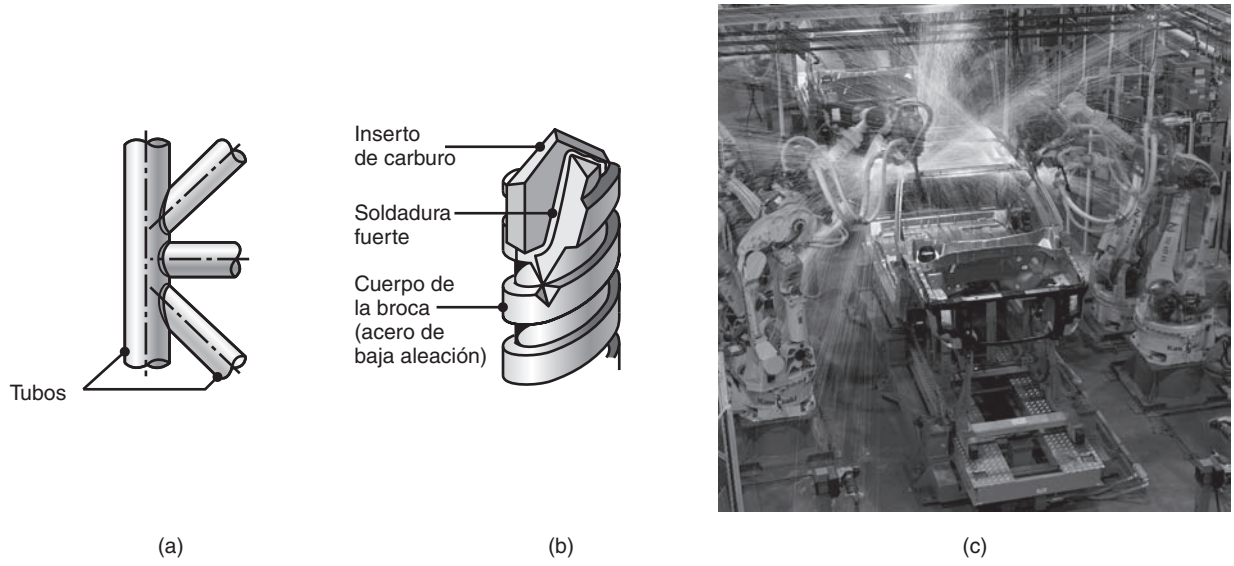


FIGURA VI.2 Ejemplos de partes que utilizan procesos de unión. *(a)* Parte tubular fabricada uniendo componentes individuales. Este producto no se puede manufacturar como una sola pieza por ninguno de los métodos descritos en los capítulos anteriores si consta de brazos largos de forma tubular, de diámetro grande y pared delgada. *(b)* Broca con inserto de carburo para corte, soldado a un zanco de acero, un ejemplo de una parte donde es necesario unir dos materiales por razones de desempeño. *(c)* Soldadura por puntos de carrocerías automotrices. *Fuente: (c)* Cortesía de Ford Motor Co.

Por lo tanto, los procesos de unión caen dentro de tres categorías principales (ver figs. VI.3 y I.7f):

- *Soldadura*
- *Unión con adhesivos*
- *Sujeción mecánica*

En la tabla VI.1 se indican las características generales de diversos procesos de unión.

A su vez, los procesos de soldadura se clasifican por lo general en tres categorías básicas:

- *Soldadura por fusión*
- *Soldadura de estado sólido*
- *Soldadura fuerte y soldadura blanda*

Como se verá posteriormente, algunos tipos de procesos de soldadura pueden clasificarse tanto en la categoría de fusión como en la de estado sólido.

La **soldadura por fusión** se define como la *fusión conjunta y coalescencia* de materiales por medio de calor, comúnmente provisto por medios químicos o eléctricos. Pueden utilizarse o no metales de aporte. La soldadura por fusión comprende los procesos de sol-

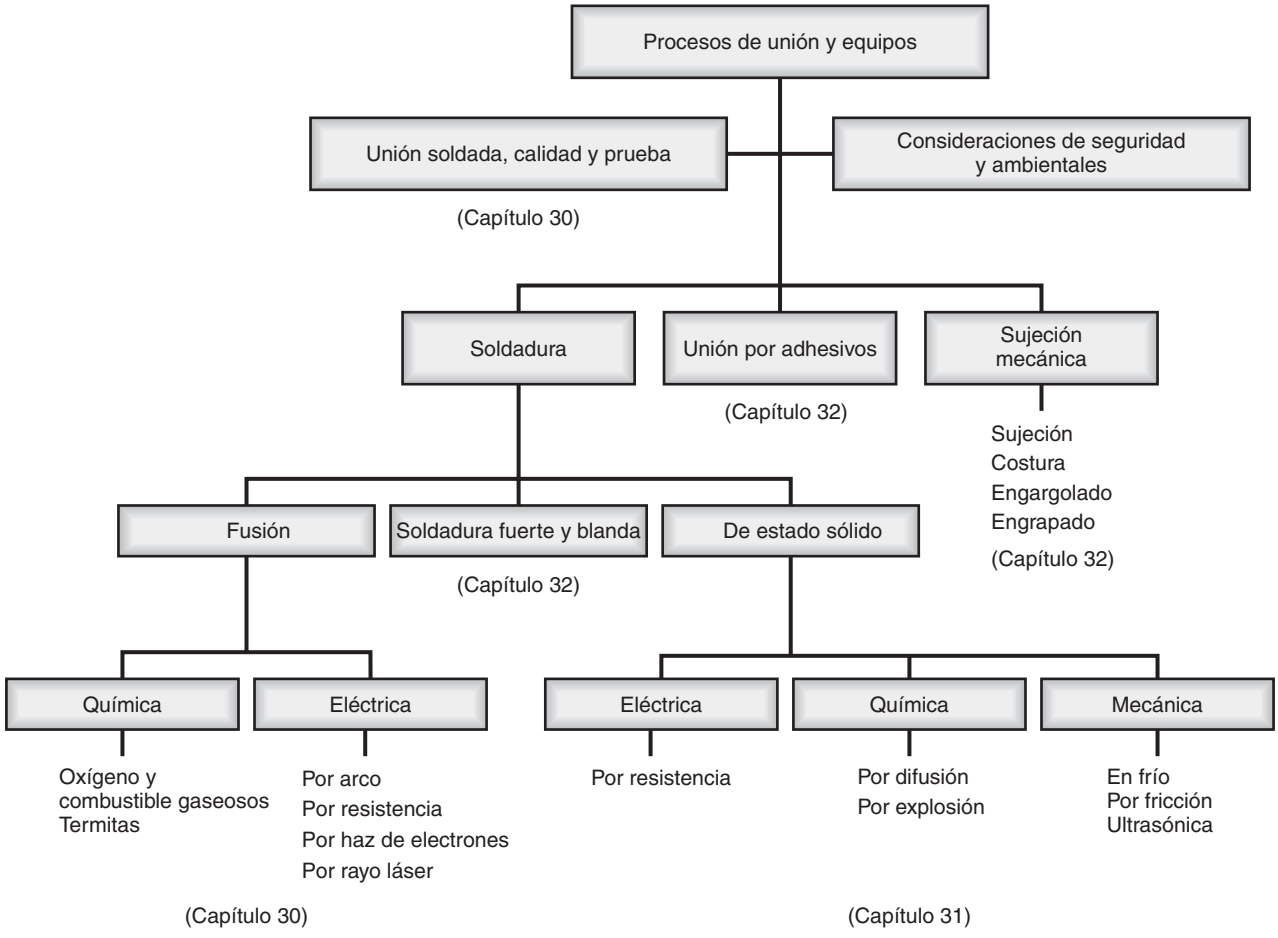


FIGURA VI.3 Esquema de los temas descritos en la parte VI.

TABLA VI.1

Comparación de diversos métodos de unión

	Características								
Método	Resistencia	Variación de diseño	Partes pequeñas	Partes grandes	Tolerancias	Confiabilidad	Facilidad de mantenimiento	Inspección visual	Costo
Soldadura por arco	1	2	3	1	3	1	2	2	2
Soldadura por resistencia	1	2	1	1	3	3	3	3	1
Soldadura fuerte	1	1	1	1	3	1	3	2	3
Tornillos y tuercas	1	2	3	1	2	1	1	1	3
Remachado	1	2	3	1	1	1	3	1	2
Sujetadores	2	3	3	1	2	2	2	1	3
Costura y engargolado	2	2	1	3	3	1	3	1	1
Unión por adhesivos	3	1	1	2	3	2	3	3	2

Nota: 1 = muy buena; 2 = buena; 3 = deficiente; Para costo, 1 es el más bajo.

dadura por arco con electrodo consumible y no consumible, y soldadura por haz de alta energía. La unión soldada sufre importantes cambios metalúrgicos y físicos, que a su vez tienen un efecto importante en las propiedades y el desempeño del componente o la estructura soldada. En la figura VI.4 se muestran algunas uniones simples soldadas.

En la **soldadura de estado sólido**, la unión se efectúa *sin fusión*. En consecuencia, no existe fase líquida (fundida) en la unión. Los procesos básicos en esta categoría son la unión por difusión y la soldadura en frío, ultrasónica, por fricción, por resistencia y por explosión. La **soldadura fuerte** utiliza metales de aporte e implica temperaturas menores que en la soldadura por fusión. La **soldadura blanda** también usa metales similares de aporte (aleaciones para soldadura blanda) e implica temperaturas aun menores.

La **unión con adhesivos** tiene aplicaciones únicas que requieren resistencia, sellado, aislamiento térmico y eléctrico, amortiguamiento de vibraciones y resistencia a la corrosión entre metales diversos. La **sujeción mecánica** implica métodos tradicionales que usan diferentes sujetadores, en particular pernos, tuercas y remaches. La **unión de los plásticos** se puede lograr mediante la unión con adhesivos, fusión por diversas fuentes externas o internas de calor, y sujeción mecánica.

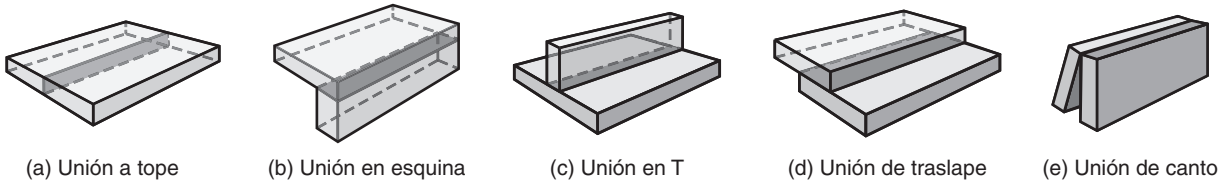
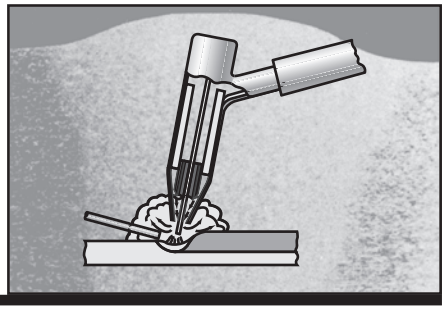


FIGURA VI.4 Ejemplos de uniones que se pueden realizar mediante los diversos procesos descritos en los capítulos 30 a 32.

CAPÍTULO

30

Procesos de soldadura por fusión



30.1 Introducción 940
30.2 Soldadura con oxígeno y combustible gaseosos 941
30.3 Procesos de soldadura por arco: electrodo no consumible 944
30.4 Proceso de soldadura por arco: electrodo consumible 948
30.5 Electrodos para soldadura por arco 954
30.6 Soldadura por haz de electrones 956
30.7 Soldadura por rayo láser 956
30.8 Corte 958
30.9 Unión soldada, calidad y prueba 960
30.10 Diseño de la unión y selección del proceso 971

EJEMPLOS:

30.1 Soldadura láser para hojas de rasurar 957
30.2 Selección del diseño de la soldadura 974

En este capítulo se describen los procesos de soldadura por fusión, en los que se unen dos piezas mediante la aplicación de calor, que funde y fusiona la interfaz. Se presentan con detalle sus principios, características y aplicaciones. Los temas cubiertos incluyen:

- La soldadura con oxígeno y combustible gaseosos, donde el acetileno y el oxígeno aportan la energía necesaria para la soldadura.
- Los procesos de soldadura por arco, que utilizan energía eléctrica y electrodos consumibles y no consumibles para formar la soldadura.
- Los procesos de soldadura con haces de alta energía, como la soldadura láser y de haz de electrones.
- Una descripción de cómo se utilizan estos procesos para cortar metales.
- La naturaleza y características de la unión por soldadura.
- Los factores comprendidos en la soldabilidad de los metales.
- Las prácticas convenientes de diseño de uniones y selección de los procesos.

30.1 Introducción

Los procesos de soldadura que se describen en este capítulo implican la fusión parcial y la unión entre dos miembros. En este contexto, la **soldadura por fusión** se define como la *fusión* y *coalescencia* de materiales mediante calor. Se pueden usar *metales de aporte* (que son metales agregados a la zona de soldadura durante la operación). Las soldaduras por fusión realizadas sin agregar metales de aporte se denominan soldaduras *autógenas*.

En este capítulo se describen las clases principales de los procesos de soldadura por fusión. Se cubren los principios básicos de cada proceso; el equipo utilizado; sus ventajas, limitaciones y capacidades relativas; y las consideraciones económicas que afectan la selección del proceso (tabla 30.1). Estos procesos incluyen los procesos de soldado mediante oxígeno y combustible gaseosos, de arco y de haces de alta energía (rayo láser y haz de electrones), que tienen aplicaciones importantes y únicas en la manufactura moderna.

El capítulo continúa con una descripción de las características de la zona de soldadura y de la amplia variedad de discontinuidades y defectos que pueden existir en las uniones soldadas. Después se revisa la soldabilidad de diversos metales y aleaciones ferrosas y no ferrosas. El capítulo termina con un análisis de los lineamientos de diseño para la soldadura, dándose varios ejemplos de prácticas convenientes de diseño de soldaduras.

TABLA 30.1

Características generales de los procesos de soldadura por fusión

Proceso de unión	Operación	Ventaja	Nivel de habilidad requerido	Posición de soldado	Tipo de corriente	Distorsión*	Costo característico del equipo (dólares)
Arco metálico protegido	Manual	Portátil y flexible	Alto	Todas	CA, CD	1 a 2	Bajo (1500+)
Arco sumergido	Automática	Deposición alta	Bajo a medio	Plana y horizontal	CA, CD	1 a 2	Medio (5000+)
Arco metálico y gas	Semiautomática o automática	Trabaja con la mayoría de los metales	Bajo a alto	Todas	CD	2 a 3	Medio (3000+)
Arco de tungsteno y gas	Manual o automática	Trabaja con la mayoría de los metales	Bajo a alto	Todas	CA, CD	2 a 3	Medio (5000+)
Arco con núcleo de fundente	Semiautomática o automatica	Deposición alta	Bajo a alto	Todas	CD	1 a 3	Medio (2000+)
Oxígeno y combustible gaseosos	Manual	Portátil y flexible	Alto	Todas	—	2 a 4	Bajo (500+)
Haz de electrones, rayo láser	Semiautomática o automática	Trabaja con la mayoría de los metales	Medio a alto	Todas	—	3 a 5	Alto (100,000–1 millón)

*1 = la mayor; 5 = la menor.

Como en todos los procesos de manufactura, la economía de la soldadura es un aspecto igualmente significativo de la operación total. En la sección 31.8 se analizan los procesos de soldadura, el equipo y los costos de la mano de obra.

30.2 Soldadura con oxígeno y combustible gaseosos

La *soldadura con oxígeno y combustible gaseosos* (OFW, por sus siglas en inglés) es un término general utilizado para describir cualquier proceso de soldadura que use un **gas combustible combinado** con *oxígeno* para producir una flama. Ésta es la fuente de calor que se utiliza para fundir los metales en la unión. El proceso más común de soldadura con gas emplea *acetileno*; este proceso se conoce como *soldadura con oxiacetileno* (OAW, por sus siglas en inglés) y suele usarse en la fabricación de lámina metálica estructural, carrocerías de automóviles y diversos trabajos de reparación.

El proceso OAW se desarrolló a principios del siglo XX y usa el calor generado por la combustión del acetileno gaseoso (C_2H_2) mezclado con oxígeno. El calor se genera de acuerdo con un par de reacciones químicas. El proceso de combustión primaria, que se efectúa en el cono interior de la flama (fig. 30.1), comprende la siguiente reacción:

$$C_2H_2 + O_2 \longrightarrow 2CO + H_2 + \text{calor} \qquad (30.1)$$

Esta reacción disocia el acetileno y forma monóxido de carbono e hidrógeno y produce casi la tercera parte del calor generado en la flama. El proceso de combustión secundaria es:

$$2CO + H_2 + 1.5O_2 \longrightarrow 2CO_2 + H_2O + \text{calor} \qquad (30.2)$$

Esta reacción consiste en el quemado posterior del hidrógeno y del monóxido de carbono, que produce casi las dos terceras partes del calor total. Obsérvese que la reacción también produce vapor de agua. Las temperaturas que se desarrollan en la flama pueden llegar a los 3300 °C (6000 °F).

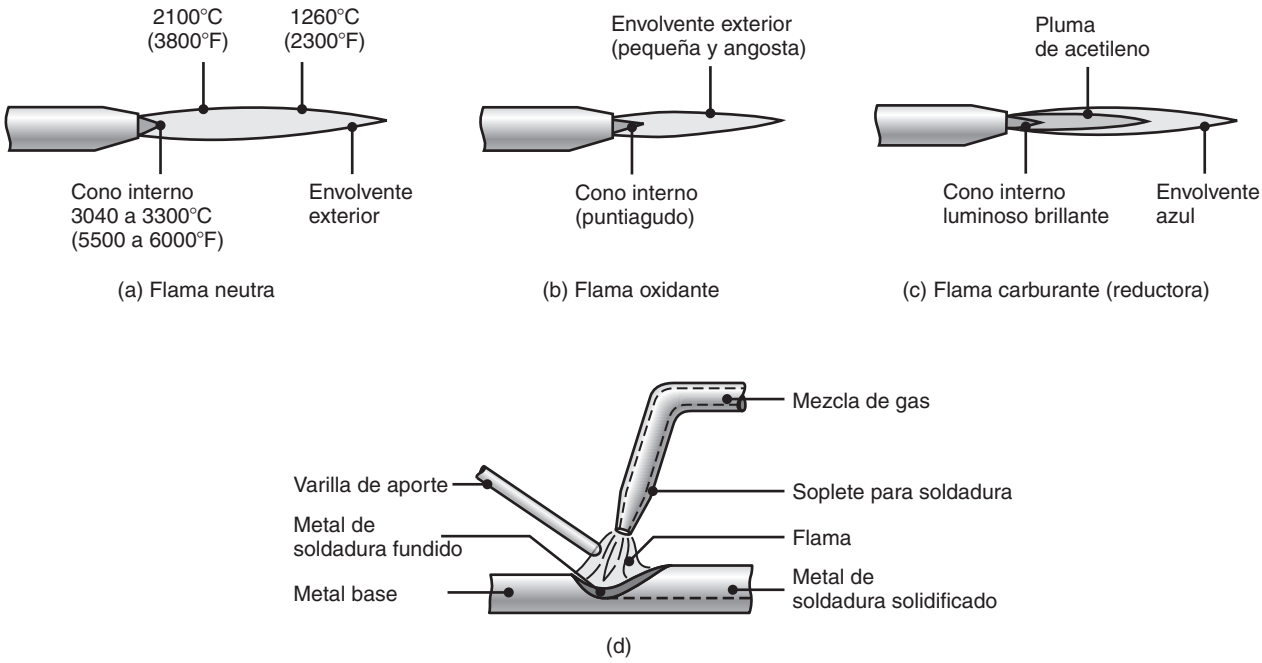


FIGURA 30.1 Los tres tipos básicos de flamas de oxiacetileno utilizadas en la soldadura y corte con oxígeno y combustible gaseosos: *(a)* flama neutra; *(b)* flama oxidante; *(c)* flama carburante o reductora. La mezcla de gas en *(a)* es básicamente volúmenes iguales de oxígeno y acetileno. *(d)* Principio de operación de la soldadura con oxígeno y combustible gaseosos.

Tipos de flamas. Un factor importante en la soldadura con oxiacetileno es la proporción de acetileno y oxígeno en la mezcla de gas. A una relación de 1:1 (es decir, cuando no hay exceso de oxígeno), se considera que se produce una flama *neutra* (fig. 30.1a). Con mayor suministro de oxígeno, puede ser dañina (en particular para los aceros), porque oxida los metales. Por esta razón, a una flama con exceso de oxígeno se le conoce como **flama oxidante** (fig. 30.1b) y sólo es deseable en la soldadura de cobre y sus aleaciones, en las que se forma una capa protectora delgada de *escoria* (compuestos de óxidos) sobre el metal fundido. Si el oxígeno es insuficiente para producir una combustión plena, la flama se denomina **reductora** (con exceso de acetileno) o **carburante** (fig. 30.1c). La temperatura de una flama reductora es menor, por lo que resulta adecuada para las aplicaciones que requieren poco calor, como la soldadura fuerte y blanda, y las operaciones de endurecimiento a la flama.

En la soldadura con oxígeno y combustible gaseosos también se pueden usar otros gases (como hidrógeno y metilacetileno propadieno). Sin embargo, las temperaturas obtenidas con ellos son bajas, de ahí que se utilicen para soldar *(a)* metales con bajos puntos de fusión (como el plomo), y *(b)* partes delgadas y pequeñas. La flama con hidrógeno puro es incolora, por lo que resulta difícil ajustarla visualmente.

Metales de aporte. Los metales de aporte se utilizan para suministrar material adicional a la zona de soldadura durante la operación. Se consiguen como **varillas de aporte** o *alambre* (fig. 30.1d) y pueden ser desnudas o estar recubiertas con un **fundente**. El propósito del fundente es retardar la oxidación de las superficies de las partes que se están soldando, generando una *protección gaseosa* en torno de la zona de soldadura. El fundente también ayuda a disolver y eliminar los óxidos y otras sustancias de la zona de soldado, por lo que contribuye a la formación de una unión más resistente. La escoria que se forma (compuestos de óxidos, fundentes y materiales de electrodos recubiertos) protege la mezcla de metales fundidos contra la oxidación mientras se enfría.

Práctica y equipo de soldadura. La soldadura con oxígeno y combustible gaseosos se puede utilizar en la mayor parte de los materiales ferrosos y no ferrosos, casi para cualquier espesor de la pieza de trabajo, pero la producción relativamente baja de calor limita este proceso a espesores menores de 6 mm (0.25 pulgadas). Los pasos básicos pueden resumirse de la siguiente manera:

1. Preparar los extremos a unir, fijar y mantener su posición apropiada mediante el uso de prensas de banco y soportes.
2. Abrir la válvula de acetileno y encender el gas en la punta del soplete. Abrir la válvula de oxígeno y ajustar la flama para la operación particular (fig. 30.2).
3. Sostener el soplete a unos 45° del plano de la pieza de trabajo, con la flama interior cerca de ella y la varilla de aporte a alrededor de 30° a 40°.
4. Tocar la unión con la varilla de aporte y controlar su movimiento a lo largo de la unión mediante la observación de su velocidad de fusión y llenado.

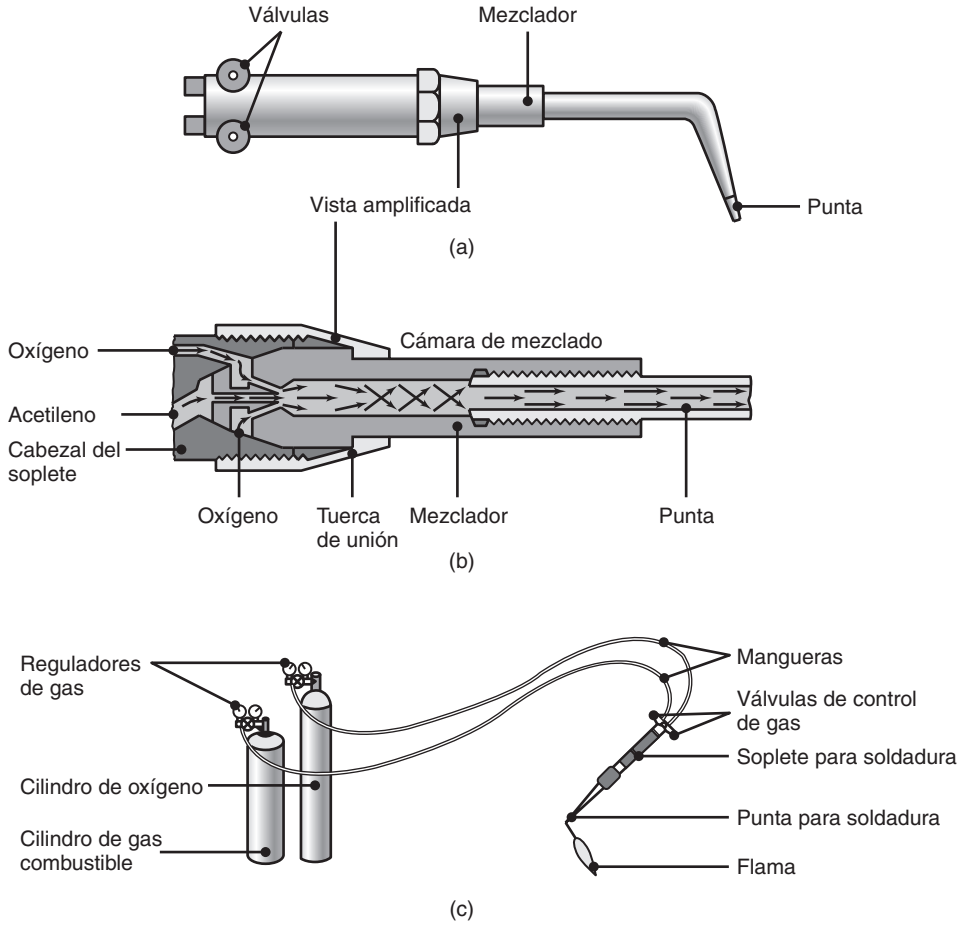


FIGURA 30.2 *(a)* Vista general de, y *(b)* sección transversal de un soplete utilizado en la soldadura por oxiacetileno. Primero se abre la válvula del acetileno; se enciende el gas con un encendedor de chispa o un piloto; después se abre la válvula de oxígeno y se ajusta la flama. *(c)* Equipo básico usado en la soldadura con oxígeno y combustible gaseosos. Para asegurar que las conexiones son las correctas, las roscas de todos los accesorios para el acetileno son izquierdas, mientras que las del oxígeno son derechas. Es común que los reguladores de oxígeno se pinten de color verde y los reguladores de acetileno de rojo.

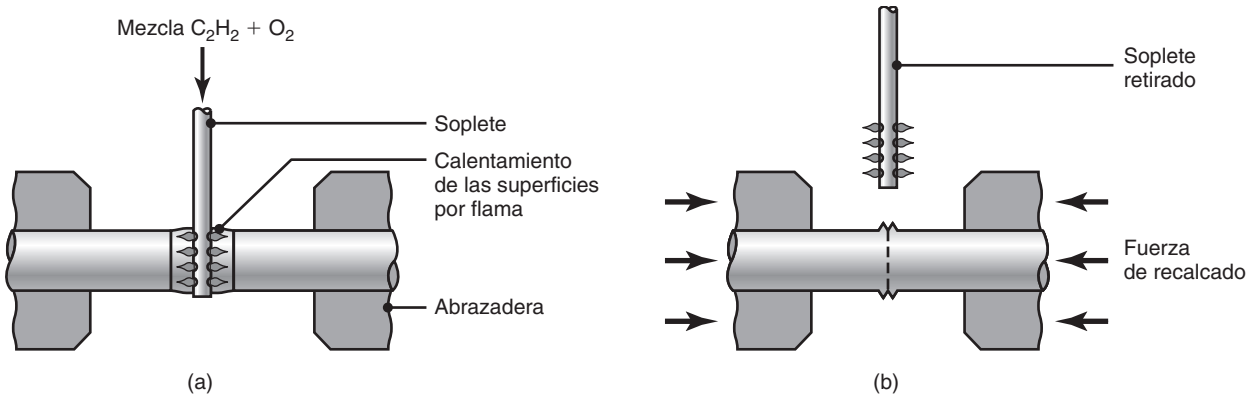


FIGURA 30.3 Esquema del proceso de soldadura por gas de presión: *(a)* antes, y *(b)* después. Obsérvese la formación de la proyección en la unión, que se recorta después.

Las uniones pequeñas realizadas mediante este proceso pueden consistir en un solo cordón de soldadura; las soldaduras profundas con ranuras en V se terminan en varios pasos. Es importante limpiar la superficie de cada cordón antes de depositar una segunda capa, a fin de tener resistencia en la unión y evitar defectos (ver sección 30.9). Con este propósito se pueden usar cepillos de alambre, manuales o eléctricos.

El equipo para soldadura con oxígeno y combustible gaseosos consta básicamente de un **soplete** conectado con mangueras a cilindros de gas a alta presión, equipados con manómetros y reguladores (fig. 30.2c). Es fundamental usar equipo de seguridad (como lentes oscuros, caretas, guantes y ropa de protección). La conexión correcta de las mangueras a los cilindros es un factor importante de seguridad. Los cilindros de oxígeno y acetileno tienen roscas distintas, por lo que las mangueras no se pueden conectar a los cilindros equivocados.

El bajo costo del equipo es un aspecto atractivo de la soldadura con oxígeno y combustible gaseosos. Aunque se puede mecanizar, esta operación de soldadura es esencialmente manual y, por lo tanto, lenta. Sin embargo, tiene las ventajas de ser portátil, versátil y económica para trabajos sencillos y en pequeñas cantidades.

Soldadura con gas a presión. En este método, la soldadura de dos componentes comienza calentando la interfaz mediante un soplete, que por lo común utiliza una mezcla de gas de oxiacetileno (fig. 30.3a). Cuando la interfaz comienza a fundirse, se retira el soplete y se aplica una fuerza para prensar los dos componentes uno contra el otro (fig. 30.3b) y se mantiene hasta que se solidifica la interfaz. Obsérvese la formación de una rebaba debido al rechazado de los extremos unidos de los dos componentes.

30.3 Procesos de soldadura por arco: electrodo no consumible

En la *soldadura por arco*, desarrollada a principios del siglo XX, el calor requerido se obtiene de la energía eléctrica. El proceso puede implicar un *electrodo consumible* o uno *no consumible*. Se produce un arco entre la punta del electrodo y la pieza de trabajo que se va a soldar, mediante una fuente de alimentación de CA o de CD. Este arco produce temperaturas de unos 30,000 °C (54,000 °F), mucho mayores que las que se desarrollan en la soldadura con oxígeno y combustible gaseosos.

En los procesos de soldadura con *electrodo no consumible*, por lo general el electrodo es un **electrodo de tungsteno** (fig. 30.4). Debido a las altas temperaturas implícitas,

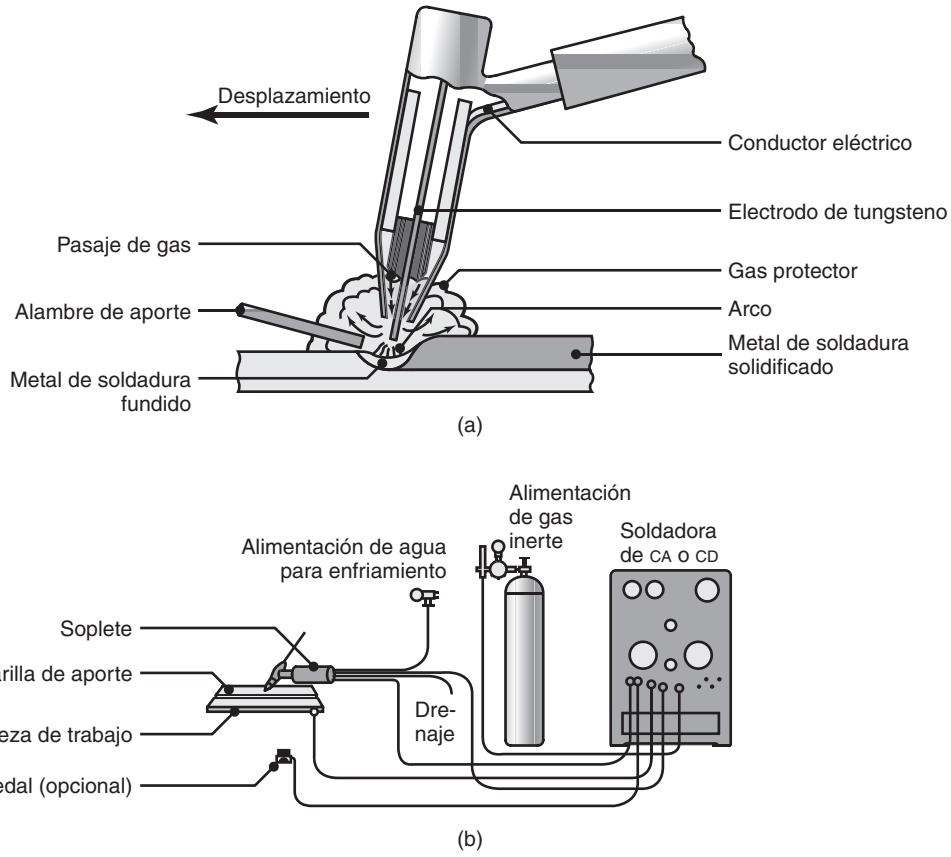


FIGURA 30.4 *(a)* Proceso de soldadura por arco de tungsteno y gas, conocido anteriormente como soldadura TIG (por gas inerte y tungsteno, en inglés). *(b)* Equipo para las operaciones de soldadura por arco de tungsteno y gas.

es necesaria una protección externa de gas para evitar la oxidación de la zona de soldadura. Comúnmente, se utiliza corriente directa, CD, y su **polaridad** (es decir, la dirección del flujo de la corriente) es importante. Su selección depende de factores como el tipo de electrodo, los metales a soldar, la profundidad y anchura de la zona de soldadura.

En la **polaridad directa**, también llamada *corriente directa de electrodo negativo* (DCEN, por sus siglas en inglés), la pieza de trabajo es positiva (ánodo) y el electrodo negativo (cátodo). Por lo general produce soldaduras angostas y profundas (fig. 30.5a). En la **polaridad inversa**, conocida asimismo como *corriente directa de electrodo positivo*

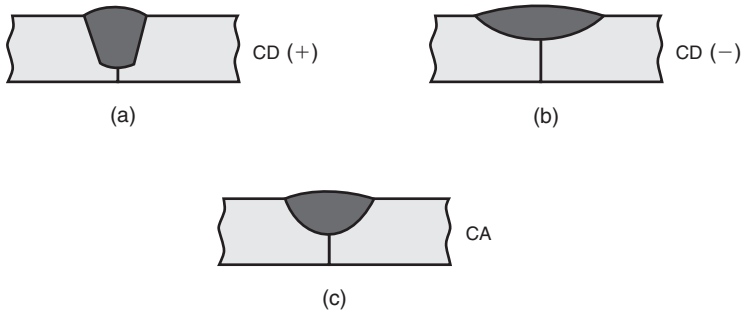


FIGURA 30.5 Efecto de la polaridad y el tipo de corriente en los cordones de soldadura: *(a)* corriente directa con polaridad directa; *(b)* corriente directa con polaridad invertida; *(c)* corriente alterna.

(DCEP, por sus siglas en inglés), la pieza de trabajo es negativa y el electrodo positivo. La penetración de la soldadura es menor, y la zona de soldado es menos profunda y más ancha (fig. 30.5b). De ahí que se prefiera la DCEP para láminas metálicas y uniones con separaciones muy anchas. En el método de **corriente alterna** (CA), el arco pulsa con rapidez; este método es adecuado para soldar secciones gruesas y utilizar electrodos de diámetros grandes a corrientes máximas (fig. 30.5c).

El suministro de calor en la soldadura por arco eléctrico está dado por la expresión:

$$H = \frac{EI}{v} \tag{30.3}$$

donde H es el suministro de calor, E el voltaje, I la corriente y v la velocidad a la que se desplaza el arco a lo largo de la línea de soldadura. Sin embargo, en otros procesos de soldado, sólo una pequeña porción del calor teórico generado va al área inmediata de soldado.

Soldadura por arco de tungsteno y gas. En la *soldadura por arco de tungsteno y gas* (GTAW, por sus siglas en inglés), que antes se conocía como *soldadura TIG* (siglas en inglés de "gas inerte y tungsteno"), el metal de aporte es suministrado por un **alambre de aporte** (fig. 30.4a). Debido a que en esta operación no se consume el electrodo de tungsteno, se mantiene una *abertura de arco* constante y estable en un nivel constante de corriente. Los metales de aporte son similares a los que se van a soldar y no se usa fundente. El gas de protección suele ser argón o helio, o una mezcla de los dos. La soldadura con GTAW puede efectuarse sin metales de aporte, por ejemplo, en el soldado de juntas de ajuste preciso.

Dependiendo de los metales que se van a soldar, la fuente de alimentación puede ser CD a 200 A, o CA a 500 A (fig. 30.4b). En general se prefiere la corriente alterna para aluminio y magnesio, porque tiene una acción limpiadora que remueve los óxidos y mejora la calidad de la soldadura. Se puede usar torio o zirconio en los electrodos de tungsteno a fin de mejorar sus características de emisión de electrones. La potencia necesaria va de 8 a 20 kW. La contaminación del electrodo de tungsteno con el metal fundido puede ser un problema significativo, sobre todo en aplicaciones críticas, donde puede causar discontinuidades en la soldadura. Por lo tanto, debe evitarse el contacto del electrodo con la mezcla de metales fundidos.

El proceso GTAW se usa para una gran variedad de metales y aplicaciones, en particular con aluminio, magnesio, titanio y los metales refractarios. Es adecuado sobre todo para metales delgados. El costo del gas inerte hace que este proceso sea más costoso que el de arco metálico protegido (SMAW, por sus siglas en inglés), pero produce soldaduras y acabados superficiales de muy alta calidad. Se utiliza en varias aplicaciones críticas, en una amplia gama de espesores y formas de la pieza de trabajo. El equipo es portátil.

Soldadura por arco de plasma. En la *soldadura por arco de plasma* (PAW, por sus siglas en inglés), desarrollada en la década de 1960, se produce un arco concentrado de plasma que se dirige hacia el área de la soldadura. El arco es estable y alcanza temperaturas de hasta 33,000 °C (60,000 °F). Un **plasma** es un gas caliente ionizado, formado por cantidades casi iguales de electrones e iones positivos. El plasma se inicia entre el electrodo de tungsteno y el orificio, mediante un arco piloto de baja corriente. A diferencia de otros procesos, el arco de plasma se concentra, porque se hace pasar por un orificio relativamente pequeño. Las corrientes de operación suelen ser menores a 100 A, pero pueden ser mayores en aplicaciones especiales. Cuando se usa un metal de aporte, se alimenta el arco, como se hace en GTAW. Se protegen el arco y la zona de soldadura mediante un anillo protector externo, y se utilizan gases como argón, helio o mezclas de ellos.

Existen dos métodos para soldar por arco de plasma:

- En el método de **arco transferido** (fig. 30.6a), la pieza que se suelda es parte de un circuito eléctrico. El arco se transfiere del electrodo a la pieza de trabajo; de ahí el término *transferido*.

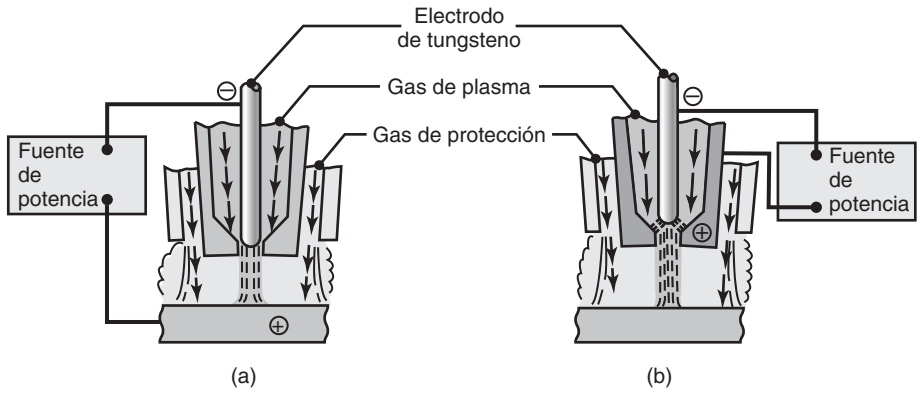


FIGURA 30.6 Dos tipos de procesos de soldadura por arco de plasma: *(a)* transferido, y *(b)* no transferido. Por medio de este proceso se pueden efectuar soldaduras profundas y estrechas a altas velocidades de soldado.

- En el método **no transferido** (fig. 30.6b), el arco se produce entre el electrodo y la boquilla, y el calor se transfiere a la pieza de trabajo mediante el gas de plasma. Este mecanismo de transferencia térmica es similar al de la flama de oxígeno y combustible (ver sección 30.2).

En comparación con otros procesos de soldadura por arco, el de arco de plasma tiene mejor estabilidad de arco, menos distorsión térmica y mayor concentración de energía, lo que le permite soldaduras más profundas y angostas. Además, pueden obtenerse mayores velocidades de soldadura, de 120 a 1000 mm/min (5 a 40 pulgadas/min). Se pueden soldar diversos metales, en general con espesores menores de 6 mm (0.25 pulgada).

La gran concentración de calor puede atravesar por completo la unión (**técnica del ojo de cerradura**) con espesores de hasta 20 mm (0.75 pulgada) para ciertas aleaciones de titanio y aluminio. En la técnica del ojo de cerradura, la fuerza del arco de plasma desplaza al metal fundido y produce un orificio en el borde delantero del charco de soldadura. La soldadura con arco de plasma se usa con frecuencia, más que el arco de tungsteno y gas, para uniones a tope y traslapadas, por su mayor concentración de energía, mejor estabilidad de arco y mayores velocidades de soldado. Es fundamental que quienes utilizan este equipo tengan una capacitación y habilidad apropiadas. Las consideraciones de seguridad incluyen la protección contra los reflejos, salpicaduras y el ruido del arco de plasma.

Soldadura con hidrógeno atómico. En la *soldadura con hidrógeno atómico* (AHW, por sus siglas en inglés) se genera un arco entre dos electrodos de tungsteno, en una atmósfera protectora de hidrógeno. El arco se mantiene independiente de la pieza de trabajo o de las partes a soldar. Por lo regular, el hidrógeno gaseoso es biatómico (H_2), pero cuando las temperaturas superan los 6000 °C (11,000 °F) cerca del arco, se descompone en su forma atómica, absorbiendo de manera simultánea una gran cantidad de calor del arco. Cuando el hidrógeno incide en una superficie relativamente fría (es decir, la zona de soldadura), se recombina con su forma biatómica y libera con rapidez el calor almacenado. En la AHW se puede variar con facilidad la energía cambiando la distancia entre la corriente del arco y la superficie de la pieza de trabajo. Este proceso ha sido reemplazado por la soldadura por arco y metal protegido, debido sobre todo a la disponibilidad de gases inertes económicos.

30.4 Procesos de soldadura por arco: electrodo consumible

Existen varios procesos de soldadura por arco de electrodo consumible, que se describen a continuación:

30.4.1 Soldadura con arco y metal protegido

La *soldadura con arco y metal protegido* (SMAW, por sus siglas en inglés) es uno de los procesos de unión más antiguos, sencillos y versátiles. Hoy en día, alrededor de 50% de toda la soldadura en la industria y el mantenimiento se realiza mediante este proceso. El arco eléctrico se genera tocando la pieza de trabajo con la punta de un *electrodo recubierto* y retirándola con rapidez a la distancia suficiente para mantener el arco (fig. 30.7a). Los electrodos tienen la forma de una varilla delgada y larga (por lo que este proceso se denomina también **soldadura con varilla**) que se sostiene con la mano.

El calor generado funde una parte de la punta del electrodo, su recubrimiento y el metal base en la zona inmediata del arco. El metal fundido consiste en una mezcla del metal base (de la pieza de trabajo), el metal del electrodo y las sustancias del recubrimiento del electrodo; esta mezcla forma la soldadura cuando se solidifica. El recubrimiento del electrodo desoxida la zona de la soldadura y produce una pantalla de gas que la protege del oxígeno del ambiente.

Una parte desnuda en el extremo del electrodo se sujeta a una terminal de la fuente de poder, mientras que la otra terminal se conecta con la pieza que se está soldando (fig. 30.7b). La corriente, que puede ser directa o alterna, suele ser de 50 a 300 A. Para soldar lámina metálica se prefiere la CD, porque el arco que produce es estable. En general, los requerimientos de potencia son menores a 10 kW.

El proceso de SMAW tiene la ventaja de ser relativamente sencillo y versátil, y de requerir una menor variedad de electrodos. El equipo consiste en una fuente de poder, cables de corriente y un portaelectrodo. El proceso SMAW suele utilizarse en la construcción en general, en astilleros, oleoductos y trabajos de mantenimiento. Es muy útil en zonas remotas, donde se puede usar un generador con motor de combustión interna como fuente de potencia. Este proceso es más adecuado para piezas de trabajo de 3 a 19 mm (0.12 a 0.75 pulgada) de espesor, aunque este intervalo se puede ampliar con facilidad si los operadores son hábiles y emplean técnicas de pases múltiples (fig. 30.8).

En el método de los pases múltiples es necesario limpiar la escoria después de cada cordón de soldadura; si no se retira totalmente, la escoria solidificada puede provocar una corrosión severa en el área de soldadura y causar su falla. También evita la fusión de las capas de soldadura y, por lo tanto, compromete su resistencia. Antes de aplicar una nueva soldadura, debe retirarse por completo la escoria, ya sea mediante un cepillo de alambre o por cincelado. En consecuencia, tanto los costos de mano de obra como los de los materiales son elevados.

30.4.2 Soldadura por arco sumergido

En la *soldadura por arco sumergido* (SAW, por sus siglas en inglés), el arco se protege con un *fundente granular* formado por cal, sílice, óxido de manganeso, fluoruro de calcio y otros compuestos. Este fundente se alimenta por gravedad a la zona de soldadura, a través de una boquilla (fig. 30.9). La capa gruesa de fundente cubre totalmente el metal fundido; evita salpicaduras y chispas y suprime tanto la intensa radiación ultravioleta

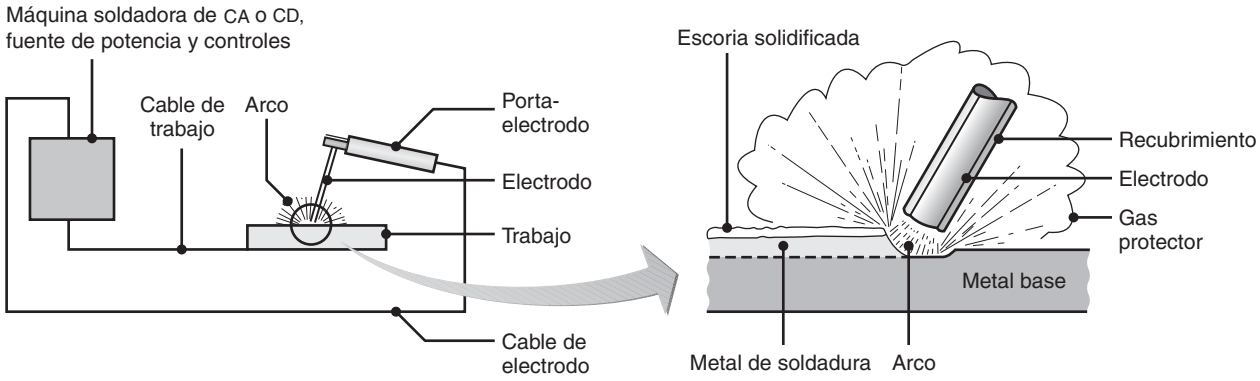


FIGURA 30.7 Esquema del proceso de soldadura por arco metalico protegido. Aproximadamente 50% de todas las operaciones de soldadura a gran escala industrial utilizan este proceso.

como los humos característicos del proceso SMAW. El fundente también actúa como aislante térmico, facilitando la penetración profunda del calor en la pieza de trabajo. El fundente no utilizado se puede recuperar (usando un tubo de recuperación), tratar y reutilizar.

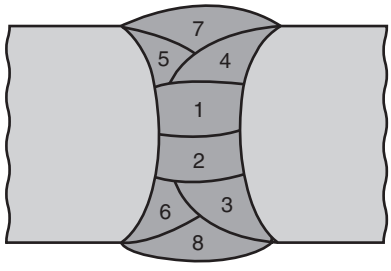


FIGURA 30.8 Soldadura profunda que muestra la secuencia de acumulación de ocho cordones individuales de soldadura.

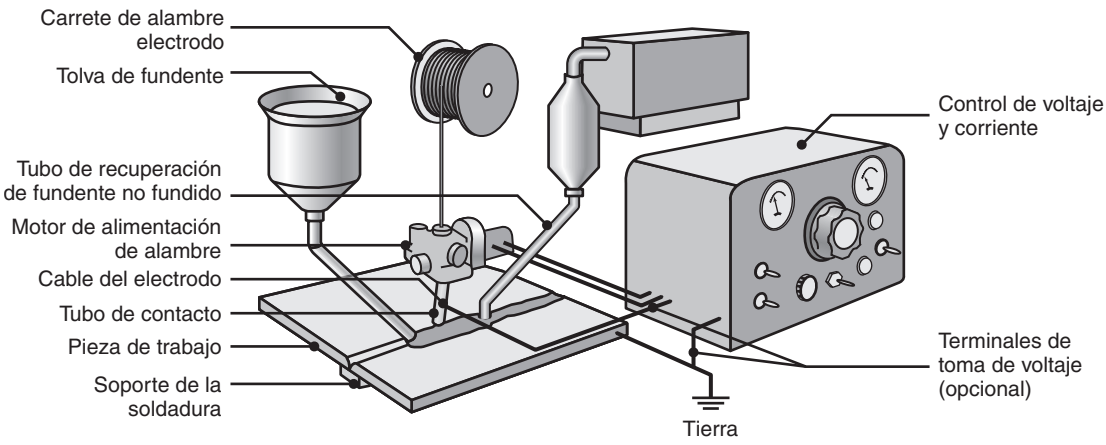


FIGURA 30.9 Esquema del proceso y equipo de soldadura por arco sumergido. El fundente no fundido se recupera y reutiliza.

El electrodo consumible es un rollo de alambre redondo desnudo de 1.5 mm a 10 mm de diámetro $\left(\frac{1}{16}\text{ a }\frac{3}{8}\text{ de pulgada}\right)$; se alimenta en forma automática por un tubo (**pistola de soldar**). Por lo común, las corrientes eléctricas son de 300 a 2000 A. Las fuentes de poder se conectan a líneas monofásicas o trifásicas estándar con tensiones de hasta 440 V.

Debido a que el fundente se alimenta por gravedad, el proceso SAW está limitado principalmente a soldaduras en posición plana u horizontal, con una pieza de respaldo. Se pueden hacer soldaduras circulares en tubos y cilindros, siempre que éstos se hagan girar durante el proceso. Como se muestra en la figura 30.9, el fundente no usado se puede recuperar, tratar y reutilizar. Este proceso está automatizado y se emplea para soldar diversos aceros al carbono y aleados, así como aceros inoxidables, en láminas o placas, con velocidades de hasta 5 m/min (16 pies/min). La calidad de la soldadura es muy alta, con buena tenacidad, ductilidad y uniformidad de propiedades. El proceso SAW permite una productividad muy elevada en la soldadura, porque deposita de cuatro a 10 veces la cantidad de metal de aporte por hora, en comparación con el proceso SMAW. Entre las aplicaciones características se incluyen la soldadura de placas gruesas para barcos y recipientes a presión.

30.4.3 Soldadura por arco metálico y gas

En la *soldadura por arco metálico y gas* (GMAW, por sus siglas en inglés), desarrollada en la década de 1950 y antes denominada *soldadura metálica en gas inerte* (MIG, por sus siglas en inglés), se protege el área de soldadura con una eficaz atmósfera inerte de argón, helio, bióxido de carbono o varias mezclas de gases (fig. 30.10a). El alambre desnudo consumible se alimenta al arco de soldadura en forma automática a través de una boquilla, mediante un motor de accionamiento de alimentación del alambre (fig. 30.10b). Además de utilizar gases inertes como protección, es común que existan desoxidantes en el propio metal del electrodo para evitar la oxidación de la mezcla de metal fundido. Se pueden depositar varias capas de soldadura en la unión.

En este proceso, el metal se puede transferir mediante tres métodos:

1. En la **transferencia por aspersión**, pequeñas gotas de metal fundido del electrodo pasan al área de soldadura con una frecuencia de varios cientos por segundo. La transferencia no tiene salpicaduras y es muy estable. Se utilizan altas corrientes, tensiones directas y electrodos de gran diámetro con argón, o con una mezcla de gas rica en argón, como gas de protección. Se puede reducir la corriente promedio necesaria para este proceso mediante el uso de un **arco por pulsos**, que sobrepone

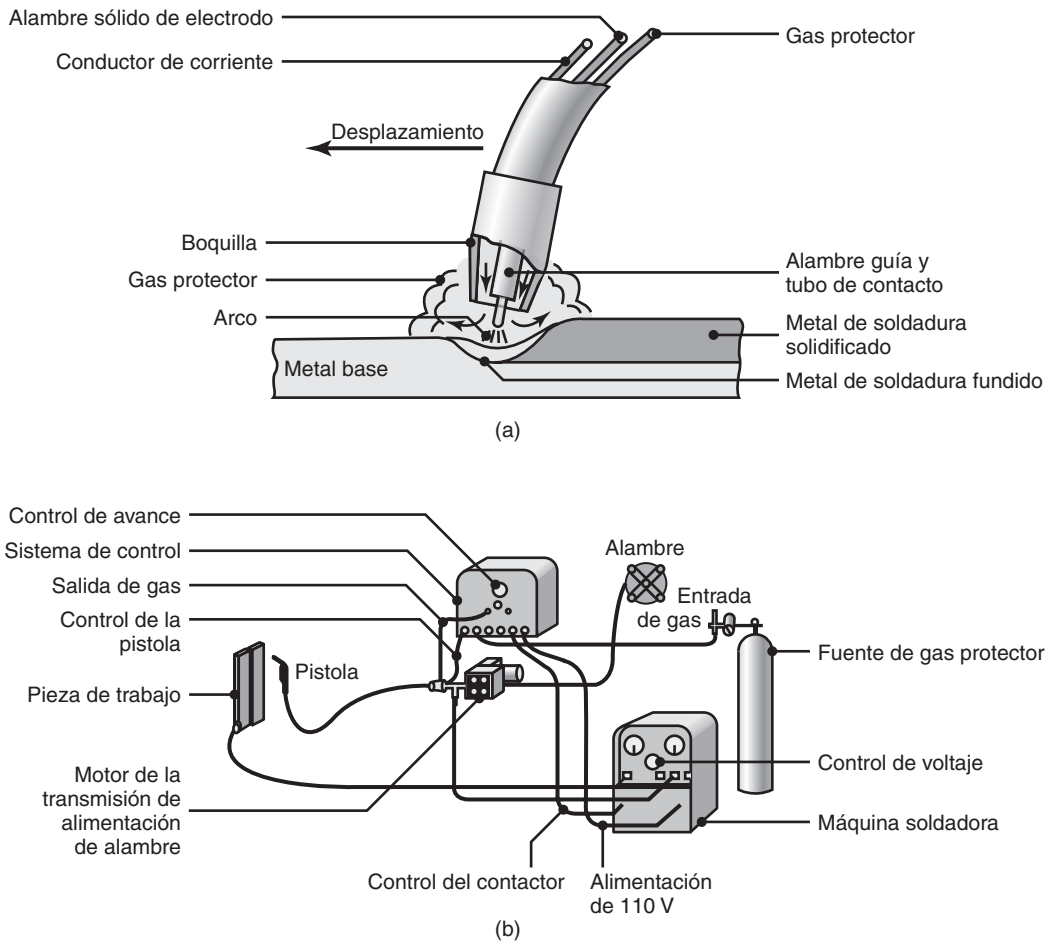


FIGURA 30.10 *(a)* Esquema del proceso de soldadura por arco metálico y gas, conocido antes como soldadura MIG (por metal y gas inerte). *(b)* Equipo básico utilizado en las operaciones de soldadura por arco metálico y gas.

pulsos de gran amplitud a una corriente baja y estable. El proceso puede utilizarse en todas las posiciones de soldar.

2. En la **transferencia globular**, se utilizan gases ricos en bióxido de carbono y los glóbulos se impulsan mediante las fuerzas de transferencia del arco eléctrico del metal, lo que produce bastantes salpicaduras. Se usan altas corrientes que posibilitan una mayor penetración de la soldadura y mayor velocidad que la que se alcanza con la transferencia por aspersión. Es común unir las piezas más pesadas por medio de este método.
3. En el **cortocircuito**, el metal se transfiere en forma de gotitas individuales (más de 50 por segundo) cuando la punta del electrodo toca el metal fundido de soldadura y hace cortocircuito. Se utilizan corrientes y tensiones bajas, con gases ricos en bióxido de carbono y electrodos de alambre de diámetro pequeño. La potencia requerida es de unos 2 kW.

Las temperaturas generadas en el GMAW son relativamente bajas; en consecuencia, este método sólo es adecuado para láminas y secciones delgadas de menos de 6 mm (0.25 pulgadas), porque en caso contrario podría presentarse una fusión incompleta. Este proceso es fácil de usar y se utiliza mucho para secciones delgadas de metales ferrosos. Los sistemas de arco por pulso se usan para partes delgadas de metales ferrosos y no ferrosos.

Este proceso es adecuado para soldar diversos metales ferrosos y no ferrosos, y se utiliza con amplitud en la industria de fabricación metálica. Por su naturaleza relativamente sencilla, es fácil capacitar a los operadores. El proceso es versátil, rápido y económico, y la productividad de soldadura duplica la del proceso SMAW. El proceso GMAW se puede automatizar con facilidad y se presta para incorporarse a los sistemas robóticos y de manufactura flexible (ver capítulos 37 y 39).

30.4.4 Soldadura de arco con núcleo de fundente

El proceso de **soldadura de arco con núcleo de fundente** (FCAW, por sus siglas en inglés, mostrado en la fig. 30.11) es similar al de la soldadura por arco metálico y gas, excepto porque el electrodo tiene forma tubular y está relleno con fundente (de ahí el término *con núcleo de fundente*). Los electrodos con núcleo producen un arco más estable y mejores propiedades mecánicas del metal de soldadura, además de mejorar el contorno de la soldadura. En estos electrodos el fundente es mucho más flexible que el frágil recubrimiento que se usa en los electrodos SMAW, por lo que dichos electrodos se pueden suministrar en tramos largos y enrollados.

Los electrodos tienen en general diámetros pequeños, de 0.5 mm a 4 mm (0.020 a 0.15 pulgadas), y la potencia requerida es de unos 20 kW. También existen electrodos con núcleo y protección propia, que no necesitan protección externa con gas porque contienen fundentes que desprenden gases y protegen la zona de soldadura contra la atmósfera. Los electrodos de diámetro pequeño han hecho que la soldadura de materiales más delgados con este proceso sea no sólo posible, sino con frecuencia preferible. Estos electrodos también permiten soldar con relativa facilidad partes en distintas posiciones, y el fundente de composición química permite la soldadura de muchos metales.

El proceso de arco (FCAW) combina la versatilidad del SMAW con la característica de alimentación continua y automática del electrodo del GMAW. Es económico y versátil, por lo que se usa para soldar diversas uniones, sobre todo en los aceros, aceros inoxidables y aleaciones de níquel. La mayor rapidez de deposición de metal en el proceso FCAW (en comparación con el GMAW) ha permitido su aplicación para unir secciones de todos los espesores. El uso de los *electrodos tubulares* con diámetros muy pequeños ha ampliado el uso de este proceso a piezas de trabajo con secciones de menor tamaño.

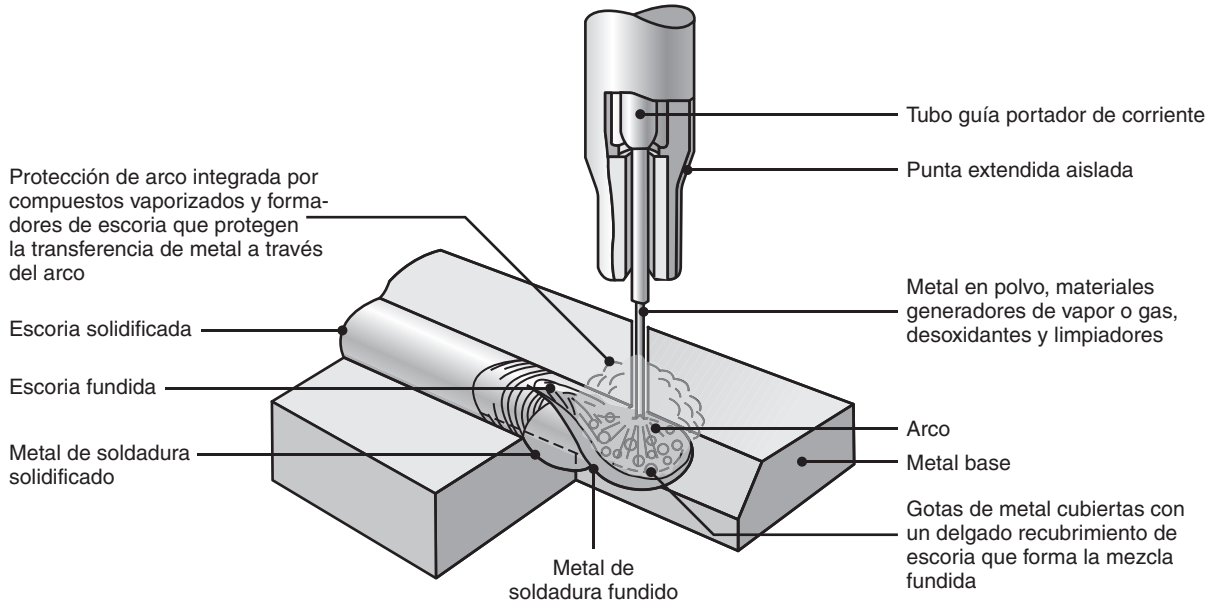


FIGURA 30.11 Esquema del proceso de soldadura por arco con núcleo de fundente. Esta operación es similar a la soldadura por arco metálico y gas, mostrada en la figura 30.10.

Una de las ventajas principales del proceso FCAW es la facilidad con que pueden desarrollarse formulaciones específicas del metal de aporte. Si se agregan elementos de aleación al núcleo de fundente, se puede producir virtualmente cualquier composición de aleación. Este proceso es fácil de automatizar y se adapta a sistemas de manufactura flexible y de robots.

30.4.5 Soldadura eléctrica por gas

La *soldadura eléctrica por gas* (EGW, por sus siglas en inglés) se utiliza fundamentalmente para soldar los extremos de secciones en sentido vertical y en un paso, con las piezas colocadas extremo con extremo (unión a tope). Se clasifica como un *proceso de soldadura con máquina,* porque requiere equipo especial (fig. 30.12). El metal de soldadura se deposita en una cavidad de la soldadura, entre las dos piezas por unir. El espacio se encierra entre dos *labios* de cobre enfriados por agua (*zapatas*) para evitar que escurra la escoria fundida. Transmisiones mecánicas suben las zapatas. También es posible hacer soldaduras circulares (por ejemplo, en tubos), girando la pieza de trabajo.

Uno o varios electrodos se alimentan por un conducto y se mantiene un arco continuo mediante electrodos con núcleo de fundente hasta a 750 A, o electrodos sólidos a 400 A. La potencia requerida es de unos 20 kW. La protección se efectúa por medio de un gas inerte, como bióxido de carbono, argón o helio, dependiendo del material que se suelda. El gas puede suministrarse mediante una fuente externa, producirse a partir de un electrodo con núcleo de fundente, o con ambos métodos.

El equipo de soldadura eléctrica por gas es fiable, y la capacitación de los operarios es relativamente sencilla. Los espesores de soldadura van de 12 mm a 75 mm (0.5 a 3 pulgadas) en aceros, titanio y aleaciones de aluminio. Suelen aplicarse en la construcción de puentes, recipientes a presión, tubos de pared gruesa y gran diámetro, tanques de almacenamiento y barcos.

30.4.6 Soldadura con electroescoria

La *soldadura con electroescoria* (ESW) y sus aplicaciones son similares a la soldadura eléctrica por gas (fig. 30.13). La principal diferencia es que el arco se inicia entre la punta del electrodo y el fondo de la pieza a soldar. Se agrega fundente, el cual se funde por el calor del arco. Después de que la escoria fundida llega a la punta del electrodo, el arco se extingue. El calor se produce en forma continua por la resistencia eléctrica de la escoria

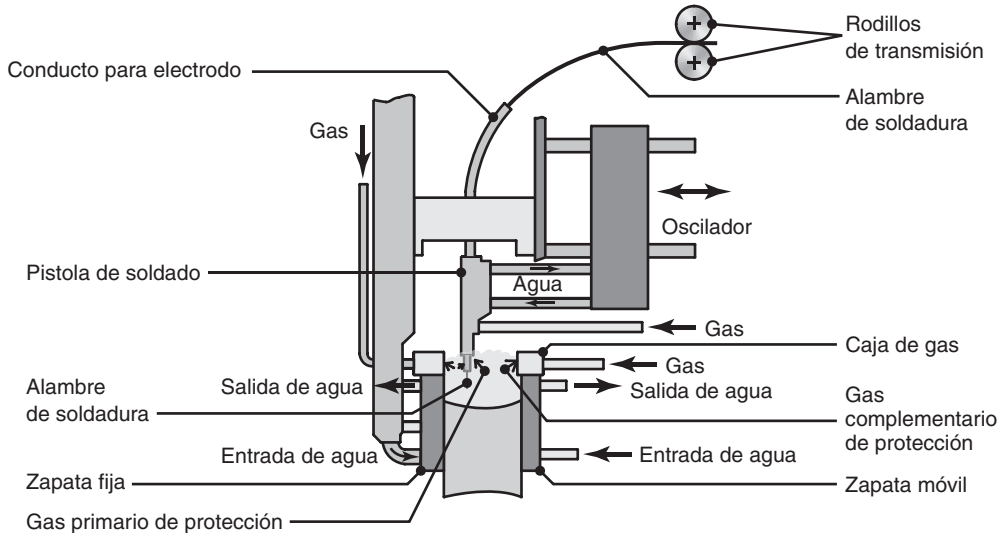


FIGURA 30.12 Esquema del proceso de soldadura eléctrica por gas.

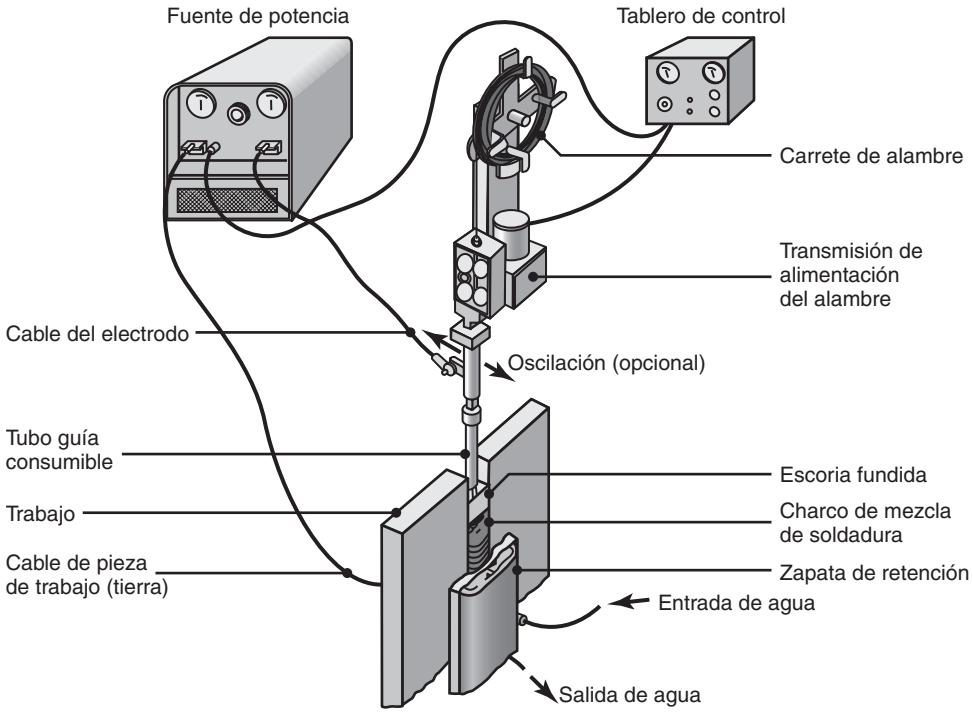


FIGURA 30.13 Equipo utilizado para las operaciones de soldadura con electroescoria.

fundida. Como el arco se extingue, la ESW no es estrictamente un proceso de soldadura por arco. Se pueden utilizar uno o varios electrodos, y también electrodos con núcleo de fundente. La guía puede ser no consumible (método convencional) o consumible.

La soldadura con electroescoria es capaz de soldar placas con espesores entre 50 mm y más de 900 mm (2 a 36 pulgadas), y la soldadura se hace en un paso. La corriente requerida es de unos 600 A a 40 o 50 V, aunque con placas gruesas se utilizan corrientes más elevadas. La velocidad de desplazamiento de la soldadura va de 12 a 36 mm/min (0.5 a 1.5 pulgadas/min). La calidad de la soldadura es buena. Este proceso se usa para grandes secciones de acero estructural, como maquinaria pesada, puentes, pozos petroleros, embarcaciones y recipientes para reactores nucleares.

30.5 Electrodos para soldadura por arco

Los *electrodos* para procesos de soldadura por arco consumibles ya descritos se clasifican de acuerdo con:

- La resistencia del metal para soldadura depositado.
- La corriente (CA o CD).
- El tipo de recubrimiento.

Los electrodos se identifican con números y letras (tabla 30.2) o mediante un código de colores, en particular si son demasiado pequeños para grabarles su identificación. Las dimensiones normales de los electrodos recubiertos se encuentran en el intervalo de 150 a 460 mm (6 a 18 pulgadas) de longitud y de 1.5 a 8 mm $\left(\frac{1}{16}\right.$ a $\left.\frac{5}{16}\right.$ de pulgada$\left.\right)$ de diámetro.

La American Welding Society (AWS) y el American National Standards Institute (ANSI) publican las especificaciones para los electrodos y metales de aporte (incluyendo

TABLA 30.2

Designación de electrodos de acero dulce recubiertos

El prefijo "E" indica electrodo para soldadura por arco.
Los primeros dos dígitos de los números de cuatro dígitos y los primeros tres dígitos de los números de cinco dígitos indican resistencia mínima a la tensión:

E60XX	60,000 psi resistencia mínima a la tensión
E70XX	70,000 psi resistencia mínima a la tensión
E110XX	110,000 psi resistencia mínima a la tensión

El penúltimo dígito indica la posición:

EXX1X	Todas las posiciones
EXX2X	Posición plana y filetes horizontales

Los últimos dos dígitos juntos indican el tipo de recubrimiento y la corriente a utilizar.
El sufijo (Ejemplo: EXXXX-A1) indica la aleación aproximada en el depósito de la soldadura:

—A1	0.5% Mo
—B1	0.5% Cr, 0.5% Mo
—B2	1.25% Cr, 0.5% Mo
—B3	2.25% Cr, 1% Mo
—B4	2% Cr, 0.5% Mo
—B5	0.5% Cr, 1% Mo
—C1	2.5% Ni
—C2	3.25% Ni
—C3	1% Ni, 0.35% Mo, 0.15% Cr
—D1 y D2	0.25–0.45% Mo, 1.75% Mn
—G	0.5% mín. Ni, 0.3% mín. Cr, 0.2% mín. Mo, 0.1% mín. V, 1% mín. Mn (sólo se requiere un elemento)

tolerancias dimensionales, procedimientos y procesos de control de calidad). Algunas especificaciones aparecen en las Especificaciones para Materiales Aeroespaciales (AMS, por sus siglas en inglés) editadas por la Society of Automotive Engineers (SAE). Los electrodos se venden por peso y están disponibles en varios tamaños y especificaciones. La selección y las recomendaciones de electrodos para un metal en particular y su aplicación se pueden encontrar en los manuales de los proveedores y en diversas referencias listadas al final de este capítulo.

Recubrimientos de electrodo. Los electrodos están *recubiertos* con materiales arcillosos que incluyen aglutinantes de silicato y materiales en polvo como óxidos, carbonatos, fluoruros, aleaciones metálicas y celulosa (celulosa de algodón y aserrín). El recubrimiento (que es frágil y participa en interacciones complejas durante la soldadura) tiene las siguientes funciones básicas:

- Estabilizar el arco.
- Generar gases que actúen como protectores contra la atmósfera circundante; estos gases son el bióxido de carbono y vapor de agua (así como monóxido de carbono e hidrógeno en cantidades pequeñas).
- Controla la velocidad a la que se funde el electrodo.
- Actúa como fundente para proteger la soldadura contra la formación de óxidos, nitruros y otras inclusiones y para proteger el charco de soldadura fundida (con la escoria resultante).
- Agregar elementos de aleación en la zona de soldadura, a fin de mejorar las propiedades de la unión; entre estos elementos están los desoxidantes, para evitar que la soldadura se vuelva frágil.

El recubrimiento del electrodo o la escoria depositada deben eliminarse después de cada pasada para asegurar que la soldadura sea buena; con este propósito se puede usar un cepillo de alambre (manual o mecánico). También existen electrodos y alambres desnudos, fabricados con aceros inoxidables y aleaciones de aluminio, que se usan como metales de aporte en diversas operaciones de soldadura.

30.6 Soldadura por haz de electrones

En la *soldadura por haz de electrones* (EBW, por sus siglas en inglés), desarrollada en la década de 1960, se genera calor mediante un fino haz de electrones de alta velocidad. La energía cinética de los electrones se convierte en calor al chocar contra la pieza de trabajo. Este proceso requiere equipo especial a fin de enfocar el haz de electrones sobre la pieza, normalmente en vacío; cuanto mayor sea el vacío, mayor será la penetración del haz y la relación entre profundidad y anchura será mayor; por eso los métodos se denominan EBW-HV (para alto vacío) y EBW-MV (para medio vacío). Algunos materiales se pueden soldar mediante el EBW-NV (sin vacío).

Casi todos los metales se pueden soldar mediante el EBW, y el espesor de la pieza de trabajo puede variar desde hoja delgada hasta placa. La intensa energía también puede producir agujeros en la pieza (**técnica de ojo de cerradura**; sección 30.3). En general no se requiere gas, fundente protector ni metal de aporte. Las capacidades de los cañones de electrones pueden llegar hasta 100 kW.

Este proceso tiene la capacidad de efectuar soldaduras de alta calidad con lados casi paralelos, que sean profundas y estrechas y posean pequeñas zonas afectadas por el calor (ver sección 30.9). Las relaciones de profundidad a anchura van de 10 a 30. Los tamaños de las soldaduras realizadas mediante EBW son mucho menores que los efectuados por medio de procesos convencionales. Si se utiliza automatización y servocontroles, se pueden controlar con exactitud los parámetros a velocidades de soldadura de hasta 12 m/min (40 pies/min).

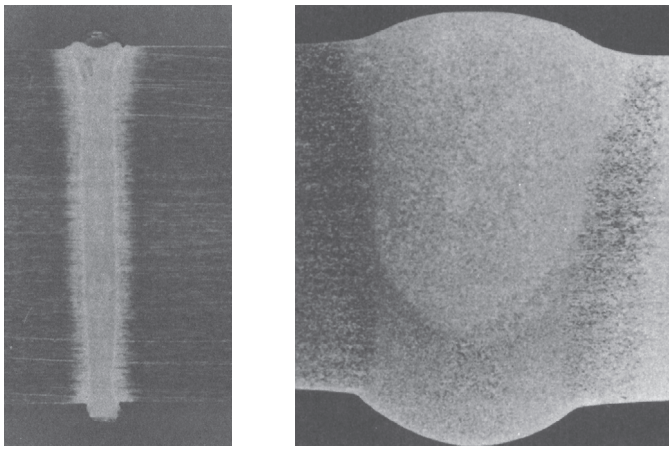
Mediante este proceso se puede soldar casi cualquier metal, a tope o en traslape, con espesores de hasta 150 mm (6 pulgadas). La distorsión y la contracción en el área de la soldadura son mínimas. La calidad de la soldadura es buena y de muy alta pureza. Suele aplicarse en las soldaduras tanto de componentes de aviones, misiles, nucleares y electrónicos, como de engranes y flechas para la industria automotriz. El equipo de soldadura por haz de electrones genera rayos X, de ahí que sea fundamental una vigilancia adecuada y el mantenimiento periódico.

30.7 Soldadura por rayo láser

La *soldadura por rayo láser* (LBW, por sus siglas en inglés) utiliza un rayo láser de gran potencia como fuente de calor para producir una soldadura por fusión. Debido a que el rayo se puede concentrar en un área muy pequeña, tiene gran densidad de energía y una capacidad de penetración profunda. Se puede dirigir, conformar y enfocar con precisión sobre la pieza de trabajo. En consecuencia, este proceso es particularmente adecuado para soldar uniones profundas y estrechas (fig. 30.14), con relaciones normales de profundidad a anchura entre 4 a 10.

La soldadura de componentes de transmisiones es la aplicación más difundida en la industria automotriz, en tanto que la soldadura de piezas delgadas se utiliza para componentes electrónicos, entre muchas otras aplicaciones. El rayo láser se puede generar en **pulsos** (en milisegundos) para aplicaciones (como en la soldadura por puntos de materiales delgados) con potencias de hasta 100 kW. Los sistemas de láser **continuo** de varios kW se usan para soldaduras profundas en secciones gruesas.

Los procesos de soldadura por rayo láser producen soldaduras de buena calidad, con contracción y distorsión mínimas y buena resistencia; en general, son dúctiles y li-



(a) (b)

FIGURA 30.14 Comparación del tamaño de los cordones de soldadura: *(a)* soldadura por rayo láser o por haz de electrones, y *(b)* soldadura por arco de tungsteno. *Fuente:* Cortesía de American Welding Society, *Welding Handbook*, 8a. ed., 1991.

bres de porosidades. El proceso se puede automatizar para utilizarlo con diversos materiales de hasta 25 mm (1 pulgada) de espesor; es muy eficaz en piezas de trabajo delgadas. Como se indicó en la sección 16.2.2, las piezas de lámina metálica *soldadas a la medida* se unen principalmente por medio de soldadura por rayo láser utilizando la robótica para obtener un control preciso de la trayectoria del rayo durante el soldado.

Los metales y las aleaciones que normalmente se sueldan son el aluminio, titanio, metales ferrosos, cobre, superaleaciones y los metales refractarios. Las velocidades de soldado van de 2.5 m/min (8 pies/min) hasta 80 m/min (250 pies/min) para metales delgados. Debido a la naturaleza del proceso, la soldadura puede efectuarse en lugares que de otra manera serían inaccesibles. Al igual que con otros métodos de soldadura automatizados, la habilidad que se requiere del operario es mínima. En la soldadura por rayo láser tiene especial importancia la seguridad, debido a los riesgos extremos a que se exponen los ojos y la piel; los rayos láser de estado sólido (YAG) también son peligrosos. (Ver tabla 27.2 sobre los tipos de láseres).

Las principales ventajas del LBW sobre EBW son las siguientes:

- No se requiere vacío, así que el rayo se puede transmitir por el aire.
- A los rayos láser se les puede dar forma, manipular y enfocar ópticamente (usando fibras ópticas), por lo que el proceso puede automatizarse con facilidad.
- Los láseres no generan rayos X.
- La calidad de la soldadura es mejor que en la EBW, tiene menor tendencia a la fusión incompleta, salpicaduras y porosidades, y produce menos distorsión.

EJEMPLO 30.1 Soldadura láser para hojas de rasurar

En la figura 30.15 se muestra un acercamiento al cartucho para rasuradora Gillette Sensor^{MR}. Cada una de las delgadas hojas de alta resistencia tiene 13 puntos de soldadura, 11 de los cuales son visibles (como puntos oscuros de alrededor de 0.5 mm de diámetro) en cada hoja en la fotografía. Usted puede inspeccionar las soldaduras en hojas reales con una lupa o un microscopio.

Las soldaduras se realizan con un láser Nd:YAG equipado con sistema de fibra óptica. Este equipo proporciona una manipulación muy flexible para el rayo y puede dirigirse con exactitud a cualquier lugar a lo largo de la hoja. Con un conjunto de estas máquinas, la capacidad de producción es de 3 millones de soldaduras por hora, con una calidad de alta exactitud y consistencia.

Fuente: Cortesía de Lumonics Corporation, Industrial Products Division.

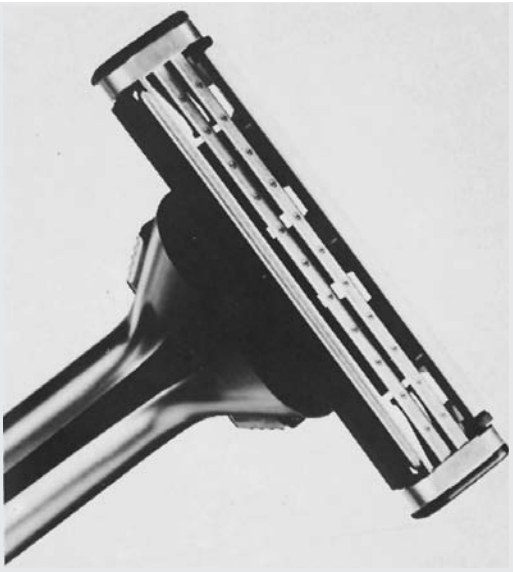


FIGURA 30.15 Detalle del cartucho para rasuradora Gillette Sensor^{MR} mostrando los puntos de soldadura láser

30.8 | Corte

Además de hacerlo por medios mecánicos, una pieza de material se puede dividir en dos o más partes, o en diversos contornos, mediante una fuente de calor que funde y retira una zona angosta de la pieza de trabajo. Las fuentes de calor pueden ser sopletes, arcos eléctricos o láseres.

Corte con oxígeno y combustible gaseosos. *El corte con oxígeno y combustible gaseosos* (OFC, por sus siglas en inglés), u oxicorte, se parece a la soldadura con oxígeno y combustible gaseosos, pero en este caso la fuente de calor sirve para retirar una zona delgada de una placa o lámina metálica (fig. 30.16a). Este proceso es adecuado en particular para los aceros. Las reacciones básicas con el acero son:

$$Fe + O \longrightarrow FeO + \text{calor} \tag{30.4}$$

$$3Fe + 2O_2 \longrightarrow Fe_3O_4 + \text{calor} \tag{30.5}$$

y

$$4Fe + 3O_2 \longrightarrow 2\,Fe_2O_3 + \text{calor} \tag{30.6}$$

La mayor cantidad de calor se genera con la segunda reacción y puede producir un aumento de temperatura de casi 870 °C (1600 °F). Sin embargo, esta temperatura no es suficientemente elevada para cortar los aceros, por lo que la pieza se *precalienta* con un gas combustible y el oxígeno se introduce después (ver la boquilla transversal en la fig. 30.16a). Cuanto mayor sea el contenido de carbono en el acero, mayor será la temperatura de precalentamiento requerida. El corte se produce principalmente por la oxidación (quemado) del acero; también ocurre alguna fusión. Con este método se pueden cortar además hierros fundidos y piezas de acero colado. Este proceso genera una **ranura de corte** similar a la producida por el aserrado con una hoja de sierra o mediante el EDM con alambre (ver fig. 27.12).

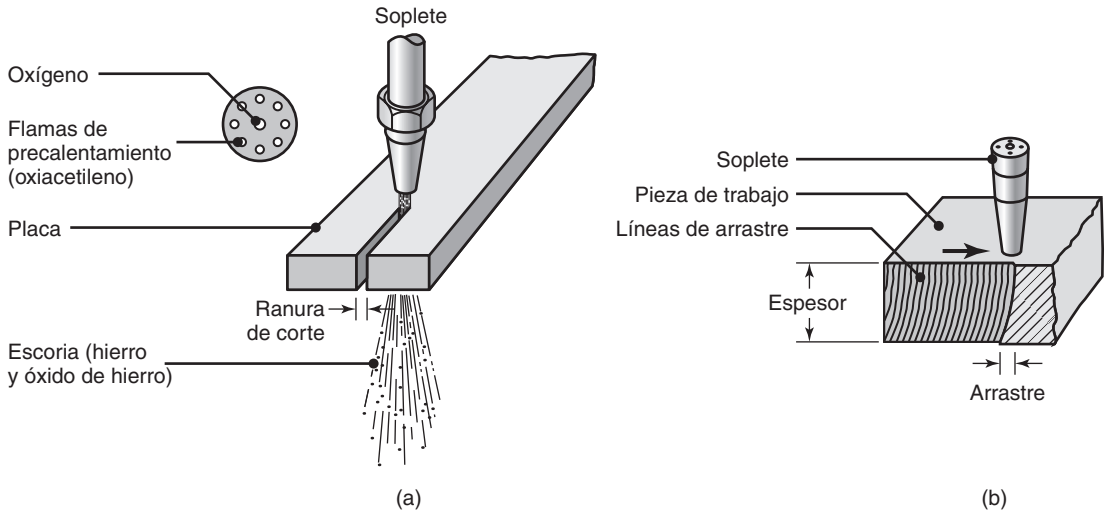


FIGURA 30.16 *(a)* Corte por flama de una placa de acero con un soplete de oxiacetileno, y sección transversal de la boquilla del soplete. *(b)* Sección transversal de la placa cortada por flama mostrando las líneas de arrastre.

El espesor máximo que se puede cortar mediante el OFC depende sobre todo de los gases que se usen. Con oxiacetileno, el espesor máximo es de casi 300 mm (12 pulgadas); con soplete oxhídrico, de unos 600 mm (24 pulgadas). Los anchos de la ranura de corte van de alrededor de 1.5 mm a 10 mm (0.06 a 0.4 pulgada), con un control de tolerancias razonablemente bueno. La flama deja **líneas de arrastre** en la superficie cortada (fig. 30.16b), que produce una superficie más rugosa que las que se obtienen por procesos como el aserrado, troquelado u otras operaciones con herramientas de corte mecánico. En el OFC, la distorsión causada por la distribución no uniforme de temperatura puede ser un problema serio.

Aunque se ha usado desde hace mucho tiempo en trabajos de recuperación y reparación, el corte con oxígeno y combustible gaseosos también puede utilizarse en la manufactura. Los sopletes se pueden guiar en diversas trayectorias de forma manual, mecánica o mediante máquinas automáticas con controladores programables y robots. El *corte bajo el agua* se efectúa con sopletes de diseño especial que producen una cubierta de aire comprimido entre la flama y el agua circundante.

Corte por arco. Los procesos de *corte por arco* se basan en los mismos principios que la soldadura por arco. Con ellos se pueden cortar diversos materiales a grandes velocidades, pero, como en la soldadura, también dejan una zona afectada por el calor que se debe tener en cuenta, en particular en las aplicaciones críticas.

En el **corte por arco de carbono en aire** (CAC-A) se emplea un electrodo de carbono y el metal fundido se sopla con un chorro de aire a gran velocidad. Así, el metal que se corta no se oxida. Este proceso se utiliza en particular para acanalar y biselar (remosión de metal desde la superficie). Sin embargo, es ruidoso y el metal fundido puede salir despedido a grandes distancias, ocasionando riesgos de seguridad.

El **corte por arco de plasma** (PAC, por sus siglas en inglés) produce las máximas temperaturas. Se utiliza para cortes rápidos de placas de metal no ferroso y de acero inoxidable. Su productividad es mayor que la de los procesos con oxígeno y combustible gaseosos. Produce buen acabado superficial y ranuras angostas de corte, y es el más popular de los procesos de corte que usan controladores programables en la manufactura hoy en día.

Los **haces de electrones** y los **rayos láser** se usan para cortar con mucha exactitud una gran variedad de metales, como se indica en las secciones 27.6 y 27.7. El acabado superficial es mejor que el de otros procesos térmicos de corte, y la ranura de corte es más angosta.

30.9 Unión soldada, calidad y pruebas

En una unión soldada se pueden identificar tres zonas distintas, como se muestra en la figura 30.17:

1. *Metal base*.
2. *Zona afectada por el calor*.
3. *Metal de soldadura*.

La metalurgia y las propiedades de la segunda y tercera zonas dependen en gran medida del tipo de metales unidos, el proceso particular de unión, los metales de aporte utilizados (en su caso) y las variables del proceso de soldadura. A la unión producida sin metal de aporte se le denomina *autógena*, y su zona de soldadura está compuesta por el *metal base resolidificado*. La unión realizada con un metal de aporte tiene una zona central llamada *metal de soldadura* y consta de una mezcla del metal base y de los metales de aporte.

Solidificación del metal de soldadura. Después de aplicar calor e introducir el metal de aporte (en su caso) en la zona de soldadura, la unión soldada se deja enfriar a temperatura ambiente. El proceso de *solidificación* es similar al de la fundición y comienza con la formación de granos columnares (dendríticos) (fig. 10.3). Estos granos son relativamente largos y se forman paralelos al flujo de calor. Debido a que los metales son mejores conductores de calor que el aire circundante, los granos se disponen de manera paralela al plano de los dos componentes que se están soldando (fig. 30.18a). Por el contrario, en la figura 30.18b y c se muestran los granos en una soldadura poco profunda.

La estructura y el tamaño del grano dependen de la aleación metálica específica, el proceso particular de soldadura empleado y el tipo de metal de aporte. Debido a que comienza en un estado fundido, el metal de soldadura básicamente tiene una estructura *colada*, y ya que se enfría de manera lenta, posee granos gruesos. En consecuencia, esta estructura suele tener baja resistencia, tenacidad y ductilidad. Sin embargo, la selección apropiada de la composición del metal de aporte, o de los tratamientos térmicos posteriores al soldado, pueden mejorar las propiedades mecánicas de la unión.

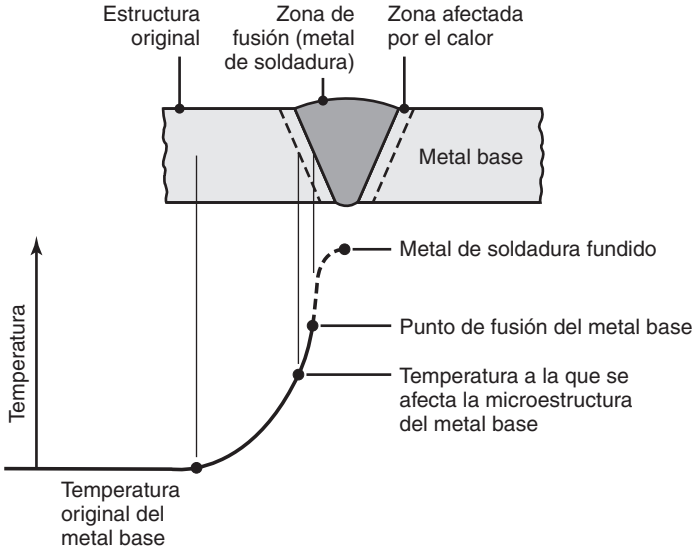


FIGURA 30.17 Características de una zona normal de fusión-soldadura en la soldadura con oxígeno y combustible gaseosos y por arco eléctrico.

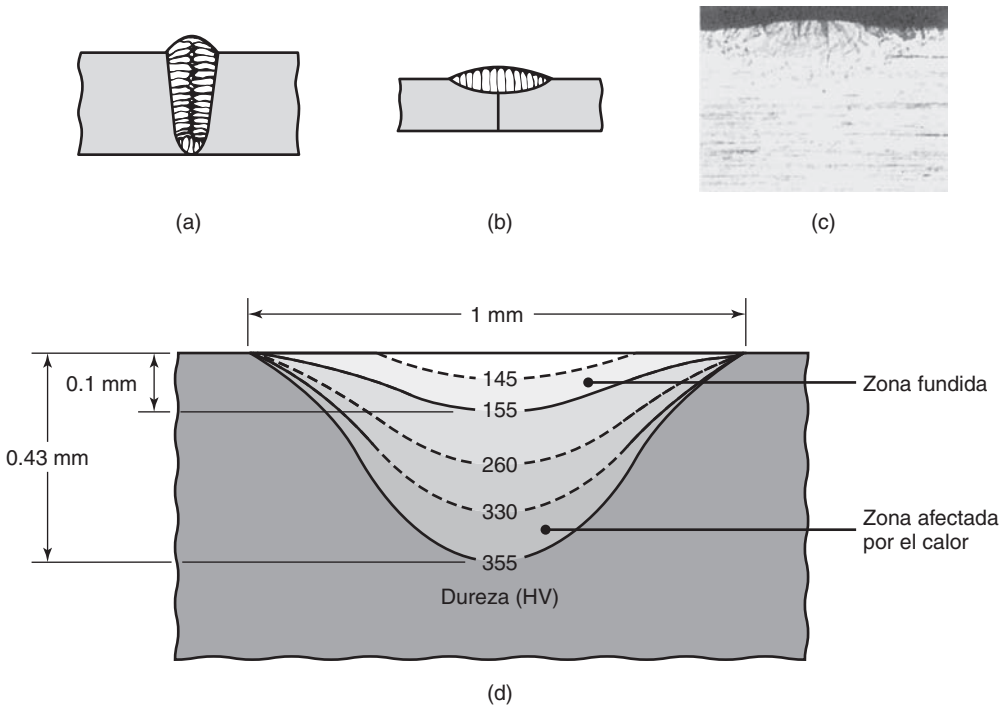


FIGURA 30.18 Estructura de los granos en *(a)* una soldadura profunda, y *(b)* una soldadura poco profunda. Obsérvese que los granos en el metal de soldadura solidificado son perpendiculares a su interfaz con el metal base. *(c)* Cordón de soldadura sobre una tira de níquel laminado en frío, producido por rayo láser. *(d)* Perfil de microdureza (HV) a través de un cordón de soldadura.

La estructura resultante depende de la aleación en particular, su composición y el ciclo térmico al que se somete la unión. Por ejemplo, se pueden controlar y reducir las velocidades de enfriamiento mediante el *precalentamiento* del área general de la soldadura antes de soldar. El precalentamiento es importante, sobre todo para metales que tienen alta conductividad térmica, como el aluminio y el cobre. Sin precalentamiento, el calor producido durante la soldadura se disipa con rapidez a través del resto de las partes que se están uniendo.

Zona afectada por el calor. La *zona afectada por el calor* (HAZ, por sus siglas en inglés) está dentro del propio metal base. Tiene una microestructura diferente de la del metal base antes de la soldadura, debido a que se ha sometido en forma temporal a temperaturas elevadas durante el soldado. Las porciones del metal base que se encuentran lo suficientemente alejadas de la fuente de calor no sufren ningún cambio estructural durante el soldado debido a que se someten a una temperatura mucho menor.

Las propiedades y la microestructura de la HAZ dependen de *(a)* la velocidad de suministro de calor y de enfriamiento, y *(b)* la temperatura a la que se elevó esta zona. Además de los factores metalúrgicos (como el tamaño original y la orientación del grano, y el grado de trabajo en frío previo), las propiedades físicas (entre ellas el calor específico y la conductividad térmica de los metales) también afectan el tamaño y las características de esta zona.

La resistencia y dureza de la zona afectada por el calor (fig. 30.18d) dependen en parte de la forma en que se desarrollaron la resistencia y dureza originales del metal base antes de la soldadura. Como se indicó en los capítulos 2 y 4, éstas pudieron haberse desarrollado mediante *(a)* el trabajo en frío; *(b)* el reforzamiento por solución sólida; *(c)* el endurecimiento por precipitación, o *(d)* diversos tratamientos térmicos. Los efectos de

estos métodos de reforzamiento son complejos y la forma más simple de analizarlos es la del metal base que se ha trabajado en frío, como por laminado o forja en frío.

El calor que se aplica durante el proceso *recristaliza* los granos alargados del metal base, trabajado en frío. Los granos que se encuentran lejos del metal de soldadura se recristalizan como granos finos, equiaxiales; en cambio, los granos cercanos al metal de soldadura se someten a temperaturas elevadas por un periodo más largo. En consecuencia, adquieren un tamaño mayor (crecimiento del grano) y esta región se hace más blanda y de menor resistencia. La unión será más débil en la zona afectada por el calor.

Los efectos del calor en la HAZ para las uniones efectuadas con metales diferentes y con aleaciones reforzadas mediante otros métodos son tan complejos que quedan fuera del alcance de este libro. Los detalles se pueden encontrar en las referencias más avanzadas que se relacionan en la bibliografía al final de este capítulo. Debido a la historia de los ciclos térmicos y los cambios microestructurales que se presentan, una unión soldada puede desarrollar diversas **discontinuidades**. Las discontinuidades de la soldadura también se pueden originar por la aplicación inadecuada o descuidada de las técnicas de soldadura o por una capacitación deficiente del operador. En la siguiente sección se indican las discontinuidades importantes que afectan la calidad de la soldadura.

30.9.1 Calidad de la soldadura

Como consecuencia del historial de los ciclos térmicos y los cambios microestructurales ocurridos, una soldadura puede desarrollar diversas **discontinuidades**. Éstas también se pueden originar por la aplicación inadecuada o descuidada de las técnicas de soldadura o por una capacitación deficiente del operador. En esta sección se describen las discontinuidades importantes que afectan la calidad de la soldadura.

Porosidad. La *porosidad* en las soldaduras se origina por:

- Los gases liberados durante la fusión del área soldada, pero que quedan atrapados en la solidificación.
- Las reacciones químicas durante el soldado.
- Los contaminantes.

La mayoría de las uniones soldadas contienen alguna porosidad, que suele presentarse en forma de esferas o cavidades alargadas (ver también sección 10.6.1). La distribución de la porosidad en la zona de soldadura puede ser aleatoria o concentrarse en cierta región.

La porosidad en las soldaduras se puede reducir mediante las siguientes prácticas:

- Selección apropiada de los electrodos y los metales de aporte.
- Técnicas mejoradas de soldadura, como el precalentamiento del área de soldadura o aumentando la rapidez de suministro de calor.
- Limpieza apropiada, además de evitar que los contaminantes entren en la zona de soldadura.
- Reducción de las velocidades de soldado, para dar tiempo a que escape el gas.

Inclusiones de escoria. Las *inclusiones de escoria* son compuestos como óxidos, fundentes y materiales de recubrimiento de los electrodos que quedan atrapados en la zona de soldadura. Si los gases de protección no son efectivos durante la soldadura, la contaminación del ambiente también puede contribuir a tales inclusiones. Son importantes asimismo las condiciones de soldado; si se controlan los parámetros de la soldadura, la escoria fundida flota en la superficie del metal fundido de la soldadura, por lo que no queda atrapada.

Las inclusiones de escoria se pueden evitar mediante las siguientes prácticas:

- Limpiando la superficie del cordón de soldadura antes de depositar la siguiente capa, por medio de un cepillo de alambre (manual o mecánico) o con un cincel.
- Aportando suficiente gas de protección.
- Rediseñando la unión a fin de permitir suficiente espacio para la manipulación apropiada del metal de soldadura fundido.

Fusión y penetración incompletas. La *fusión incompleta* (falta de fusión) produce cordones deficientes de soldadura, como los mostrados en la figura 30.19. Se puede obtener un mejor cordón mediante el uso de las siguientes prácticas:

- Elevando la temperatura del metal base.
- Limpiando el área de soldadura antes de soldar.
- Modificando el diseño de la unión y cambiando el tipo de electrodo empleado.
- Aportando suficiente gas de protección.

La *penetración incompleta* ocurre cuando la profundidad de la unión soldada es insuficiente. La penetración puede mejorarse por medio de las siguientes prácticas:

- Aumentando el suministro de calor.
- Reduciendo la velocidad de desplazamiento durante la soldadura.
- Modificando el diseño de la unión.
- Asegurando que las superficies a unir coincidan apropiadamente una con otra.

Perfil de soldadura. El *perfil de soldadura* es importante no sólo por sus efectos sobre la resistencia y apariencia de la soldadura, sino porque indica una fusión incompleta, o la presencia de inclusiones de escoria en las soldaduras de capas múltiples.

- El **llenado incompleto** se produce cuando la unión no se llena con la cantidad apropiada de metal de soldadura (fig. 30.20a).
- El **socavado** es el resultado de la fusión lejos del metal base y la consecuente generación de una ranura con la forma de una depresión aguda o muesca (fig. 30.20b). Si el socavado es profundo o agudo, puede actuar como un elevador de esfuerzos y

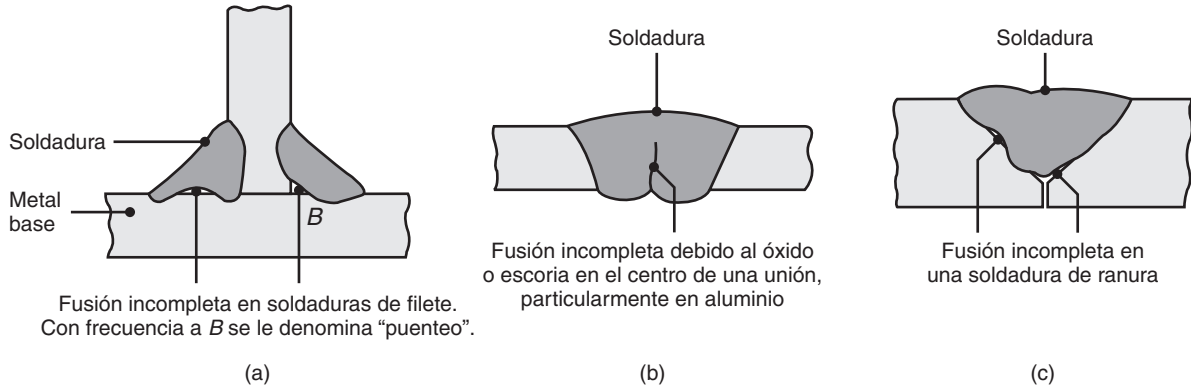


FIGURA 30.19 Ejemplos de diversas discontinuidades en las soldaduras por fusión.

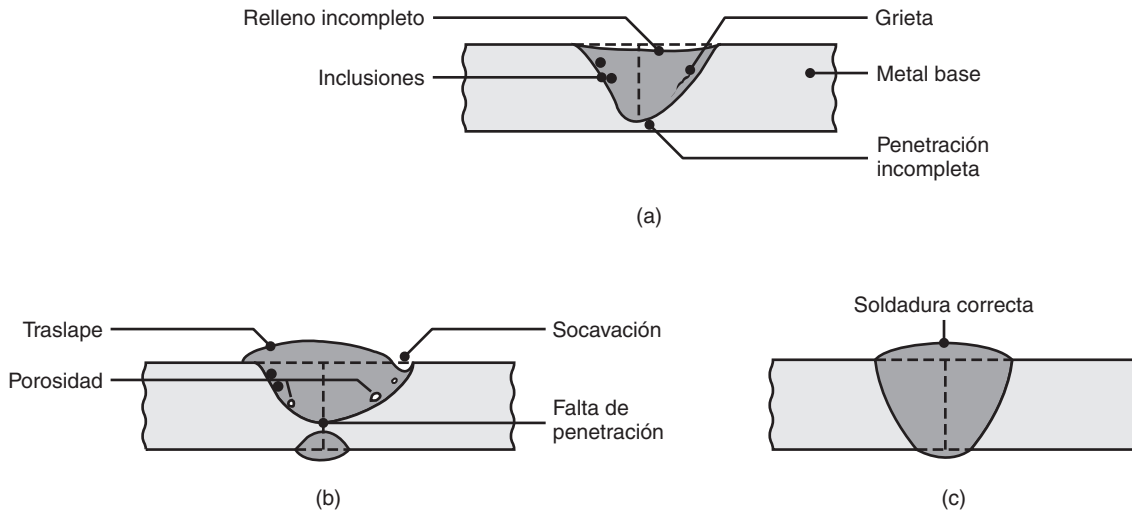


FIGURA 30.20 Ejemplos de diversos defectos en las soldaduras por fusión.

reducir la resistencia a la fatiga de la unión; en esos casos, puede llevar a una falla prematura.

- El **traslape** es una discontinuidad de la superficie (fig. 30.20b) debida por lo general a una práctica deficiente de soldado o a la selección de materiales inapropiados. En la figura 30.20c se muestra una buena soldadura.

Grietas. Las grietas pueden ocurrir en diferentes ubicaciones y direcciones en el área de la soldadura. Los tipos comunes de grietas son longitudinales, transversales, cráteres, debajo del cordón y junto al cordón (fig. 30.21).

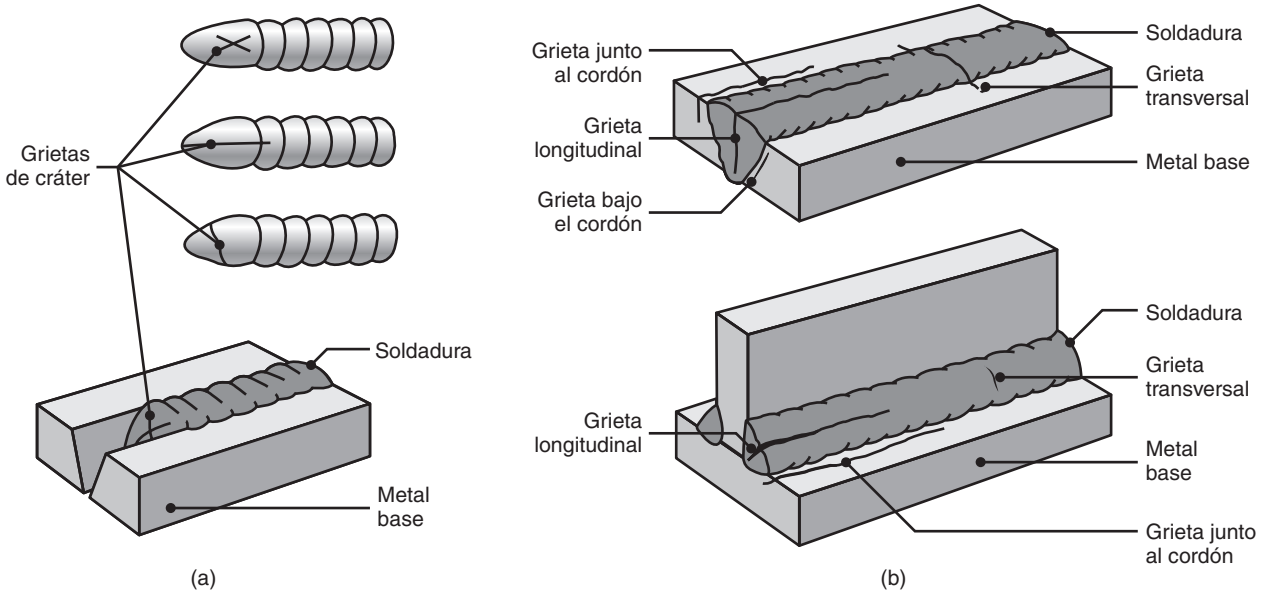


FIGURA 30.21 Tipos de grietas desarrolladas en uniones soldadas. Las grietas son producto de esfuerzos térmicos, similares al desarrollo de grietas en caliente en las fundiciones, como se muestra en la figura 10.12.

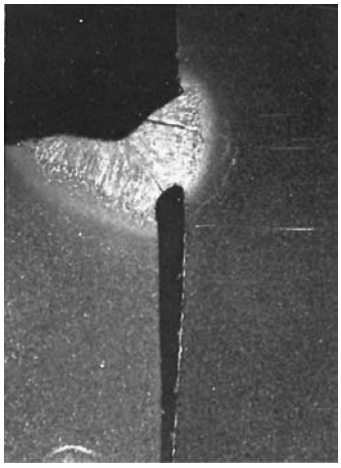


FIGURA 30.22 Grieta en un cordón de soldadura. A los dos componentes soldados no se les permitió contraerse con libertad después de terminar la soldadura. *Fuente:* Cortesía de Packer Engineering.

Por lo general, estas grietas son el resultado de una combinación de los siguientes factores:

- Gradientes de temperatura que provocan esfuerzos térmicos en la zona de soldadura.
- Variaciones en la composición de la zona de soldadura que ocasionan diferentes velocidades de contracción durante el enfriamiento.
- Fragilización de los límites de los granos (sección 1.4), ocasionada por la segregación de elementos como el azufre hacia los límites de los granos, y movimiento del límite sólido-líquido mientras el metal de soldadura comienza a solidificar.
- Fragilización por hidrógeno (sección 2.10.2).
- Incapacidad de contracción del metal de soldadura durante el enfriamiento (fig. 30.22). Ésta es una situación similar a las grietas de contracción en las fundiciones (fig. 10.12) y se relaciona con una restricción excesiva de la pieza de trabajo durante la operación de soldadura.

Las grietas también se clasifican como **grietas en caliente**, que ocurren cuando la unión aún se encuentra a temperatura elevada, y **grietas en frío**, que se desarrollan después de que el metal de soldadura se ha solidificado.

Las medidas básicas para prevenir las grietas en la soldadura son las siguientes:

- Modificar el diseño de la unión para minimizar los esfuerzos derivados de la contracción durante el enfriamiento.
- Cambiar los parámetros, procedimientos y secuencia de la operación de soldadura.
- Precalentar los componentes a soldar.
- Evitar el enfriamiento rápido de los componentes soldados.

Hojeamiento. Al describir la anisotropía de los metales deformados plásticamente en la sección 1.5, se estableció que la pieza de trabajo es más débil cuando se prueba en la dirección de su espesor debido a la alineación de las impurezas no metálicas e inclusiones (en franjas). Esta condición es muy evidente en las placas laminadas y las formas estruc-

turales. Al soldar dichos componentes, se pueden desarrollar *hojeamientos* debido a la contracción de los componentes restringidos de la estructura durante el enfriamiento. Es posible evitar dichos hojeamientos tomando provisiones para la contracción de los miembros, o modificando el diseño de la unión a fin de hacer que el cordón de soldadura penetre con mayor profundidad en el componente más débil.

Daño superficial. Durante el soldado, parte del metal puede salpicar y depositarse como pequeñas gotas en las superficies adyacentes. En los procesos de soldadura por arco, el electrodo puede tocar sin advertirlo las partes que se están soldando en lugares distintos de la zona de soldadura (**golpes del arco**). Es posible que dichas discontinuidades superficiales sean objetables por razones de apariencia o por el uso posterior de la parte soldada. Si son severas, estas discontinuidades afectarán de manera adversa las propiedades de la estructura soldada, sobre todo en los metales sensibles a las muescas. Para evitar el daño superficial, es importante utilizar las técnicas y los procedimientos apropiados de soldadura.

Esfuerzos residuales. Debido al calentamiento y enfriamiento localizado durante la soldadura, la dilatación y contracción del área soldada provoca *esfuerzos residuales* en la pieza de trabajo (ver también la sección 2.11), que pueden causar los siguientes defectos:

- Distorsión, alabeo y pandeo de las partes soldadas (fig. 30.23).
- Agrietamiento por esfuerzo-corrosión (sección 2.10.2).
- Distorsión posterior, si se retira después una porción de la estructura soldada, mediante maquinado o aserrado, por ejemplo.
- Reducción de la vida de fatiga de la estructura soldada.

Por referencias, en la figura 30.24 se describe mejor el tipo y la distribución de los esfuerzos residuales en las soldaduras. Cuando se van a soldar dos placas, una zona larga y angosta se somete a temperaturas elevadas, mientras que el resto de las placas se mantiene fundamentalmente a temperatura ambiente. Una vez que se termina el soldado y pasa el tiempo, el calor de la zona de soldadura se disipa en forma lateral dentro de las placas, mientras el área de soldadura se enfría. Entonces, las placas comienzan a dilatarse de modo longitudinal, mientras que la longitud soldada comienza a contraerse (fig. 30.23b).

Si no se restringe la placa, se alabea, como se muestra en la figura 30.23a. Sin embargo, si a la placa no se le permite el alabeo, desarrolla esfuerzos residuales que normalmente se distribuyen de la manera que se muestra en la figura 30.24b. Obsérvese que la magnitud de los esfuerzos residuales a compresión en las placas se reduce a cero en un

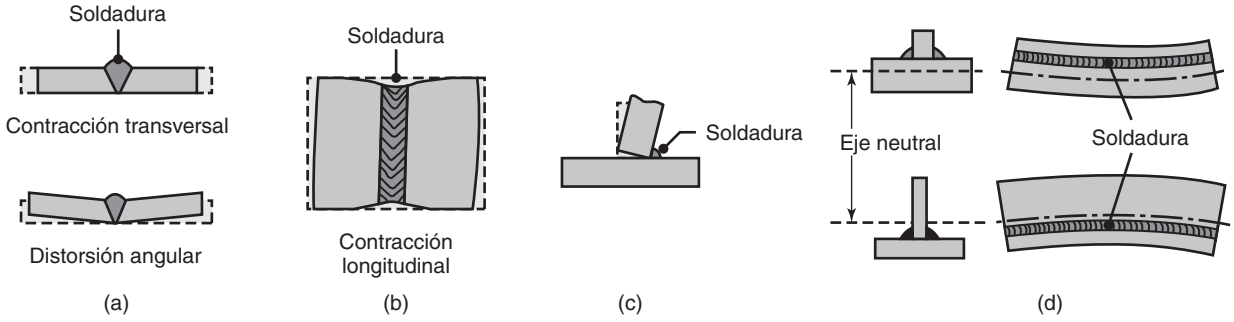


FIGURA 30.23 Distorsión de partes después de la soldadura. La distorsión es provocada por dilatación y contracción térmica diferencial de diversas regiones del ensamble soldado.

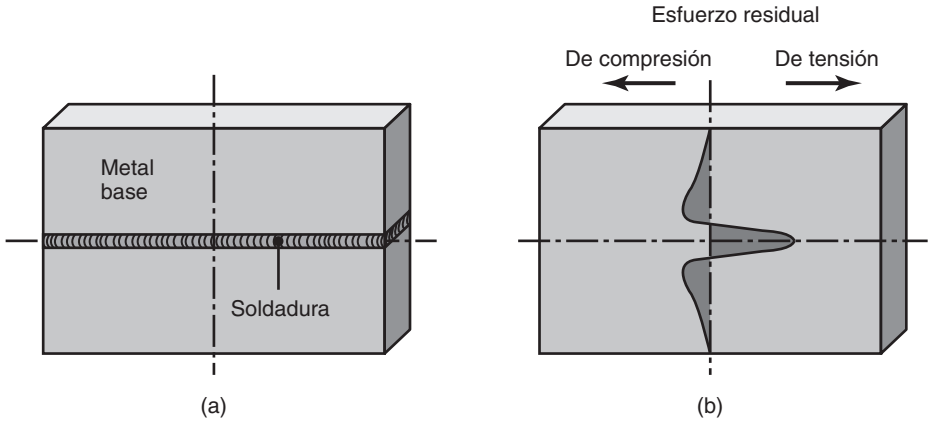


FIGURA 30.24 Esfuerzos residuales desarrollados en *(a)* una unión recta a tope. Obsérvese que los esfuerzos residuales mostrados en *(b)* deben equilibrarse internamente (ver también figura 2.29).

punto alejado del área de soldadura. Como no existen fuerzas externas actuando sobre las placas soldadas, las fuerzas de tensión y compresión representadas por estos esfuerzos residuales deben equilibrarse entre sí.

En la figura 30.25 se muestran los eventos que derivan en la distorsión de un marco soldado. Antes de soldar, el marco está libre de esfuerzos, como se presenta en la figura 30.25a. La forma puede ser bastante rígida y también es posible que existan soportes para sostener la estructura. Cuando se coloca el cordón de soldadura, el metal fundido llena la separación entre las superficies a unir y fluye hacia fuera para formar el cordón de soldadura. En este momento, la soldadura no está sujeta a esfuerzo. Después, el cordón de soldadura se solidifica y tanto el cordón como el material circundante se enfrían a temperatura ambiente. Al enfriarse estos materiales tratan de contraerse, pero la masa del cuerpo soldado los limita; el resultado es que este cuerpo se distorsiona (fig. 30.25c) y se desarrollan esfuerzos residuales.

La distribución de esfuerzos residuales mostrada coloca a la soldadura y a la HAZ en un estado de tensión residual que es dañina desde el punto de vista de la fatiga. Muchas estructuras soldadas utilizan materiales trabajados en frío (como perfiles extruidos o formados en rodillos) y éstos son relativamente fuertes y resistentes a la fatiga. La propia soldadura puede tener porosidad (ver fig. 30.20b) que actuaría como elevadora de esfuerzos y ayudaría al crecimiento de las grietas por fatiga, o pueden existir otras grietas que crecen con la fatiga. En general, la HAZ es menos resistente a la fatiga que el

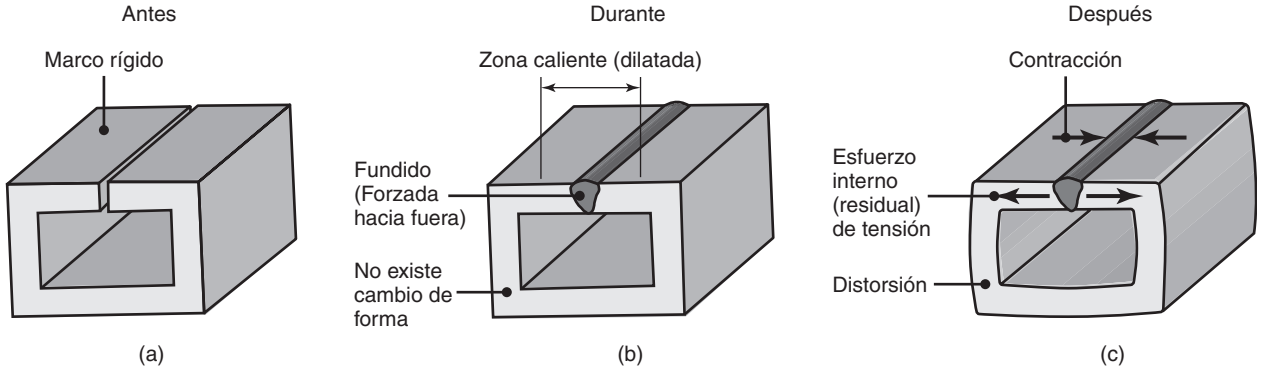


FIGURA 30.25 Distorsión de una estructura soldada: *Fuente:* J. A. Schey.

metal base. Por ello, es posible que los esfuerzos residuales desarrollados sean muy dañinos y no es inusual que posteriormente se les dé tratamiento a las soldaduras en aplicaciones con esfuerzos elevados o susceptibles a la fatiga, como se analizará después.

En estructuras soldadas complejas, las distribuciones de esfuerzos residuales son tridimensionales y, en consecuencia, es difícil examinarlas. El análisis anterior comprendía dos placas cuyo movimiento no estaba restringido. En otras palabras, las placas no eran parte integral de una estructura mayor. Por otro lado, si se restringen, se generan esfuerzos de reacción debido a que las placas no spn libres de dilatarse o contraerse. Esta situación surge sobre todo en estructuras de rigidez elevada.

Relevado de esfuerzos en las soldaduras. Los problemas provocados por esfuerzos residuales (como distorsión, pandeo y agrietamiento) se pueden reducir mediante el **precalentamiento** del metal base o de las partes a soldar. El precalentamiento disminuye la distorsión al reducir la rapidez de enfriamiento y el nivel de esfuerzos térmicos (al disminuir el módulo elástico). Esta técnica también reduce la contracción y el posible agrietamiento de la unión.

Para obtener resultados óptimos, deben controlarse con cuidado las temperaturas de precalentamiento y las velocidades de enfriamiento, a fin de mantener una resistencia y tenacidad aceptables en la estructura soldada. Las piezas de trabajo se pueden calentar de diversas maneras, incluyendo *(a)* en un horno; *(b)* eléctricamente (por resistencia o por inducción), o *(c)* mediante lámparas radiantes o chorro de aire caliente para las piezas delgadas. La temperatura y el tiempo requeridos para *relevar esfuerzos* dependen del tipo de material y de la magnitud de los esfuerzos residuales desarrollados.

Otros métodos para relevar esfuerzos incluyen el granallado, martillado o laminado del área del cordón de soldadura. Estas técnicas inducen esfuerzos residuales de compresión que, a su vez, reducen o eliminan los esfuerzos residuales de tensión en la soldadura. En el caso de las soldaduras multicapas, no deben granallarse la primera ni la última capa para protegerlas contra posibles daños por el propio granallado.

Los esfuerzos residuales también se pueden relevar o reducir deformando plásticamente un poco la estructura. Por ejemplo, es posible utilizar esta técnica en los recipientes a presión que se fabrican por soldadura, presurizándolos internamente (sometiéndolos a un *esfuerzo de prueba*). Para reducir la posibilidad de fractura súbita bajo alta presión interna, la soldadura debe efectuarse de manera apropiada y no tener muescas o discontinuidades, que podrían actuar como puntos de concentración de esfuerzos.

Además de precalentarlas para relevar esfuerzos, las soldaduras pueden ser *tratadas térmicamente* mediante diversas técnicas para modificar otras propiedades. Estas técnicas incluyen el recocido, normalizado, enfriamiento rápido y revenido de los aceros y el tratamiento con soluciones y envejecimiento de diversas aleaciones, como se indica en el capítulo 4.

30.9.2 Soldabilidad

Por lo común, la *soldabilidad* de un metal se define como su capacidad para ser soldado en una estructura específica que tiene ciertas propiedades y características, cumpliendo en forma satisfactoria con los requerimientos del servicio. La soldabilidad comprende un gran número de variables, de ahí que sea difícil su generalización. Como ya se indicó, son importantes las peculiaridades del material (entre ellas los elementos de aleación, las impurezas, las inclusiones, la estructura de los granos y la historia del procesamiento), tanto del metal base como del metal de aporte. Por ejemplo, la soldabilidad de los aceros disminuye al aumentar el contenido de carbono, debido a la formación de martensita (que es dura y frágil); esto reduce, por lo tanto, la resistencia de la soldadura. Las hojas de acero recubiertas presentan diversos retos para la soldadura, dependiendo del tipo y espesor del recubrimiento.

Debido a los efectos de la fusión y solidificación y de los cambios microestructurales resultantes, es fundamental conocer en forma profunda el diagrama de fases y la respuesta del metal o la aleación a las temperaturas elevadas sostenidas. También afectan a la soldabilidad las propiedades mecánicas y físicas: resistencia, tenacidad, ductilidad, sensibilidad a las muescas, módulo elástico, calor específico, punto de fusión, dilatación térmica, características de tensión superficial del metal fundido y resistencia a la corrosión.

La preparación de las superficies a soldar es importante, como lo son la naturaleza y propiedades de las películas superficiales de óxido y de los gases adsorbidos. El proceso particular de soldadura empleado afecta de manera significativa las temperaturas desarrolladas y su distribución en la zona de soldadura. Otros factores que afectan la soldabilidad son los gases de protección, los fundentes, el contenido de humedad de los recubrimientos de los electrodos, la velocidad de soldado, la posición durante el soldado, la velocidad de enfriamiento y el nivel de precalentamiento, así como las técnicas posteriores al soldado, como el relevado de esfuerzos y el tratamiento térmico.

Soldabilidad de los metales ferrosos:

- *Aceros al carbono:* la soldabilidad es excelente para los aceros de bajo carbono, regular a buena para los aceros de medio carbono y deficiente para los aceros de alto carbono.
- *Aceros de baja aleación:* la soldabilidad es similar a la de los aceros al medio carbono.
- *Aceros de alta aleación:* en general, la soldabilidad es buena en condiciones bien controladas.
- *Aceros inoxidables:* en general, estos aceros pueden soldarse mediante diversos procesos.
- *Hierros fundidos:* en general son soldables, aunque su soldabilidad varía mucho.

Soldabilidad de los materiales no ferrosos:

- *Aleaciones de aluminio:* éstas son soldables con una alta rapidez en el suministro de calor. Es importante protegerlas con un escudo de gas inerte y evitar la humedad. Por lo general, las aleaciones de aluminio que contienen zinc o cobre se consideran no soldables.
- *Aleaciones de cobre:* dependiendo de la composición, en general son soldables con una alta rapidez en el suministro de calor. Es importante protegerlas con un escudo de gas inerte y evitar la humedad.
- *Aleaciones de magnesio:* son soldables si se usan un gas protector y fundentes.
- *Aleaciones de níquel:* la soldabilidad es similar a la del acero inoxidable. Es importante la carencia de azufre.
- *Aleaciones de titanio:* son soldables si se usan los gases protectores apropiados.
- *Tantalio:* la soldabilidad es similar a la del titanio.
- *Tungsteno:* soldable en condiciones bien controladas.
- *Molibdeno:* la soldabilidad es similar a la del tungsteno.
- *Niobio (columbio):* la soldabilidad es buena.

30.9.3 Prueba de las soldaduras

Como en todos los procesos de manufactura, la calidad de una unión soldada se establece por medio de pruebas. Se han verificado varias pruebas estandarizadas y procedimientos de prueba. Éstos han sido emitidos por muchas organizaciones, como la American Society for Testing and Materials (ASTM), la American Welding Society (AWS), la Ame-

rican Society of Mechanical Engineers (ASME), la American Society of Civil Engineers (ASCE) y diversas agencias federales (en Estados Unidos).

Las uniones soldadas se pueden someter a prueba mediante *pruebas destructivas* o *no destructivas* (ver también las secciones 36.10 y 36.11). Cada técnica tiene ciertas capacidades y limitaciones, así como sensibilidad, confiabilidad y requerimientos de equipos especiales y habilidades del operario.

Técnicas de pruebas destructivas:

- **Ensayo de tensión:** los ensayos de tensión longitudinal y transversal se realizan en especímenes extraídos de uniones soldadas reales y del área del metal soldado. Después se obtienen las curvas esfuerzo-deformación mediante los procedimientos descritos en la sección 2.2. Estas curvas indican la resistencia a la fluencia (Y), la resistencia máxima a la tensión (UTS) y la ductilidad de la unión soldada (elongación y reducción del área) en diferentes ubicaciones y direcciones.
- **Ensayo de tensión y cortante:** los especímenes en el ensayo tensión y cortante (fig. 30.26a) se preparan para simular las condiciones a las que se someten las uniones soldadas reales. Estos especímenes se someten a tensión, por lo que se puede determinar la resistencia cortante del metal de la soldadura y la ubicación de la fractura.
- **Prueba de doblado:** se han desarrollado varias pruebas de doblado para determinar la ductilidad y resistencia de las uniones soldadas. En una prueba común, el espécimen soldado se dobla alrededor de un soporte (prueba de doblado en contorno; fig. 30.26b). En otro ensayo, los especímenes se prueban en el *doblado en tres puntos* (fig. 30.26c; ver también fig. 2.11a). Estas pruebas ayudan a determinar la ductilidad relativa y la resistencia de las uniones soldadas.
- **Ensayo de tenacidad a la fractura:** comúnmente, los ensayos de tenacidad a la fractura utilizan las técnicas de ensayo de impacto descritas en la sección 2.9. Los especímenes Charpa de *muesca en V* primero se preparan y después se ensaya su tenacidad. Otro ensayo de tenacidad es la *prueba de caída de peso*, en la que un peso que cae provee la energía.

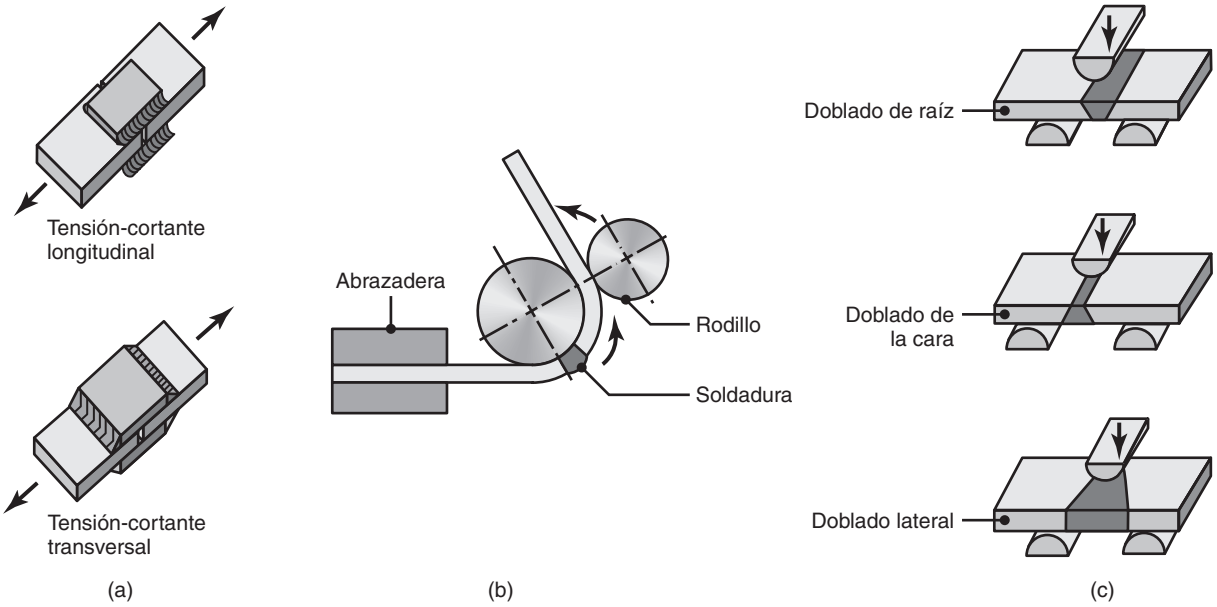


FIGURA 30.26 *(a)* Especímenes para pruebas de tensión-cortante longitudinal y para prueba de tensión-cortante de transferencia. *(b)* Método de prueba de doblado alrededor. *(c)* Doblado transversal de tres puntos de especímenes soldados.

- **Pruebas de corrosión y termofluencia.** Además de los ensayos mecánicos, las uniones soldadas se pueden someter a pruebas de resistencia a la corrosión y termofluencia. Debido a la diferencia de composiciones y microestructuras de los materiales en la zona de soldadura, puede ocurrir *corrosión preferencial* en la zona. Las pruebas de termofluencia son importantes para determinar el comportamiento de las uniones y estructuras soldadas cuando se someten a temperaturas elevadas.

Técnicas de pruebas no destructivas. Con frecuencia las estructuras soldadas tienen que someterse a pruebas no destructivas, en particular para aplicaciones críticas donde la falla de la soldadura puede ser catastrófica, como en los recipientes a presión, los miembros estructurales que soportan cargas y las plantas de generación de energía. En general, las técnicas de pruebas no destructivas para uniones soldadas consisten en los siguientes métodos (estas pruebas se describen en la sección 36.10).

- **Visuales.**
- **Radiográficas (rayos X).**
- **De partículas magnéticas.**
- **De líquidos penetrantes.**
- **Ultrasónicas.**

La prueba de distribución de durezas en la zona de soldadura también puede ser un indicador útil de la resistencia de la soldadura y los cambios microestructurales.

30.10 Diseño de la unión y selección del proceso

Al describir los procesos individuales de soldadura, hemos dado varios ejemplos de los tipos de soldaduras y uniones producidas y sus aplicaciones en numerosos productos de consumo e industriales. En la figura 30.27 se muestran los tipos comunes de uniones producidas por soldadura y su terminología. En la figura 30.28 se presentan los símbolos estandarizados que suelen utilizarse en los planos de ingeniería para describir el tipo de soldadura, el diseño de la ranura, el tamaño y la longitud de la soldadura, el proceso de soldado, la secuencia de operaciones y otra información necesaria.

A continuación se resumen los lineamientos generales de diseño para soldadura, con algunos ejemplos dados en la figura 30.29. En los capítulos 31 y 32 se darán otros tipos de diseño de uniones.

- El diseño del producto debe minimizar el número de soldaduras, debido a que la soldadura puede ser costosa (a menos que sea automatizada).
- Debe seleccionarse la ubicación de la soldadura para evitar los esfuerzos excesivos o su concentración en la estructura soldada y por apariencia.
- Debe seleccionarse la ubicación de la soldadura para que no interfiera en cualquier proceso posterior de las partes unidas o en el uso al que estén destinadas.
- Los componentes deben coincidir apropiadamente antes de soldarlos. El método utilizado para preparar los bordes (como aserrado, maquinado o cizallado) puede afectar la calidad de la soldadura.
- Debe evitarse o minimizarse la necesidad de preparación de los bordes.
- Debe mantenerse al mínimo el tamaño del cordón de soldadura para ahorrar metal de soldadura y mejorar la apariencia.

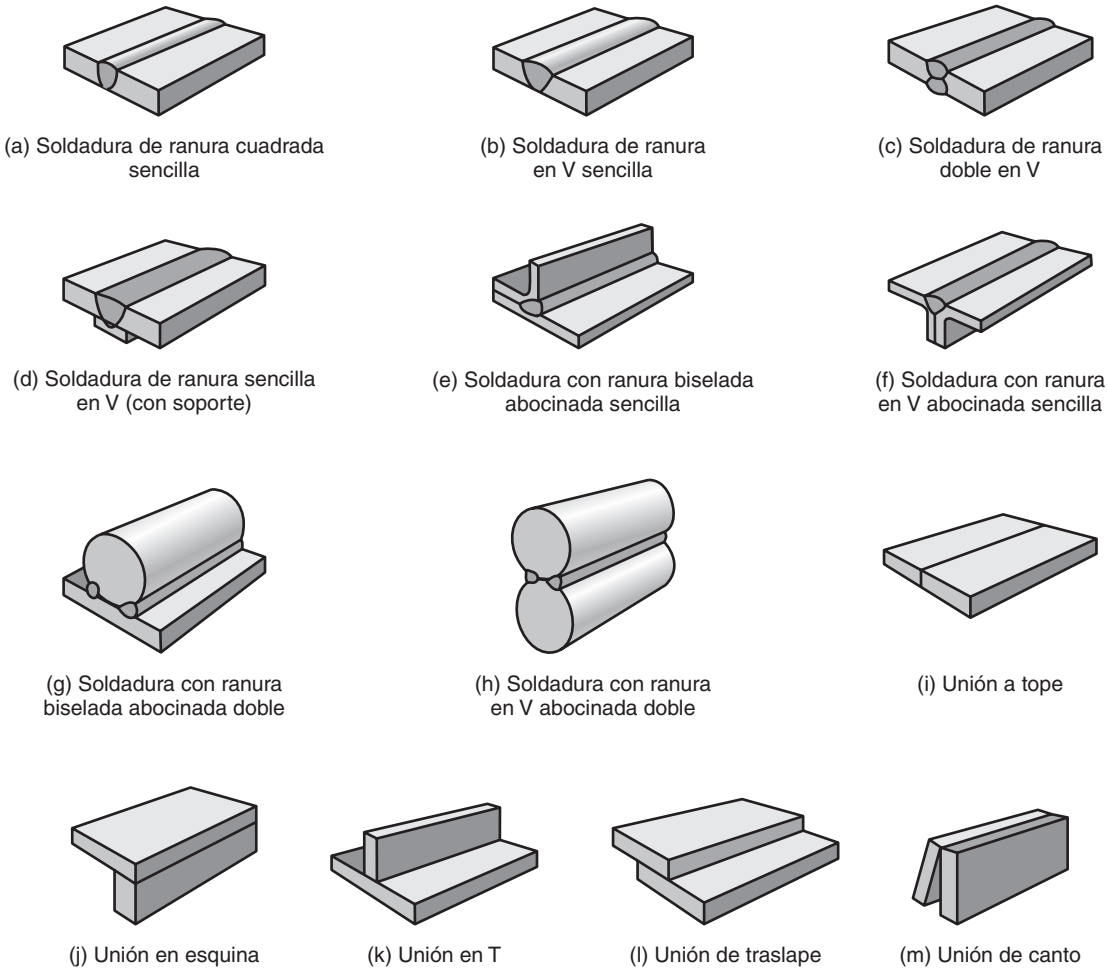


FIGURA 30.27 Ejemplos de uniones soldadas y su terminología.

Selección del proceso. Además de las características, capacidades y consideraciones de materiales del proceso descritas hasta ahora, la selección de una unión soldada y el proceso de soldadura apropiado comprenden las siguientes consideraciones (ver también los capítulos 31 y 32).

- La configuración de las partes o la estructura a unir, el diseño de la unión, el espesor y tamaño de los componentes y el número de uniones requeridas.
- Los métodos utilizados para manufacturar los componentes a unir.
- El tipo de materiales involucrados, que pueden ser metálicos o no metálicos.
- La ubicación, el acceso y la facilidad de unión.
- Los requerimientos de la aplicación y del servicio, como el tipo de carga, los esfuerzos generados y el medio ambiente.
- Los efectos de la distorsión, el alabeo, la decoloración de la apariencia y el servicio.
- Los costos comprendidos en la preparación de los bordes, unión y procesamiento posterior (incluyendo maquinado, rectificado y operaciones de acabado).
- El costo del equipo, materiales, mano de obra y habilidades requeridas y la operación de unión.

Símbolos básicos de soldadura por arco y gas							
Cordón	Filete	Tapón o ranura	Ranura				
			Cuadrada	V	Biselada	U	J
							

Símbolos básicos de soldadura por resistencia			
Punto	Proyección	Costura	Rebaba o recalcado
			

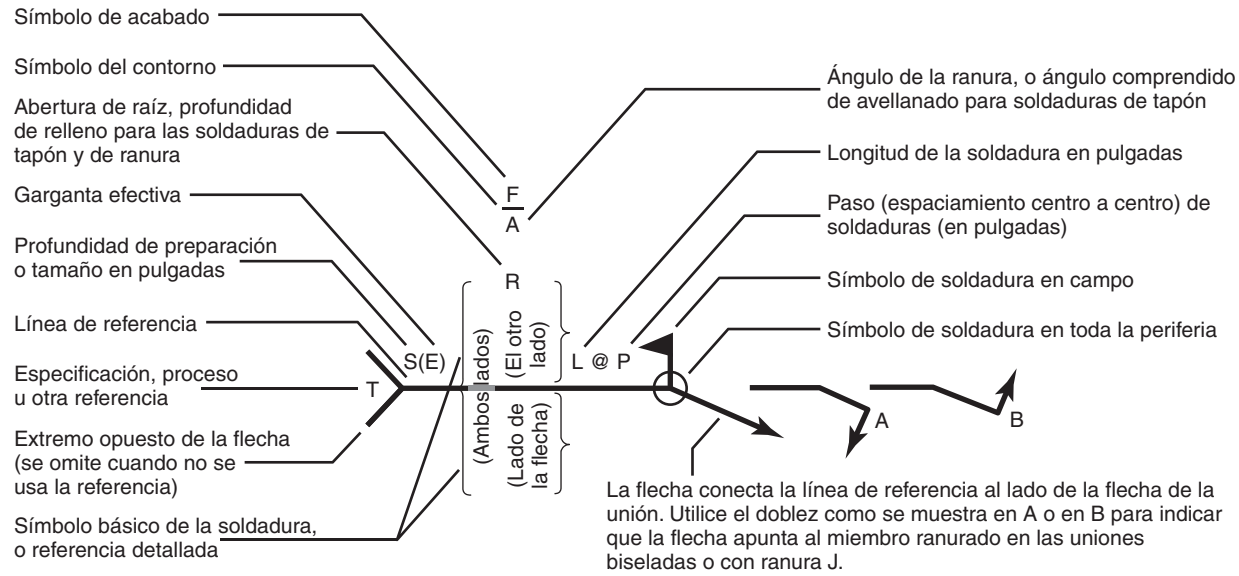


FIGURA 30.28 Identificación normal y símbolos para soldaduras.

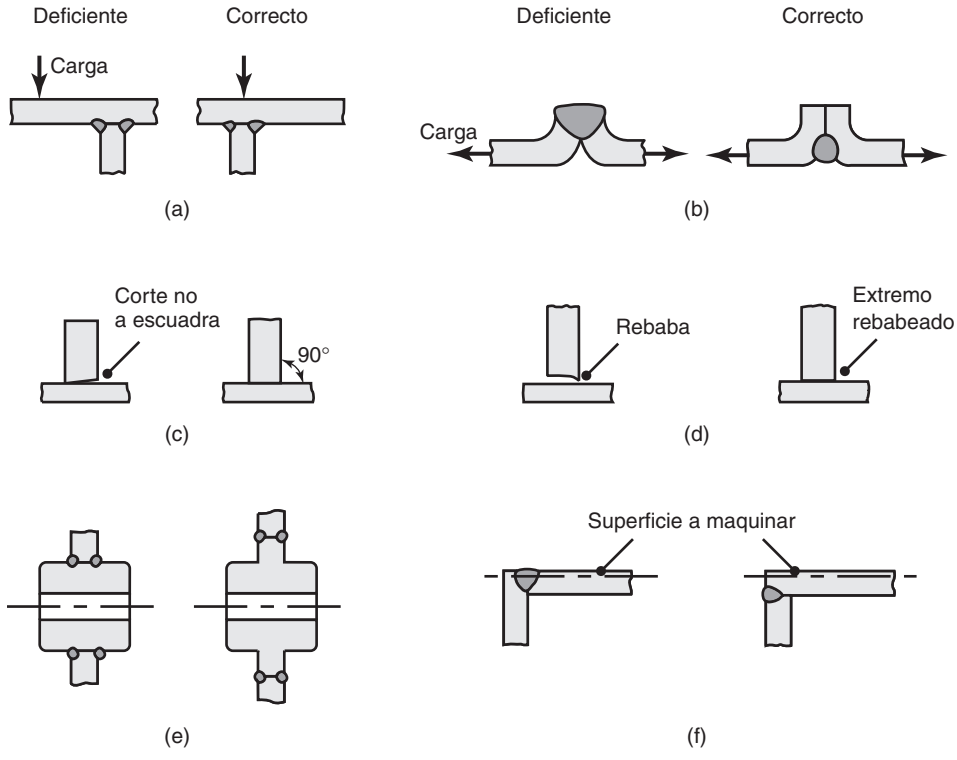


FIGURA 30.29 Algunos lineamientos de diseño para soldaduras. *Fuente:* J. G. Bralla.

En la tabla VI.1 se presentaron las diversas características de los procesos individuales de soldadura, que sirven como guía adicional para la selección del proceso. En cuanto a esta tabla, obsérvese que no existe un solo proceso que tenga una calificación elevada en todas las categorías. Por ejemplo:

- La soldadura por arco, los pernos y el remachado tienen una alta resistencia y confiabilidad, pero no son adecuados para unir partes pequeñas.
- La soldadura por resistencia eléctrica tiene resistencia mecánica y aplicaciones en partes pequeñas y grandes. No es fácil inspeccionarla para identificar su confiabilidad, en tanto que sus tolerancias y su confiabilidad son menores que en otros procesos.
- Los sujetadores son útiles para partes grandes y es fácil inspeccionarlos de modo visual. Sin embargo, son costosos y no tienen mucha variedad de diseños.
- La unión adhesiva tiene una gran variedad de diseños. Sin embargo, su resistencia es relativamente baja y resulta difícil de inspeccionar visualmente para verificar su integridad.

EJEMPLO 30.2 Selección del diseño de la soldadura

En la figura 30.30 se muestran tres tipos diferentes de diseño de soldadura. En la figura 30.30a, las dos uniones verticales se pueden soldar interna o externamente. Obsérvese que la soldadura externa en toda la longitud requiere tiempo considerable y mayor material de soldadura que el diseño alternativo, el cual consiste en soldaduras internas intermitentes. Además, mediante el método alternativo se mejora la apariencia de la estructura y se reduce la distorsión.

En la figura 30.30b se puede demostrar que el diseño de la derecha puede soportar tres veces el momento M que el de la izquierda. Nótese que ambos diseños requieren la misma cantidad de metal de soldadura y el mismo tiempo de soldado. En la figura 30.30c, la soldadura de la izquierda exige casi el doble de material de soldadura que el diseño de la derecha. Obsérvese también que, debido a que es necesario maquinar más material, el diseño de la izquierda requiere mayor tiempo para la preparación del borde y el resultado es que se desperdiciará más material base.

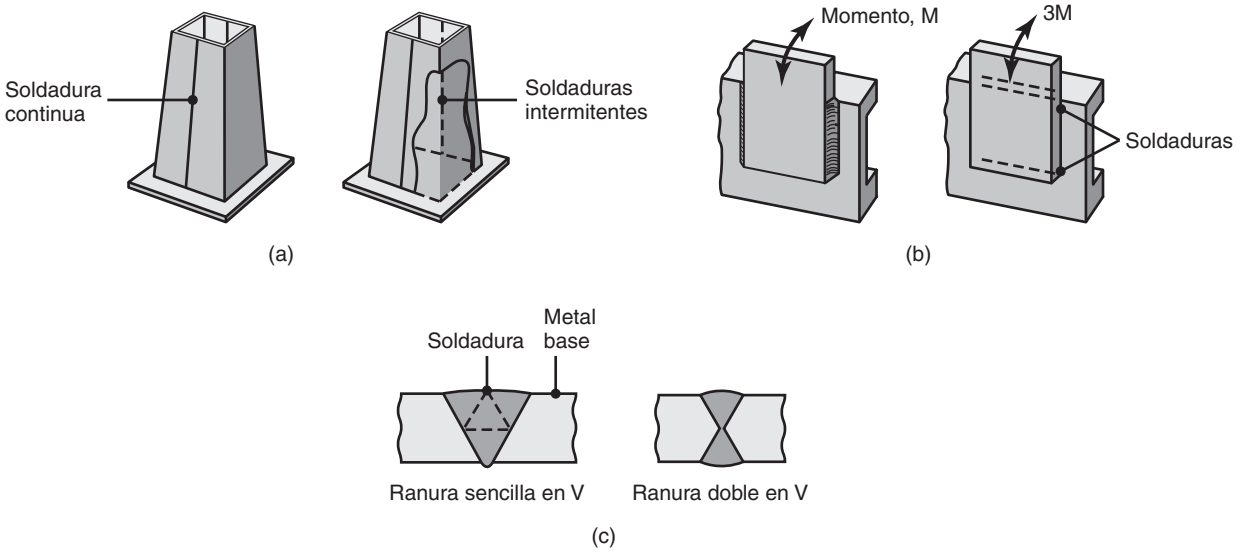


FIGURA 30.30 Ejemplos de diseños de soldaduras utilizados en el ejemplo 30.2.

RESUMEN

- La soldadura con oxígeno y combustible gaseosos, por arco y por haz de alta energía se encuentran entre las operaciones de unión más utilizadas. La soldadura por gas usa la energía química, mientras que la soldadura por arco y por haz de alta energía emplean la energía eléctrica para suministrar el calor necesario.
- En todos estos procesos, el calor se utiliza para soldar la unión en un estado líquido. Los gases protectores se usan para proteger el charco de soldadura fundida y el área de soldadura contra la oxidación. En la soldadura con oxígeno y combustible gaseosos y la soldadura por arco puede emplearse material de aporte o no.
- La selección del proceso de soldadura para una operación en particular depende del material de la pieza de trabajo, de su espesor y tamaño, de la complejidad de su forma, del tipo de unión, de la resistencia requerida y del cambio en la apariencia del producto provocado por la soldadura.
- Existen varios equipos para soldadura, muchos de los cuales se controlan mediante robots y computadoras con características programables.
- El corte de los metales también se puede realizar mediante procesos cuyos principios se basan en la soldadura con oxígeno y combustible gaseosos y por arco. El corte de los aceros ocurre principalmente por medio de oxidación (quemado). Las mayores temperaturas para corte se obtienen mediante el corte por arco de plasma.
- La metalurgia de la unión soldada es un aspecto importante de todos los procesos de soldadura, debido a que determina la resistencia y tenacidad de la unión. La unión soldada consta de un metal solidificado y una zona afectada por el calor; cada uno tiene una amplia variación de microestructura y propiedades, dependiendo de los metales unidos y de los metales de aporte.
- Se pueden desarrollar discontinuidades en la zona de soldadura (como porosidad, inclusiones, soldaduras incompletas, hojeamientos, daño superficial y grietas). Los esfuerzos residuales y su relevado también son factores que deben considerarse en la soldadura.
- La soldabilidad de los metales y aleaciones depende en gran medida de su composición, el tipo de operación de soldadura, los parámetros del proceso empleados y el control de los parámetros de soldadura.
- Existen lineamientos generales que pueden ayudar en la selección inicial de métodos de soldadura adecuados y económicos para una aplicación en particular.

TÉRMINOS CLAVE

Corte con oxígeno y combustible gaseosos
Corte por arco
Discontinuidades
Electrodo
Electrodo consumible
Electrodo no consumible
Electrodo recubierto
Escoria
Esfuerzos residuales
Flama carburante
Flama neutra
Flama oxidante
Flama reductora
Fundente
Hojeamientos
Inclusiones de escoria
Líneas de arrastre
Metal base
Metal de aporte
Metal de soldadura
Perfil de la soldadura
Pistola de soldar
Polaridad
Porosidad
Ranura de corte
Soldabilidad
Soldadura con arco y metal protegido
Soldadura con hidrógeno atómico

Soldadura con oxígeno y combustible gaseosos
Soldadura con varilla
Soldadura de arco con núcleo de fundente
Soldadura eléctrica por gas
Soldadura por arco
Soldadura por arco de plasma
Soldadura por arco de tungsteno y gas
Soldadura por arco metálico y gas
Soldadura por arco sumergido
Soldadura por electroescoria
Soldadura por fusión
Soldadura por haz de electrones
Soldadura por rayo láser
Técnica del ojo de cerradura
Unión
Zona afectada por el calor

BIBLIOGRAFÍA

ASM Handbook, vol. 6: *Welding, Brazing, and Soldering*, ASM International, 1993.

Bowditch, W. A. y Bowditch, K. E., *Welding Technology Fundamentals*, Goodheart-Willcox, 1997.

Cary, H. B., *Modern Welding Technology*, 4a. ed., Prentice Hall, 1997.

Croft, D., *Heat Treatment of Welded Structures*, Woodhead Publishing, 1996.

Davies, A. C., *The Science and Practice of Welding*, 10a. ed., 2 vols., Cambridge University Press, 1993.

Evans, G. M. y Bailey, N., *Metallurgy of Basic Weld Metal*, Woodhead Publishing, 1997.

Galyen, J., Sear, G. y Tuttle, C., *Welding: Fundamentals and Procedures*, Wiley, 1984.

Granjon, H., *Fundamentals of Welding Metallurgy*, Woodhead Publishing, 1991.

Hicks, J. G., *Welded Joint Design*, 2a. ed., Abington, 1997.

Houldcroft, P. T., *Welding and Cutting: A Guide to Fusion Welding and Associated Cutting Processes*, Industrial Press, 1988.

Introduction to the Nondestructive Testing of Welded Joints, 2a. ed., American Society of Mechanical Engineers, 1996.

Jeffus, L. F., *Welding: Principles and Applications*, 4a. ed., Delmar Publishers, 1997.

Jellison, R., *Welding Fundamentals*, Prentice Hall, 1995.

Krou, S., *Welding Metallurgy*, Wiley, 1987.

Lancaster, J. F., *The Metallurgy of Welding*, Chapman & Hall, 1993.

Linnert, J. E., *Welding Metallurgy*, 4a. ed., Vol. 1, American Welding Society, 1994.

Messler, R. W., Jr., *Joining of Advanced Materials*, Butterworth-Heinemann, 1993.

_____, *Flux Cored Arc Welding Handbook*, 1998.

Minnick, W. H., *Gas Metal Arc Welding Handbook*, Goodheart-Wilcox, 2000.

Mouser, J. D., *Welding Codes, Standards, and Specifications*, McGraw-Hill, 1997.

North, T. H., *Advanced Joining Technologies*, Chapman & Hall, 1990.

Powell, J., *CO_2 Laser Cutting*, Springer, 1992.

Schultz, H., *Electron Beam Welding*, Woodhead Publishing, 1994.

Steen, W. M., *Laser Material Processing*, 2a. ed., Springer, 1998.

Stout, R. D., *Weldability of Steels*, Welding Research Council, 1987.

Tools and Manufacturing Engineers Handbook, Vol. 4: *Quality Control and Assembly*, Society of Manufacturing Engineers, 1986.

Welding Handbook, 8a. ed., 3 vols., American Welding Society, 1987.

Welding Inspection, American Welding Society, 1980.

Weld Integrity and Performance, ASM International, 1997.

PREGUNTAS DE REPASO

30.1 Describa la fusión, por lo que se refiere a las operaciones de soldadura.

30.2 Explique las características de las flamas neutrales, reductoras y oxidantes. ¿Por qué se le llama así a una flama reductora?

30.3 Explique los principios básicos de los procesos de soldadura por arco.

30.4 ¿Por qué la soldadura por arco metálico protegido es un proceso utilizado comúnmente? ¿Por qué se le llama soldadura con varilla?

30.5 Describa las funciones y características de los electrodos. ¿Qué funciones tienen los recubrimientos? ¿Cómo se clasifican los electrodos?

30.6 ¿Cuáles son las similitudes y diferencias entre los electrodos consumibles y los no consumibles?

30.7 Explique cómo se realiza el corte cuando se utiliza un soplete con oxígeno y combustible gaseosos. ¿Cómo se efectúa el corte bajo el agua?

30.8 ¿Cuál es el propósito del fundente? ¿Por qué no se necesita en la soldadura por arco de tungsteno y gas?

30.9 ¿Qué implica la calidad de la soldadura? Discuta los factores que la afectan.

30.10 Explique por qué tienen que precalentarse algunas uniones antes de soldarlas.

30.11 ¿Cómo se define la soldabilidad?

30.12 Describa los tipos comunes de discontinuidades en las uniones soldadas.

30.13 ¿Qué significa diseño de punto?

30.14 ¿Qué tipos de pruebas destructivas se realizan en las uniones soldadas?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

30.15 Explique las razones por las que se han desarrollado tantos procesos diferentes de soldadura.

30.16 ¿Cuál es el efecto de la conductividad térmica de la pieza de trabajo en la anchura de la ranura en el corte mediante oxígeno y combustible gaseosos?

30.17 Describa las diferencias entre el corte con oxígeno y combustible gaseosos de las aleaciones ferrosas y no ferrosas. ¿Qué propiedades son importantes?

30.18 ¿Podría utilizar el corte con oxígeno y combustible gaseosos para una pila de láminas metálicas? (*Nota:* Para el corte de pilas, véase la fig 24.25e.) Explique su respuesta.

30.19 ¿Cuáles son las ventajas de la soldadura por haz de electrones y por rayo láser si se comparan con la soldadura por arco?

30.20 Discuta acerca de la necesidad de, y el papel de los soportes para la sujeción de las piezas de trabajo en las operaciones de soldadura descritas en este capítulo.

30.21 Describa los tipos comunes de discontinuidades en las soldaduras y explique los métodos por los cuales se pueden evitar.

30.22 Explique la importancia de la rigidez de los componentes que se sueldan tanto en la calidad de la soldadura como en la forma de la pieza.

30.23 ¿Cómo haría para detectar grietas bajo el cordón en una soldadura?

30.24 ¿Podría utilizarse el corte por arco de plasma para materiales no metálicos? De ser así, ¿seleccionaría un tipo de arco transferido o no transferido? Explique su respuesta.

30.25 ¿Qué factores influyen en el tamaño de los dos cordones de soldadura que se muestran en la figura 30.14?

30.26 ¿Qué procesos descritos en este capítulo no son portátiles? ¿Pueden hacerse portátiles? Explique su respuesta.

30.27 Describa sus observaciones en relación con el contenido de la tabla 30.1.

30.28 ¿Qué determina si cierto proceso de soldadura se puede utilizar para piezas de trabajo en posición horizontal, vertical o invertida (o en cualquier posición)? Explique su respuesta y dé ejemplos de aplicaciones apropiadas.

30.29 Explique los factores comprendidos en la selección de electrodos en los procesos de soldadura por arco.

30.30 En la tabla 30.1 existe una columna sobre la distorsión de los componentes soldados que está ordenada de la menor a la mayor distorsión. Explique por qué varía el grado de distorsión entre los diferentes procesos de soldadura.

30.31 Explique la importancia de los esfuerzos residuales en las estructuras soldadas.

30.32 Comente sus observaciones en relación con la forma de los cordones de soldadura mostrados en la figura 30.5. ¿Cuáles recomendaría para hojas metálicas delgadas?

30.33 ¿Por qué está limitada la soldadura por arco de oxígeno y de combustible gaseosos más bien a secciones delgadas?

30.34 Clasifique los procesos descritos en este capítulo en términos de *(a)* costo, y *(b)* calidad de la soldadura.

30.35 ¿Cuáles son las fuentes de las salpicaduras de soldadura? ¿Cómo se pueden controlar las salpicaduras?

30.36 ¿El metal de aporte debe estar fabricado con la misma composición que el metal base a soldar? Explique su respuesta.

30.37 Describa sus observaciones en relación con la figura 30.18.

30.38 En la figura 30.24b, supóngase que la mayoría de la parte superior de la pieza de arriba se corta horizontalmente con una sierra afilada. Ahora se han perturbado los esfuerzos residuales y la parte sufrirá un cambio de forma, como se describió en la sección 2.11. En este caso, ¿cómo cree que se distorsionará la parte: se curvará hacia abajo o hacia arriba? Explique su respuesta (ver también la fig. 2.29d).

30.39 Describa las razones por las que las fallas por fatiga suelen ocurrir en las zonas afectadas por el calor de las soldaduras en lugar del propio cordón de soldadura.

30.40 Si se precalientan los materiales a soldar, ¿aumenta o disminuye la posibilidad de porosidad? Explique su respuesta.

30.41 Liste los procesos de soldadura que son adecuados para producir *(a)* uniones a tope (donde la soldadura tiene la forma de una línea o segmento de línea); *(b)* soldaduras por puntos, y *(c)* ambas uniones a tope y por puntos.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

30.42 Se efectúa una operación de soldadura en una placa de una aleación de aluminio. Un tubo de 50 mm de diámetro con un espesor de pared de 4 mm y 60 mm de largo se suelda a tope en una sección de ángulo de 15 × 15 × 5 mm. El ángulo tiene forma de L y una longitud de 0.3 m. Si la zona de soldadura en un proceso de soldadura por arco de tungsteno y gas es de unos 8 mm de ancho, ¿cuál sería el aumento de temperatura de toda la estructura debido al suministro de calor sólo de la soldadura? ¿Y si el proceso fuera una operación de soldadura por haz de electrones con un cordón de 6 mm de anchura? Supóngase que el electrodo requiere 1500 J y la aleación de aluminio necesita 1200 J para fundir un gramo.

30.43 Se va a efectuar una operación de soldadura en acero al carbono. La velocidad deseada de soldadura es de alrededor de 0.7 pulgada/s. Si se utiliza una fuente de potencia para soldadura por arco con un voltaje de 10 V, ¿qué corriente se necesita si la anchura de la soldadura será de 0.2 pulgada?

30.44 En el corte por oxígeno y combustible gaseosos, por arco y por rayo láser, el proceso básicamente implica la fusión de la pieza de trabajo. Si se va a cortar un orificio de 80 mm de diámetro en una placa de 250 mm de diámetro y 12 mm de espesor, grafique la elevación media de temperatura en la pieza en función de la ranura de corte. Suponga que la mitad de la energía va a la pieza de trabajo.

30.45 Grafique la dureza en la figura 30.18d en función de la distancia desde la superficie superior y discuta sus observaciones.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

30.46 Comente las limitaciones del tamaño y la forma de la pieza de trabajo (en su caso) para cada uno de los procesos descritos en este capítulo.

30.47 Revise los tipos de uniones de soldadura mostrados en la figura 30.27 y dé una aplicación para cada uno de ellos.

30.48 Comente los lineamientos de diseño dados en este capítulo.

30.49 Haga una tabla resumen que describa los principios de los procesos descritos en este capítulo, junto con ejemplos de sus aplicaciones.

30.50 Elabore una tabla de los procesos descritos en este capítulo y dé el intervalo de velocidades de soldadura en función de los materiales y espesores de la pieza de trabajo.

30.51 Suponga que se le pide que inspeccione una estructura soldada para una aplicación crítica. Describa el procedimiento que seguiría.

30.52 Explique los factores que contribuyen a cualquier diferencia en las propiedades a través de una unión soldada.

30.53 Explique por qué el precalentamiento de los componentes a soldar es efectivo para reducir la posibilidad de desarrollo de grietas.

30.54 Revise los diseños de unión deficientes y correctos mostrados en la figura 30.29 y explique por qué se indicaron así.

30.55 Al construir grandes embarcaciones, existe la necesidad de soldar grandes secciones de acero una con otra para formar el casco. Para esta aplicación, considere cada una de las operaciones de soldado discutidas en este capítulo y liste los beneficios y desventajas de esa operación en particular para esta aplicación. ¿Qué proceso de soldadura seleccionaría? ¿Por qué?

30.56 Investigue en la bibliografía y describa las ventajas y limitaciones relativas de los láseres de CO_2 y de Nd:YAG.

30.57 Inspeccione las diversas partes y componentes de un automóvil y explique si se ha utilizado alguno de los procesos descritos en este capítulo para unirlas.

30.58 Similar al problema 30.57, aunque para utensilios y artículos de cocina. ¿Existe alguna diferencia importante entre estos dos tipos de líneas de productos? Explique su respuesta.

30.59 Describa los lineamientos generales de seguridad en las operaciones de soldadura. Para cada una de las operaciones descritas en este capítulo, elabore un cartel en el que se den instrucciones específicas de manera concisa para las prácticas de seguridad en la soldadura (o el corte). Revise las diversas publicaciones del National Safety Council (de Estados Unidos) y otras organizaciones similares.

30.60 ¿Existen factores comunes que afecten la soldabilidad, colabilidad, formabilidad y maquinabilidad de los metales? Explique con ejemplos apropiados.

30.61 Si se encuentra un defecto en una unión soldada durante la inspección, ¿qué haría para determinar si el defecto es importante?

30.62 Las plumas de celosía para grúas se construyen con secciones transversales extruidas que se sueldan una con otra. Cualquier alabeo que ocasione que la pluma se desvíe de la rectitud reduce severamente su capacidad de carga. Investigue en la bibliografía los métodos utilizados

para minimizar la distorsión debida a la soldadura y para corregirla, y en particular en la construcción de plumas de celosía.

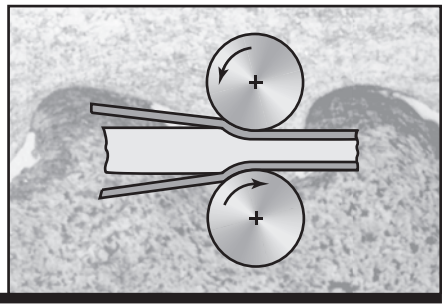
30.63 Una práctica común al reparar partes costosas rotas o desgastadas (como podría ocurrir cuando se rompe un fragmento de una forja) es rellenar el área con capas de cordones de soldadura y después maquinar la parte otra vez a sus dimensiones originales. Liste las precauciones que sugeriría a alguien que utiliza este método.

30.64 Una estructura soldada primero necesita desensamblarse y después repararse (soldando nuevamente los miembros). ¿Qué procedimientos recomendaría para desensamblar la estructura como preparación para soldarla de nuevo?

30.65 Suponga que se le pide un cuestionario para los estudiantes sobre el contenido de este capítulo. Prepare tres preguntas cualitativas y proporcione las respuestas.

CAPÍTULO

31 Procesos de soldadura de estado sólido



31.1 Introducción 980
31.2 Soldadura en frío y unión por laminación 981
31.3 Soldadura ultrasónica 982
31.4 Soldadura por fricción 983
31.5 Soldadura por resistencia 986
31.6 Soldadura por explosión 995
31.7 Unión por difusión 996
31.8 Economía de las operaciones de soldadura 998

EJEMPLOS:

31.1 Unión por laminación de las monedas de 25 centavos de Estados Unidos 982
31.2 Calor generado en la soldadura por puntos 989
31.3 Soldadura por resistencia contra soldadura por rayo láser en la industria de fabricación de latas 995
31.4 Aplicaciones de la unión por difusión 997

Los procesos de soldadura de estado sólido comprenden una familia de importantes procesos de unión. En este capítulo se describen:

- Los principios de los procesos de unión donde no se aplica calor.
- Los procesos de soldadura que implican calor, pero en donde éste se genera internamente o es insuficiente para causar un cambio de fase en la pieza de trabajo, y donde no se utiliza material de aporte.
- Ventajas, limitaciones y aplicaciones de estos procesos.
- Aplicaciones únicas de la unión por difusión combinada con el formado superplástico.
- Consideraciones económicas en la selección de los procesos de soldadura.

31.1 Introducción

En este capítulo se describen los procesos de **soldadura de estado sólido,** en los que la unión se efectúa sin fusión en la interfaz de las dos partes a soldar. A diferencia de los procesos de soldadura por fusión descritos en el capítulo 30, no existe una fase líquida o fundida en la unión. El principio de la soldadura de estado sólido se demuestra mejor con el ejemplo siguiente. Si dos superficies limpias se ponen en contacto atómico una con otra bajo suficiente presión, forman enlaces entre ellas y producen una unión. Para formar una unión fuerte, es fundamental que la interfaz carezca por completo de películas de óxido, residuos, fluidos para el metalformado, otros contaminantes, e incluso capas de gas adsorbido.

La unión de estado sólido comprende uno o más de los siguientes fenómenos:

- **Difusión:** transferencia de átomos a través de una interfaz; por ello, la aplicación de calor externo mejora la resistencia de la unión entre las dos superficies que se están uniendo, como ocurre en la *unión por difusión*. El calor se puede generar en forma interna, por fricción (como se utiliza en la *soldadura por fricción*), mediante calentamiento por resistencia eléctrica (como en los procesos de *soldadura por resistencia*, como la *soldadura por puntos*), y de manera externa mediante calentamiento por inducción (como la *soldadura a tope* de tubos).
- **Presión:** cuanto mayor sea la presión, más fuerte será la interfaz (como en la *unión por laminación* y la *soldadura por explosión*), donde también ocurre deformación plática en la interfaz. Se pueden combinar la presión y el calentamiento por resistencia, como en la *soldadura a tope por presión*, la *soldadura de pernos por presión y alta corriente* y la *soldadura de proyección por resistencia*.

- **Movimientos relativos interfaciales:** cuando ocurren movimientos entre las superficies de contacto (*superficies de empalme*), como en la *soldadura ultrasónica*, incluso las amplitudes muy pequeñas pueden alterar las superficies coincidentes, rompiendo cualquier película de óxido y generando superficies nuevas y limpias, mejorando así la resistencia de la unión.

En la actualidad, la mayoría de los procesos de unión presentados en esta sección se han automatizado mediante el uso de la *robótica*, los *sistemas de visión*, *sensores*, y *controles adaptables* y *por computadora* para reducir el costo y aumentar la consistencia, la confiabilidad en la calidad de la soldadura y la productividad. Los costos involucrados en el proceso de unión se describen en la sección 31.8.

31.2 Soldadura en frío y unión por laminación

En la *soldadura en frío* (CW, por sus siglas en inglés), se aplica presión a las piezas de trabajo mediante dados o rodillos. Debido a que implica *deformación plástica*, es necesario que cuando menos una (pero de preferencia las dos) de las partes coincidentes sea dúctil. Antes de soldar, la interfaz se desengrasa, se cepilla con un cepillo de alambre y se limpia a fin de retirar restos de óxidos. La soldadura en frío puede utilizarse para unir piezas de trabajo pequeñas fabricadas con metales suaves y dúctiles. Las aplicaciones incluyen alambre como materia prima y conexiones eléctricas.

Durante la unión de dos metales *disímiles* que son mutuamente solubles, se pueden formar *compuestos intermetálicos* frágiles (sección 4.2.2), que producirán una unión débil y frágil. Un ejemplo se presenta en la unión del aluminio y el acero, donde se forma un compuesto intermetálico frágil en la interfaz. La mejor resistencia de una unión se obtiene con dos materiales similares.

Unión por laminación. La presión requerida para la soldadura se puede aplicar mediante un par de rodillos (fig. 31.1); a este proceso se le denomina *unión por laminación* o *soldadura por laminación* (ROW, por sus siglas en inglés). Desarrollada en la década de 1960, la unión por laminación se utiliza para manufacturar algunas monedas en Estados Unidos (ver el ejemplo 31.1). Este proceso se puede realizar a temperaturas elevadas (*unión por laminación en caliente*). La preparación de la superficie es importante para dar resistencia a la interfaz.

Ejemplos típicos son el *chapeado o revestimiento* de *(a)* aluminio puro sobre lámina de aleación de aluminio endurecido por precipitación (Alclad), y *(b)* acero inoxidable sobre acero dulce (para obtener resistencia a la corrosión). Una aplicación común de la unión por laminación es la producción de cintas bimetálicas para termostatos y controles similares utilizando dos capas de materiales con distintos coeficientes de dilatación térmica. Se puede obtener la unión sólo en regiones seleccionadas en la interfaz depositando un agente separador, como grafito o cerámica, denominado *bloqueador* (ver sección 31.7).

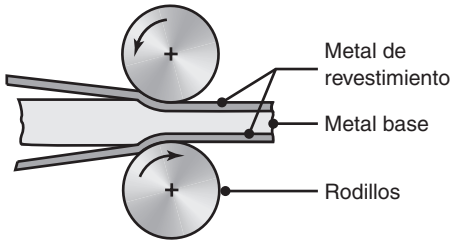


FIGURA 31.1 Esquema del proceso de unión por rodillos o el revestimiento o chapeado de metales.

EJEMPLO 31.1 Unión por laminación de las monedas de 25 centavos de Estados Unidos

La técnica utilizada para manufacturar monedas compuestas de 25 centavos de dólar estadounidense es la unión por laminación de dos capas externas de 75% de Cu-25% de Ni (cuproníquel), cada una de 1.2 mm (0.048 pulgada) de espesor, con una capa interna de cobre puro de 5.1 mm (0.20 pulgada) de espesor. Para obtener una buena resistencia en la unión, las superficies de empalme se limpian químicamente y se cepillan con alambre. Primero, las cintas se laminan a un espesor de 2.29 mm (0.090 pulgada); una segunda operación de laminación reduce el espesor a 1.36 mm (0.0535 pulgada). Entonces, el espesor de las cintas sufre una reducción total de 82%.

Debido a que el volumen se mantiene constante en la deformación plástica, existe un incremento importante en el área de la superficie entre las capas, lo que provoca la generación de superficies interfaciales limpias. Esta ampliación en el área de la superficie bajo la fuerte presión de los rodillos, combinada con la solubilidad sólida del níquel en el cobre (ver sección 4.2.1), produce una unión fuerte.

31.3 Soldadura ultrasónica

En la *soldadura ultrasónica* (USW, por sus siglas en inglés), las superficies de empalme de los dos componentes se someten a una fuerza normal estática y a esfuerzos cortantes (tangenciales) oscilantes. Los esfuerzos cortantes se aplican mediante la punta de un **transductor** (fig. 31.2a) similar al que se utiliza para el maquinado ultrasónico (ver fig. 26.24a). La frecuencia de oscilación se encuentra por lo general en el intervalo de 10 a 75 kHz, aunque puede usarse una frecuencia menor o mayor. Es importante el acoplamiento apropiado entre el transductor y la punta (denominado, por analogía con el *electrodo*, *sonotrodo*, de la palabra "*sónico*") para obtener una operación eficiente.

Los esfuerzos cortantes causan deformación plástica en la interfaz de los dos componentes, lo que rompe las películas de óxido y contaminantes, permite de esta manera un buen contacto y produce una fuerte unión de estado sólido. Es común que la tempe-

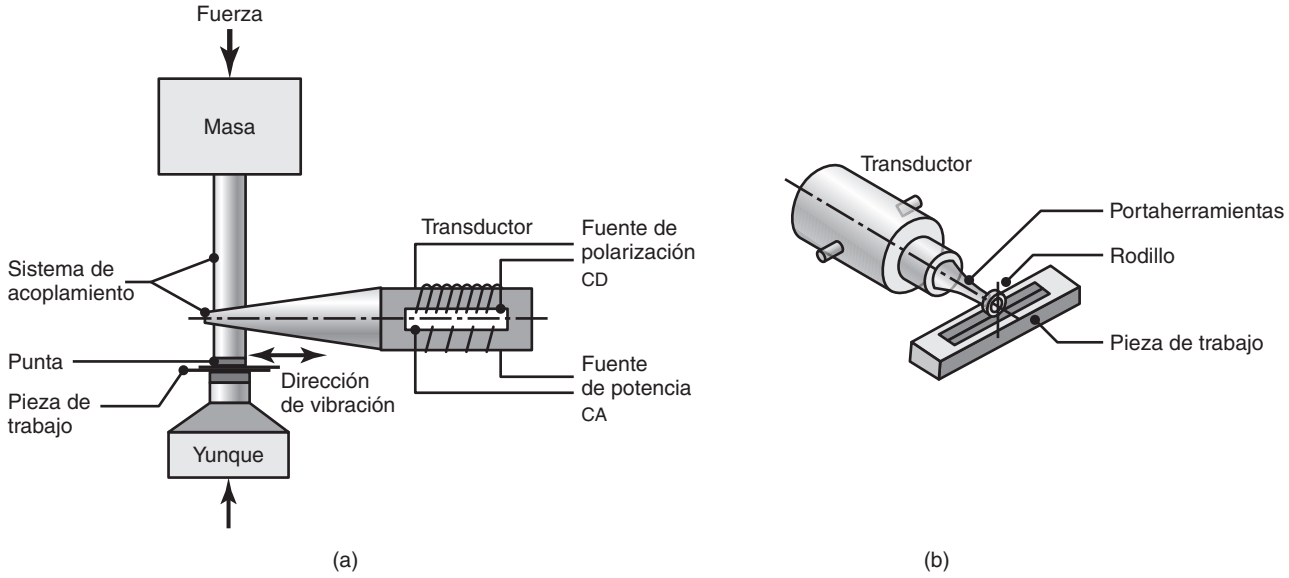


FIGURA 31.2 *(a)* Componentes de una máquina de soldadura ultrasónica para fabricar juntas traslapadas. La vibración lateral de la punta de la herramienta provoca deformación plástica y unión en la interfaz de las piezas de trabajo. *(b)* Soldadura por costura ultrasónica utilizando un rodillo como *el sonotrodo*.

ratura generada en la zona de soldadura se encuentre en el intervalo de un tercio a la mitad del punto de fusión (escala absoluta) de los metales unidos. En consecuencia, no se produce fusión.

Sin embargo, en ciertas situaciones la temperatura generada puede ser lo suficientemente elevada para provocar cambios metalúrgicos en la zona de soldadura. El mecanismo responsable de la unión de los *termoplásticos* mediante la soldadura ultrasónica es diferente del de los metales, y la fusión sí ocurre en la interfaz, debido a que los plásticos tienen temperaturas de fusión mucho menores (ver tabla 7.2).

El proceso de soldadura ultrasónica es versátil y confiable. Se puede utilizar con una amplia variedad de materiales metálicos y no metálicos, incluyendo metales disímiles (*cintas bimetálicas*). Se usa mucho para unir plásticos, para empaque con laminado multicapa, y (en la industria automotriz y electrónica de consumo) para la soldadura de traslape de hojas, láminas y alambres delgados. La punta de soldado se puede reemplazar por *discos rotatorios* (fig. 31.2b) a fin de soldar por costura estructuras en las que un componente es una hoja, lámina, o un material de polímero tejido (un proceso similar a la *soldadura de costura por resistencia*, sección 31.5.2). Se requiere una habilidad moderada para operar el equipo.

31.4 Soldadura por fricción

En los procesos de unión descritos hasta ahora, la energía requerida para la soldadura (comúnmente química, eléctrica o ultrasónica) proviene de fuentes externas. En la *soldadura por fricción* (FRW, por sus siglas en inglés), el calor necesario para la soldadura se genera (como lo indica su nombre) mediante fricción en la interfaz de los dos componentes a unir. Se puede demostrar el importante aumento de temperatura que provoca la fricción al frotarse las manos o al deslizarse por un cable con rapidez.

En la soldadura por fricción, desarrollada en la década de 1940, uno de los componentes de la pieza de trabajo permanece estacionario, mientras que el otro se coloca en un plato o una boquilla y se hace girar a alta velocidad constante. Los dos miembros a unir se ponen en contacto mediante una fuerza axial (fig. 31.3). Una vez establecido suficiente contacto, el miembro giratorio se detiene con rapidez (para que la soldadura no se destruya por cizallamiento), al tiempo que se aumenta la fuerza axial. Los óxidos y otros contaminantes presentes en la interfaz se retiran por medio de un movimiento radial hacia fuera del metal caliente en dicha interfaz.

El miembro rotatorio debe sujetarse con seguridad al plato o a la boquilla para que resista tanto el torque como las fuerzas axiales sin deslizarse. La presión en la interfaz, y la fricción resultante, producen suficiente calor para formar una unión fuerte.

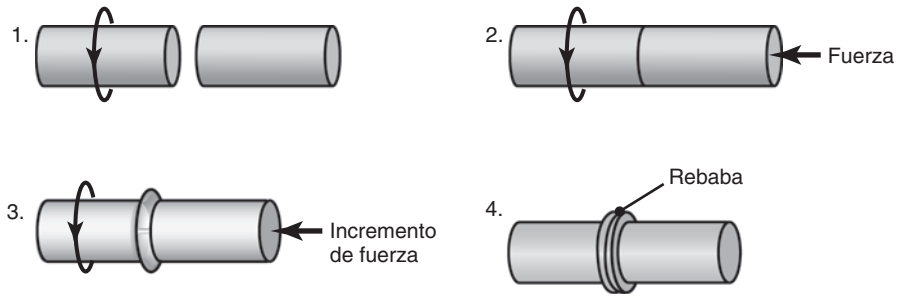


FIGURA 31.3 Secuencia de operaciones en el proceso de soldadura por fricción: 1. Se hace girar el componente de la izquierda a gran velocidad. 2. El componente de la derecha se somete a una fuerza axial. 3. Se aumenta la fuerza axial; comienza a formarse la proyección (rebaba). 4. El componente de la izquierda deja de girar; se termina la soldadura. Posteriormente se pueden retirar las rebabas mediante maquinado o rectificado.

Es común que la zona de soldadura se confine a una región angosta cuyo tamaño depende de los siguientes parámetros:

- La cantidad de calor generado.
- La conductividad térmica de los materiales.
- Las propiedades mecánicas de los materiales a temperatura elevada.

La forma de la unión soldada depende de la velocidad rotacional y de la presión axial aplicada (fig. 31.4). Deben controlarse estos factores para obtener una unión fuerte y uniforme. El movimiento radial hacia fuera del metal caliente en la interfaz empuja los óxidos y otros contaminantes fuera de ésta.

La soldadura por fricción se puede utilizar para unir una amplia variedad de materiales, en la inteligencia de que uno de los componentes tiene alguna simetría rotacional. Mediante este método es posible unir las partes sólidas o tubulares con una buena resistencia en la unión. Así se han unido con éxito barras sólidas de acero de hasta 100 mm (4 pulgadas) de diámetro y tubos de hasta 250 mm (10 pulgadas) de diámetro exterior.

La velocidad superficial del miembro rotatorio puede ser hasta de 15 m/s (3000 pies/min). Debido al calor y la presión combinados, la interfaz en la FRW desarrolla una rebaba mediante deformación plástica (recalcado) de la zona calentada. Esta rebaba (si es objetable) se puede retirar con facilidad por medio de maquinado o rectificado. Las máquinas para soldadura por fricción son totalmente automáticas y la habilidad requerida del operador es mínima, una vez que se han ajustado en forma apropiada los ciclos individuales de tiempo para la operación completa.

Soldadura por fricción e inercia. Este proceso es una modificación de la FRW, aunque el término se ha utilizado de manera indistinta con el de soldadura por fricción. La energía requerida para el calentamiento por fricción en la soldadura por fricción e inercia es provista por la energía cinética de un volante. Éste se acelera a la velocidad apropiada, los dos miembros se ponen en contacto y se aplica una fuerza axial. Mientras la fricción en la interfaz reduce la velocidad del volante, la fuerza axial se incrementa. La soldadura se completa cuando se detiene el volante. La sincronización de esta secuencia es importante para obtener una buena calidad en la soldadura.

La masa rotatoria en las máquinas de soldadura por fricción e inercia se puede ajustar para aplicaciones que requieren diferentes niveles de energía (éstos dependen del tamaño y las propiedades de la pieza de trabajo). En una aplicación de soldadura por fricción e inercia, se sueldan flechas con diámetro de 10 mm (0.4 pulgadas) a impulsores de turbocargadores automovilísticos a la velocidad de una unión cada 15 segundos.

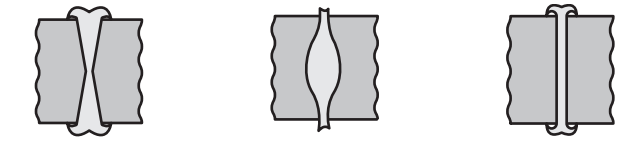


FIGURA 31.4 Forma de las zonas de fusión en la soldadura por fricción, en función de la fuerza axial aplicada y la velocidad de rotación.

Soldadura por fricción lineal. En un desarrollo posterior de la soldadura por fricción, la interfaz de los dos componentes a unir se somete a un movimiento alternativo *lineal*, en lugar de un movimiento rotatorio. En la *soldadura por fricción lineal*, no es necesario que los componentes tengan secciones transversales circulares o tubulares. El proceso es capaz de soldar componentes cuadrados o rectangulares (así como partes redondas) fabricadas con metales o plásticos. En este proceso, una parte se mueve a través de la superficie de la otra mediante un mecanismo alternativo balanceado.

En una aplicación, se soldó por fricción una parte rectangular de aleación de titanio a una frecuencia lineal de 25 Hz, con una amplitud de ± 2 mm (0.08 pulgada) bajo una presión de 100 MPa (15,000 psi), actuando sobre una interfaz de 240 mm^2 (0.38 $pulg^2$). Se han soldado exitosamente diversas partes metálicas con secciones transversales rectangulares de hasta 50 mm $\times$ 20 mm (2 $\times$ 0.8 pulgadas).

Soldadura por fricción y agitación. En la soldadura por fricción convencional, el calentamiento de las interfaces se logra mediante fricción por frotamiento entre dos superficies en contacto. En el proceso de soldadura por fricción y agitación (FSW, por sus siglas en inglés), desarrollado en 1991, se frota un tercer cuerpo contra las dos superficies a unir. Una sonda rotatoria no consumible (por lo general de 5 mm a 6 mm de diámetro y 5 mm de altura) se inserta dentro de la unión (fig. 31.5). Las presiones de contacto provocan calentamiento por fricción, elevando la temperatura a un intervalo de 230 °C a 260 °C (450 °F a 500 °F). La sonda en la punta de la herramienta giratoria fuerza el calentamiento y mezcla (o agita) el material en la unión.

Se han soldado con éxito materiales como aluminio, cobre, acero y titanio, y se realizan desarrollos para ampliar las aplicaciones de la FSW a polímeros y materiales compósitos. Hoy en día, este proceso se emplea en vehículos aeroespaciales, automovilísticos, militares y embarcaciones, utilizando láminas o placas. Con desarrollos en el diseño de la herramienta rotatoria, otras aplicaciones posibles incluyen la inducción de cambios microestructurales, refinamiento del grano en materiales y mejoramiento de la tenacidad localizada en fundiciones.

El equipo de soldadura puede ser una máquina fresadora convencional con husillo vertical (fig. 24.15b) y es relativamente fácil implantar el proceso. El espesor del material soldado puede ser tan pequeño como 1 mm y hasta de 50 mm (2 pulgadas), soldado en un solo paso. Las soldaduras FSW son de alta calidad, tienen poros mínimos y una estructura uniforme del material. La soldadura se produce con una baja alimentación de

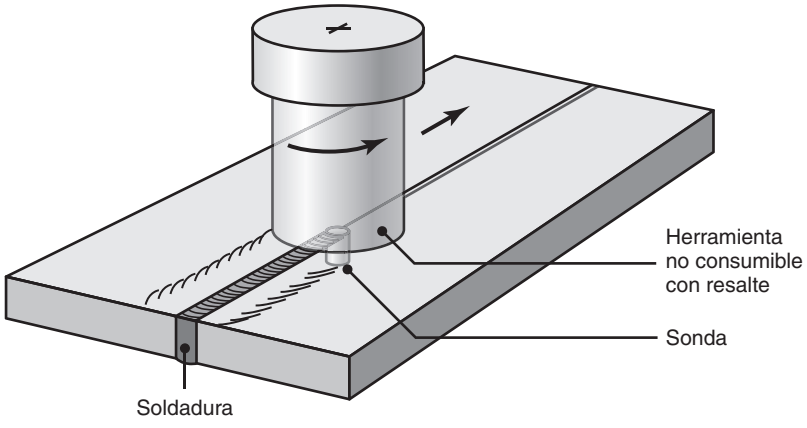


FIGURA 31.5 Principio del proceso de soldadura por fricción por agitación. Mediante este proceso se han soldado placas de aleación de aluminio de hasta 75 mm (3 pulgadas) de espesor.

calor y, por lo tanto, con poca distorsión y pequeños cambios microestructurales. No se requieren gases protectores o limpieza superficial.

31.5 Soldadura por resistencia

La categoría de la *soldadura por resistencia* (RW) incluye numerosos procesos en los que el calor requerido para la soldadura se produce por medio de **resistencia eléctrica** a través de los dos componentes a unir. Estos procesos tienen ventajas importantes, como el hecho de que no necesitan electrodos consumibles, gases protectores o fundente.

El calor generado en la soldadura por resistencia está dado por la expresión general:

$$H = I^2Rt \tag{31.1}$$

donde

H = Calor generado en joules (watt-segundo)
I = Corriente (en amperes)
R = Resistencia (en ohms)
t = Tiempo del flujo de corriente (en segundos)

Con frecuencia, la ecuación 31.1 se modifica para que represente la energía calorífica real disponible en la soldadura mediante la inclusión de un factor K, que representa las pérdidas de energía mediante la conducción y radiación. Entonces, la ecuación se convierte en:

$$H = I^2RtK \tag{31.2}$$

donde el valor de K es menor a la unidad.

En relación con la operación de soldadura de resistencia por puntos mostrada en la figura 31.6, la *resistencia total* es la suma de las siguientes propiedades:

- Las resistencias de los electrodos.
- La resistencia del contacto entre el electrodo y la pieza de trabajo.
- Las resistencias individuales de las partes a soldar.
- La resistencia del contacto entre las piezas de trabajo (entre las *superficies de empalme*).

La elevación real de temperatura en la unión depende del calor específico y la conductividad térmica de los metales a unir. Por ejemplo, metales como el aluminio y el cobre tienen una alta conductividad térmica, por lo que requieren elevadas concentraciones de calor. Mediante la soldadura por resistencia se pueden unir metales similares o disímiles. La magnitud de la corriente en las operaciones de soldadura por resistencia puede ser hasta de 100,000 A, pero por lo común el voltaje es de sólo 0.5 a 10 V.

La resistencia de la unión depende de la rugosidad de la superficie y la limpieza de las superficies coincidentes. Por lo tanto, antes de la soldadura deben eliminarse las películas de aceite, pintura y capas gruesas de óxido. La presencia de capas delgadas y uniformes de óxido y otros contaminantes no es tan crítica.

Desarrollados a principios del siglo XX, los procesos de soldadura por resistencia requieren maquinaria especializada. En la actualidad, muchas de ellas se accionan mediante un control computarizado programable. En general, la maquinaria no es portátil y el proceso es fundamentalmente adecuado para usarse en plantas de manufactura y

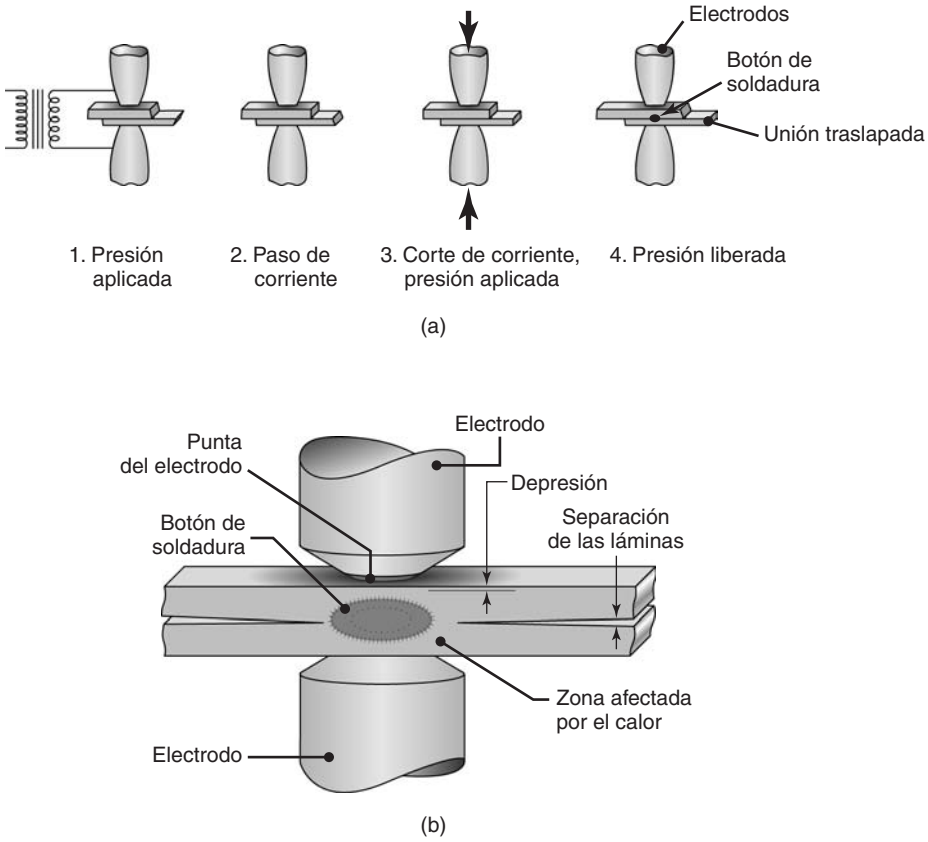


FIGURA 31.6 *(a)* Secuencia de eventos en la soldadura por resistencia por puntos. *(b)* Sección transversal de un punto de soldadura mostrando el botón de soldadura y la depresión del electrodo en las superficies de las láminas. Éste es uno de los procesos más utilizados en la fabricación de láminas metálicas y en el ensamble de carrocerías automotrices.

talleres para máquinas. La habilidad que necesita el operador es mínima, en particular con maquinaria moderna.

31.5.1 Soldadura de puntos por resistencia

En la *soldadura de puntos por resistencia* (RSW, por sus siglas en inglés), las puntas de dos electrodos sólidos cilíndricos opuestos tocan una unión de dos láminas metálicas traslapadas y el calentamiento por resistencia produce un punto de soldadura (fig. 31.6a). Para obtener una unión fuerte en el **punto** o **botón de soldadura**, se aplica presión hasta que se corta la corriente y la soldadura ha solidificado. En la soldadura por resistencia, son fundamentales el control exacto y la sincronización de la corriente y de la presión. En la industria automotriz, por ejemplo, el número de ciclos es de alrededor de 30 a una frecuencia de 60 Hz (ver también *soldadura por resistencia de alta frecuencia* en la sección 31.5.3).

Por lo general, el botón de soldadura (fig. 31.6b) es de 6 mm a 10 mm (0.25 a 0.375 pulgada) de diámetro. La superficie del punto de soldadura tiene una depresión ligeramente decolorada. Las corrientes van de 3000 a 40,000 A. El nivel de corriente depende de los materiales a soldar y de su espesor. Por ejemplo, es común que la corriente sea de 10,000 A para los aceros y 13,000 para el aluminio. Los electrodos suelen fabricarse con aleaciones de cobre y deben tener suficiente conductividad eléctrica y resistencia en caliente para mantener su forma.

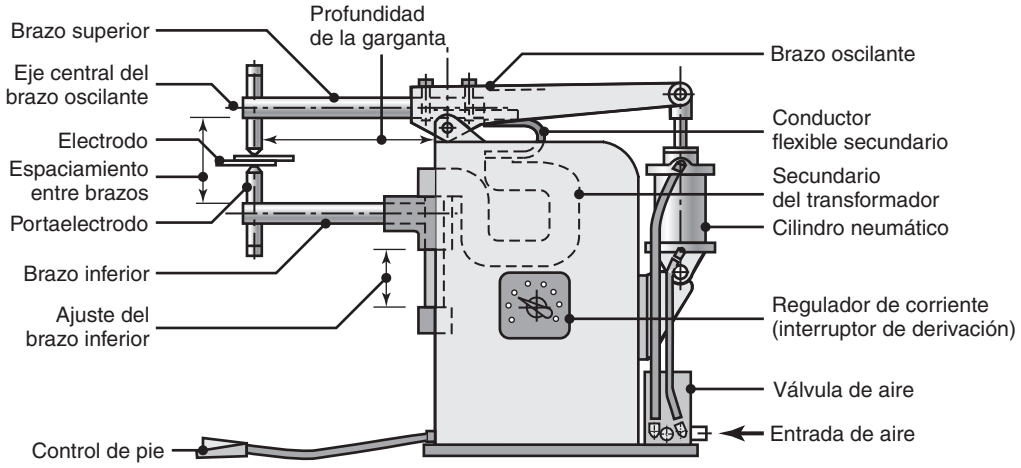


FIGURA 31.7 Esquema de una máquina neumática de soldadura por puntos de brazo oscilante.

La soldadura por puntos es el proceso de soldadura por resistencia más sencillo y utilizado. La soldadura se puede realizar mediante un solo par de electrodos (lo más común), o por múltiples pares de electrodos (hasta 100 o más) y la presión requerida se provee por medios mecánicos o neumáticos (fig. 31.7). Para las partes más pequeñas, es normal que se usen máquinas de soldadura por puntos **tipo brazo oscilante**; para las piezas de trabajo más grandes se emplean máquinas **tipo prensa**. La forma y las condiciones de la superficie de la punta del electrodo y la capacidad de acceso al sitio son factores importantes en la soldadura por puntos. Se utilizan varias formas de electrodos para soldar áreas por puntos a las que es difícil tener acceso (fig. 31.8).

La soldadura por puntos se utiliza ampliamente para fabricar partes con láminas metálicas. Los ejemplos van desde la sujeción de asas para utensilios de cocina de acero inoxidable (fig. 31.9a) hasta la soldadura por puntos de silenciadores o "mofles" (fig. 31.9b) y grandes estructuras de láminas metálicas. Los modernos equipos de soldadura por puntos se controlan por medio de computadoras para sincronizar en forma óptima la corriente y la presión; sus pistolas de soldadura por puntos se manipulan mediante robots programables (fig. 31.9c). Las carrocerías automotrices pueden tener hasta 10,000 puntos de soldadura; se sueldan a grandes capacidades usando electrodos múltiples (ver fig. I.13).

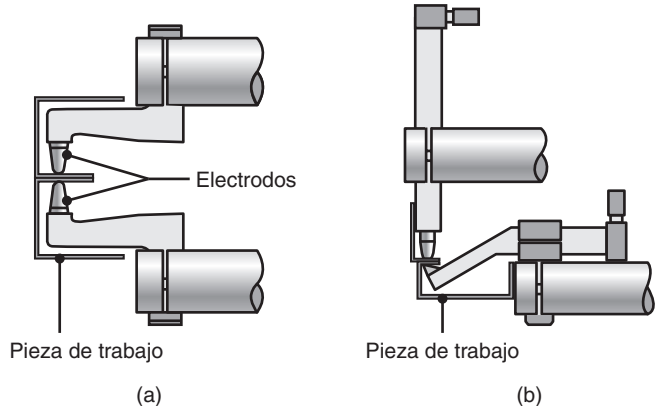


FIGURA 31.8 Dos diseños de electrodos para facilitar el acceso a los componentes a soldar.

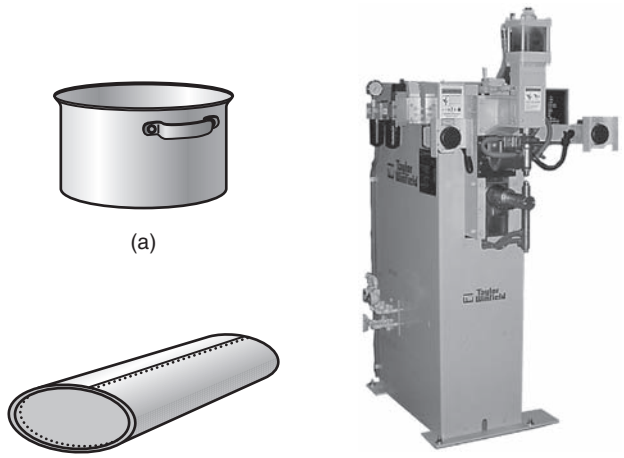


FIGURA 31.9 *(a)* y *(b)* Utensilio de cocina y silenciador o "mofle". *(c)* Máquina automática para soldadura por puntos. La punta de soldadura se puede mover en tres direcciones principales. En esta máquina es posible manejar láminas de hasta 2.2 × 0.55 m (88 × 22 pulgadas) con los soportes apropiados para las piezas de trabajo. *Fuente:* Cortesía de Taylor-Winfield Corporation.

Prueba de soldaduras por puntos. La resistencia del botón de soldadura en las uniones soldadas por puntos se puede probar utilizando las siguientes técnicas (fig. 31.10):

- Tensión cortante.
- Tensión transversal.
- Torcido.
- Pelado.

En las instalaciones fabriles es común utilizar las pruebas de tensión cortante debido a que se realizan con facilidad y son económicas. Las pruebas de tensión transversal y torcido pueden revelar defectos, grietas y porosidad en el área de soldadura. La prueba de pelado se usa generalmente para láminas delgadas. Una vez que se ha doblado y pelado la unión, se evalúan la forma y el tamaño del botón de soldadura roto.

EJEMPLO 31.2 Calor generado en la soldadura por puntos

Supóngase que se están soldando por puntos dos hojas metálicas de 1 mm (0.04 pulgada) de espesor, con una corriente de 5000 A y sobre un tiempo de flujo de corriente de 0.1 segundos, por medio de electrodos de 5 mm (0.2 pulgada) de diámetro. Calcule el calor generado y su distribución en la zona de soldadura si la resistencia efectiva en la operación es de 200 $\mu\Omega$.

Solución De acuerdo con la ecuación 31.1,

$$\text{Calor} = (5000)^2(0.0002)(0.1) = 500 \text{ J}$$

A partir de la información dada, se puede calcular el volumen del botón de soldadura como 30 mm^3 (0.0018 $pulg^3$). Suponga que la densidad del acero (tabla 3.1) es 8000 kg/m^3 (0.008 g/mm^3); entonces el botón de soldadura tiene una masa de 0.24 g. El calor requerido para fundir 1 g de acero es de unos 1400 J, por lo que el calor necesario para fundir el botón de soldadura es (1400)(1400)(0.24) = 336 J. El calor restante (164 J) se disipa en el metal que rodea al botón.

31.5.2 Soldadura de costura por resistencia

La *soldadura de costura por resistencia* (RSEW, por sus siglas en inglés) es una modificación de la soldadura por puntos, en la que los electrodos se sustituyen por ruedas o rodillos giratorios (fig. 31.11a). Mediante el uso de una fuente de potencia de CA continua, los rodillos conductores eléctricos producen una soldadura por puntos cada que la corriente alcanza un nivel suficientemente elevado en el ciclo de la CA. Con una frecuencia elevada o una velocidad transversal lo suficientemente lenta, en realidad estos puntos de soldadura se traslapan y forman una costura continua, que produce una unión hermética a líquidos y gases (fig. 31.11b).

En la **soldadura por puntos por rodillo**, la corriente se aplica a los rodillos sólo de manera intermitente, lo que produce una serie de puntos de soldadura a intervalos específicos a lo largo de la costura (fig. 31.11c). En la **soldadura por costura por estampado** (fig. 31.11d), el traslape de las soldaduras es de casi una a dos veces el espesor de la lámina

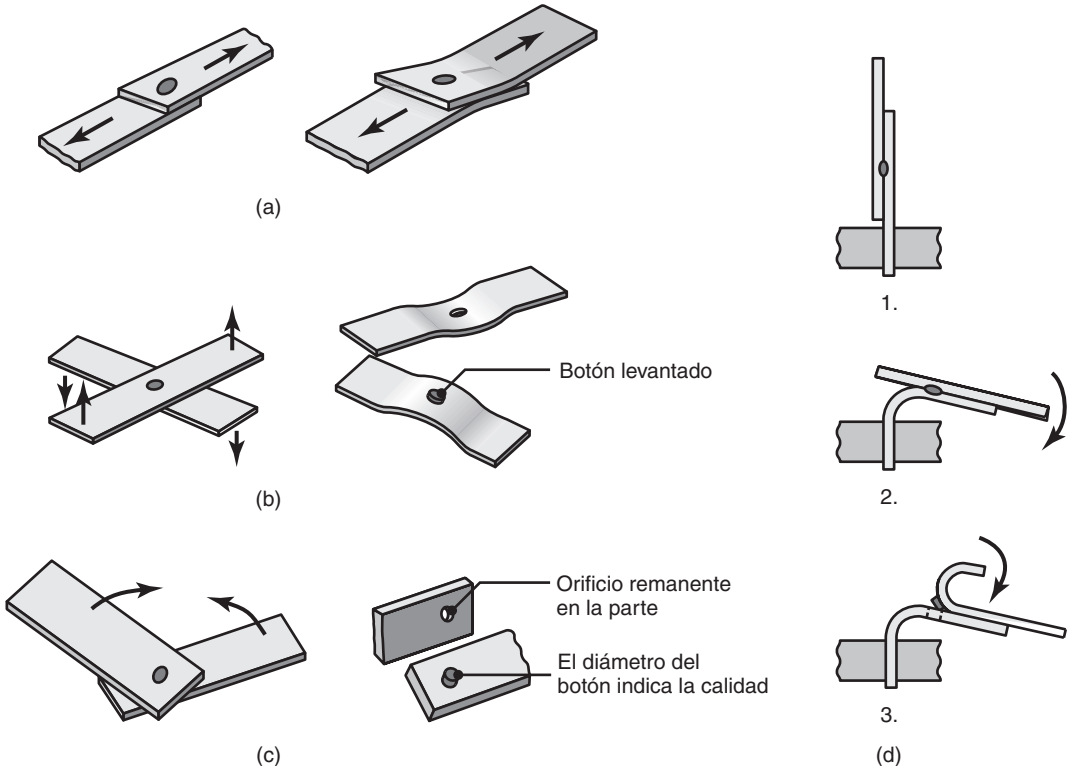


FIGURA 31.10 Métodos de prueba para puntos de soldadura: *(a)* prueba de tensión-cortante; *(b)* prueba de tensión transversal; *(c)* prueba de torcido; *(d)* prueba de pelado (ver también fig. 32.9).

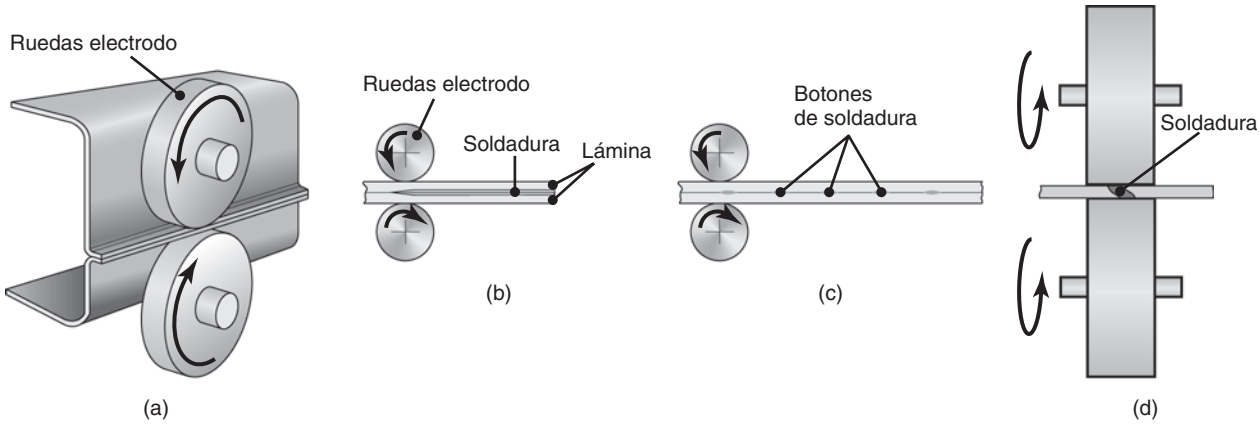


FIGURA 31.11 *(a)* Proceso de soldadura de costura en el que los rodillos giratorios actúan como electrodos. *(b)* Puntos de traslape en una soldadura por costura. *(c)* Soldaduras por puntos por rodillos, y *(d)* soldadura por costura por estampado.

y el espesor de la costura soldada es de sólo 90% del espesor original de dicha lámina. Este proceso también se utiliza para producir láminas metálicas *soldadas a la medida*, que se pueden fabricar asimismo mediante soldadura láser (ver sección 16.2.2).

El proceso RSEW se utiliza para efectuar la costura longitudinal (lateral) de las latas para productos domésticos, silenciadores o "mofles", tanques para gasolina y otros contenedores. La velocidad común de soldadura es de 1.5 m/min (6 pulgadas/min) para láminas delgadas.

31.5.3 Soldadura por resistencia de alta frecuencia

La *soldadura por resistencia de alta frecuencia* (HFRW, por sus siglas en inglés) es similar a la soldadura por costura, excepto que se emplea corriente de alta frecuencia (hasta de 450 kHz). Una aplicación típica es la producción de tubería o tubos *soldados a tope*, donde la corriente se conduce mediante dos contactos deslizantes (fig. 31.12a) hacia las orillas de los tubos formados por laminación. Entonces, las orillas calentadas se presionan una con otra haciendo pasar el tubo a través de un par de rodillos de compresión. Después se recorta cualquier rebaba que se haya formado.

Mediante la HFRW se pueden formar secciones estructurales (como las vigas I) soldando las almas y alas fabricadas con piezas largas y planas. También es posible fabricar tubos y tuberías espirales, tubos aletados para intercambiadores de calor y ruedas para

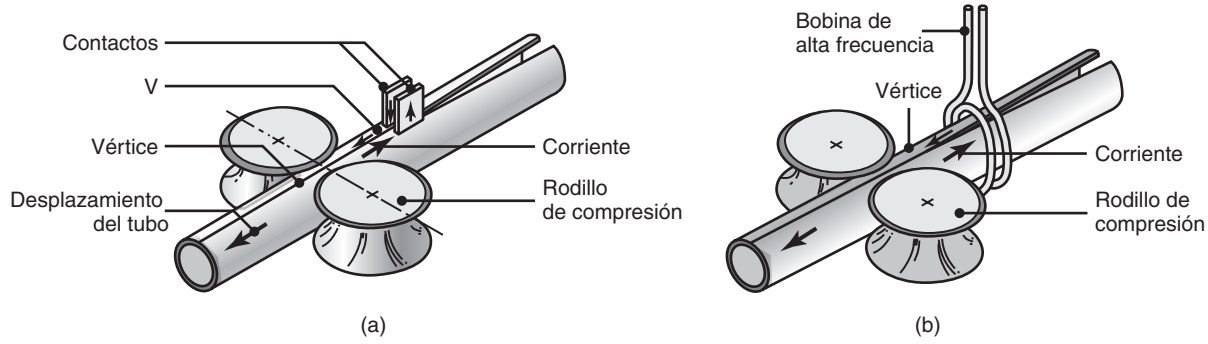


FIGURA 31.12 Dos métodos de soldadura continua a tope de alta frecuencia para tubos.

neumáticos por medio de estas técnicas. En otro método, llamado **soldadura por inducción de alta frecuencia** (HFIW), el tubo formado por laminación se somete a calentamiento por inducción de alta frecuencia, como se muestra en la figura 31.12b.

31.5.4 Soldadura de proyección por resistencia

En la *soldadura de proyección por resistencia* (RPW, por sus siglas en inglés), se desarrolla una alta resistencia eléctrica en la unión mediante repujado o realzado de una o más proyecciones (*hoyuelos*, ver fig. 16.37) en una de las superficies a soldar (fig. 31.13). Las proyecciones pueden ser redondas u ovaladas para propósitos de diseño o resistencia mecánica. En las proyecciones se generan altas temperaturas localizadas, que están en contacto con la parte coincidente plana. Los electrodos (por lo común fabricados con aleaciones base cobre) son grandes y planos, y enfriados por agua para mantener baja su temperatura. Cuando los electrodos ejercen presión a fin de suavizar y comprimir las proyecciones, se forman botones de soldadura similares a los de la soldadura por puntos.

El equipo para soldadura por puntos se puede utilizar para RPW modificando los electrodos. Aunque el repujado de las piezas de trabajo agrega gastos, este proceso produce varias soldaduras en un solo paso, aumenta la vida de los electrodos y es capaz de soldar metales de diferentes espesores, como una lámina soldada sobre una placa. Mediante este proceso pueden soldarse tuercas y pernos a láminas y placas (fig. 31.13c y d) con proyecciones que se producen mediante maquinado o forjado. A la unión de una red de varillas y alambres, como las que integran canastas metálicas, rejillas (fig. 31.13e), repisas para hornos y carritos para compras, también se le considera soldadura de proyección por resistencia, debido a las múltiples áreas pequeñas de contacto entre los alambres entrecruzados (rejillas).

31.5.5 Soldadura a tope por presión

En la *soldadura a tope por presión* (FW, por sus siglas en inglés), también llamada **flash butt welding,** se genera calor muy rápidamente a partir del arco cuando los dos miembros

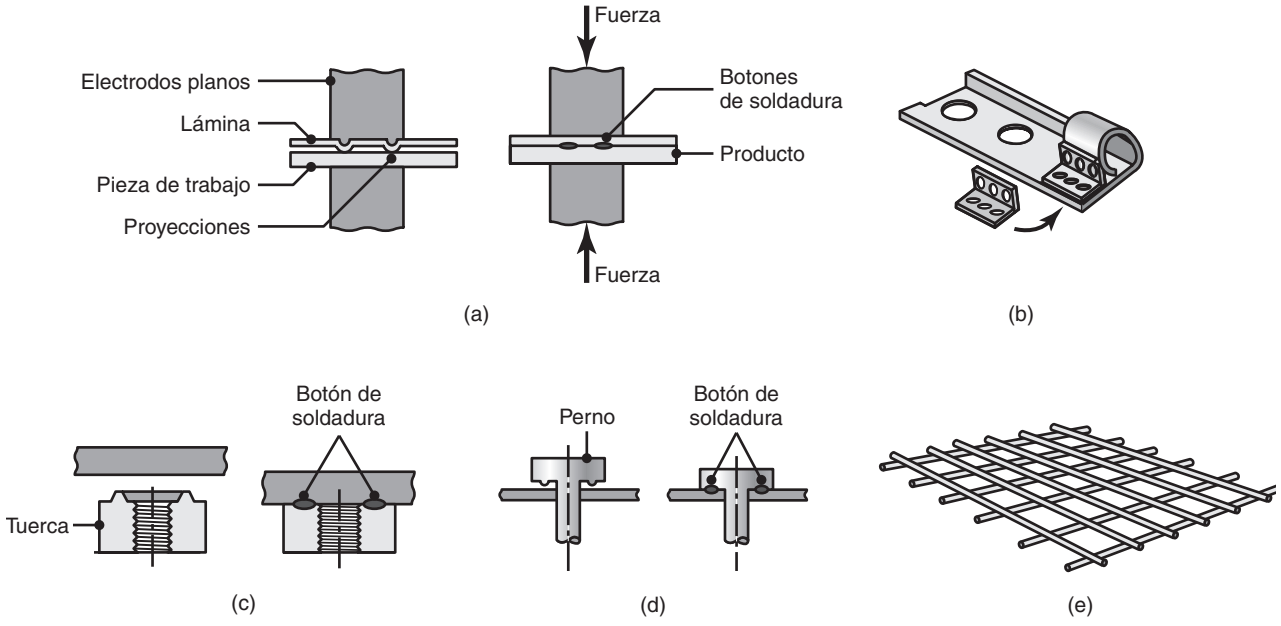


FIGURA 31.13 *(a)* Esquema del proceso de soldadura por resistencia de proyecciones. *(b)* Soporte soldado. *(c)* y *(d)* Soldadura por proyección de tuercas o varillas o pernos roscados. *(e)* Rejillas soldadas por resistencia de proyecciones.

comienzan a entrar en contacto y desarrollan una resistencia eléctrica en la unión (fig. 31.14a). Una vez que se alcanza la temperatura apropiada y la interfaz comienza a ablandarse, se aplica una fuerza axial a velocidad controlada y la soldadura se forma mediante deformación plástica de la unión. Al mecanismo se le llama *recalcado en caliente* y el término *soldadura por recalcado* (UW, por sus siglas en inglés) también se utiliza para este proceso. Durante el proceso, se expele un poco del metal fundido de la unión en forma de lluvia de chispas, de ahí el nombre de soldadura a tope por presión. Debido a la presencia de un arco, este proceso también se puede clasificar como soldadura por arco.

Durante esta operación, las impurezas y los contaminantes se expulsan por presión; por lo tanto, la calidad de la soldadura es buena. Sin embargo, una cantidad importante de material se puede quemar durante el proceso de soldadura. La unión puede maquinarse posteriormente para mejorar su apariencia. Por lo general, las máquinas para FW son automáticas y grandes, y tienen una variedad de alimentaciones de potencia que van de 10 a 1500 kVA.

El proceso de soldadura a tope por presión es adecuado para la unión de láminas extremo con extremo, u orilla con orilla, de metales similares o disímiles de 0.2 mm a 25 mm de espesor (0.01 a 1 pulgada), y para la unión a tope de barras de 1 mm a 75 mm (0.05 a 3 pulgadas) de diámetro. Las secciones más delgadas tienden a pandearse bajo la fuerza axial aplicada durante la soldadura. También se pueden soldar a tope por presión anillos, como los mostrados en la figura 31.14b y c, que fabricados mediante procesos de formado (como en la fig. 16.22). Asimismo, se puede utilizar este proceso para reparar hojas rotas de sierras de banda con el uso de soportes que se montan sobre la estructura de la sierra banda.

El proceso de soldadura a tope por presión se puede automatizar para lograr operaciones reproducibles de soldadura. Las aplicaciones características son la unión de tubos y de formas tubulares para muebles y ventanas metálicas. También se usa para

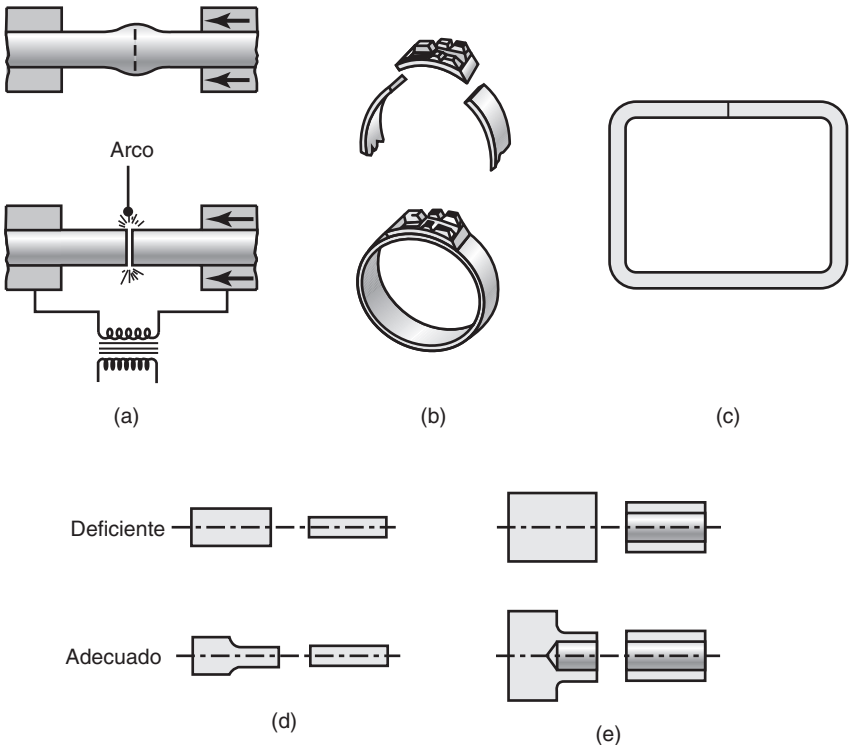


FIGURA 31.14 *(a)* Proceso de soldadura a tope por presión de barras sólidas o partes tubulares. *(b)* y *(c)* Partes comunes fabricadas mediante soldadura a tope por presión. *(d)* y *(e)* Algunos lineamientos de diseño para la soldadura a tope por presión.

soldar los extremos de láminas o rollos de alambre en los molinos de laminación de operación continua (capítulo 13) y en la alimentación de equipo para estirado de alambre (capítulo 15). Una vez que se establecen los parámetros apropiados del proceso, la habilidad requerida del operario es mínima. En la figura 31.14d y e se muestran algunos lineamientos de diseño para las superficies coincidentes en la soldadura a tope por presión. Obsérvese la importancia de las secciones transversales uniformes en la unión.

31.5.6 Soldadura de pernos por presión y alta corriente

La *soldadura de pernos por presión y alta corriente* (SW, por sus siglas en inglés), también llamada *soldadura de pernos por arco*, es similar a la soldadura a tope por presión. El perno (que puede ser una parte pequeña, o más comúnmente, una barra roscada, un colgante o una manija) sirve como uno de los electrodos mientras se une a otro componente, que por lo regular es una placa plana (fig. 31.15). La polaridad para el aluminio suele ser de electrodo positivo de corriente directa (DCEP, por sus siglas en inglés) y para el acero es de electrodo negativo de corriente directa (DCEN, por sus siglas en inglés).

Para concentrar el calor generado, evitar la oxidación y retener el metal fundido en la zona de soldadura, se coloca un anillo de cerámica desechable (*férula*) alrededor de la unión. El equipo para la soldadura de pernos por presión y alta corriente se puede automatizar con diversos controles para el arco y para aplicar presión; también existe equipo portátil para este tipo de soldadura. Las aplicaciones típicas de la soldadura ya descrita incluyen las carrocerías automotrices, tableros eléctricos y construcción de barcos; se utiliza además en la construcción de edificios.

En la **soldadura de pernos por descarga de capacitor**, se produce un arco de CD desde un banco de capacitores. No se requiere férula o fundente, debido a que el tiempo de soldadura es muy corto, del orden de 1 a 6 milisegundos. La elección entre este proceso y la soldadura de pernos por arco depende de factores como los tipos de metales a unir, el espesor y la sección transversal de la pieza de trabajo, el diámetro del perno y la forma de la unión.

31.5.7 Soldadura por percusión

Los procesos de soldadura por resistencia descritos hasta ahora suelen emplear un transformador eléctrico para satisfacer los requerimientos de potencia. Sin embargo, alternativamente, la energía eléctrica para la soldadura se puede almacenar en un capacitor. La *soldadura por percusión* (PEW, por sus siglas en inglés) utiliza esta última técnica, en la que la potencia se descarga en un periodo de 1 a 10 milisegundos para desarrollar un calor elevado localizado en la unión. Este proceso es útil donde debe evitarse el calentamiento de los componentes adyacentes a la unión, como en los ensambles electrónicos y alambres eléctricos.

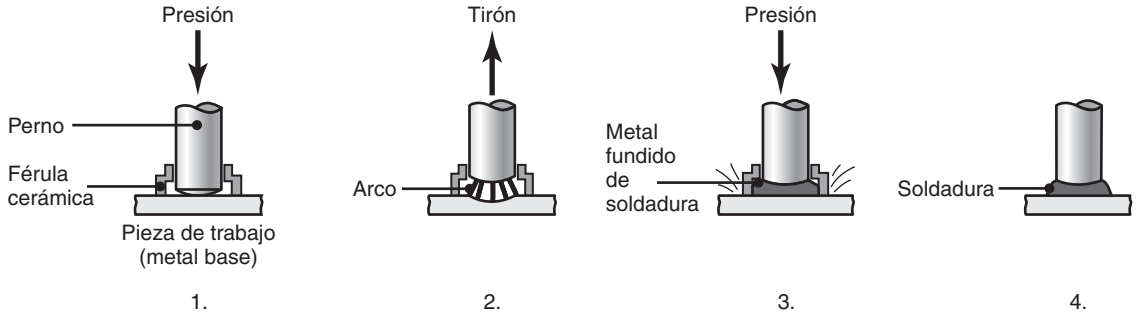


FIGURA 31.15 Secuencia de operaciones en la soldadura de pernos, utilizada comúnmente para soldar barras roscadas y diversos sujetadores sobre placas metálicas.

EJEMPLO 31.3 Soldadura por resistencia contra soldadura por rayo láser en la industria de fabricación de latas

Los cuerpos cilíndricos de las latas para alimentos y productos domésticos se han soldado por muchos años mediante costura por resistencia (una unión traslapada en el costado de la lata). A comienzos de 1987 se introdujo la tecnología de soldadura por rayo láser en la industria de fabricación de latas. Las uniones se sueldan mediante láser con la misma productividad que la soldadura por resistencia, pero con las siguientes ventajas:

- Al contrario de las uniones traslapadas adecuadas para la soldadura por resistencia, la soldadura láser utiliza uniones a tope; por lo tanto, se ahorra un poco de material. Si se multiplica por los miles de millones de latas fabricadas al año, esta cantidad se convierte en un ahorro importante.
- Debido a que las soldaduras láser tienen una zona muy angosta (fig. 31.16; ver también fig. 30.14), el área marcada en la superficie de la lata (margen de impresión) se reduce mucho. El resultado es que se mejora la apariencia de la lata y la aceptación del cliente.
- La unión traslapada soldada por resistencia puede estar sujeta a corrosión debido al contenido de la lata (jugo de tomate, por ejemplo). Este efecto puede cambiar el sabor y provocar riesgos potenciales de responsabilidad. Una unión a tope producida mediante soldadura por rayo láser elimina este problema.

Fuente: Cortesía de G. F. Benedict.

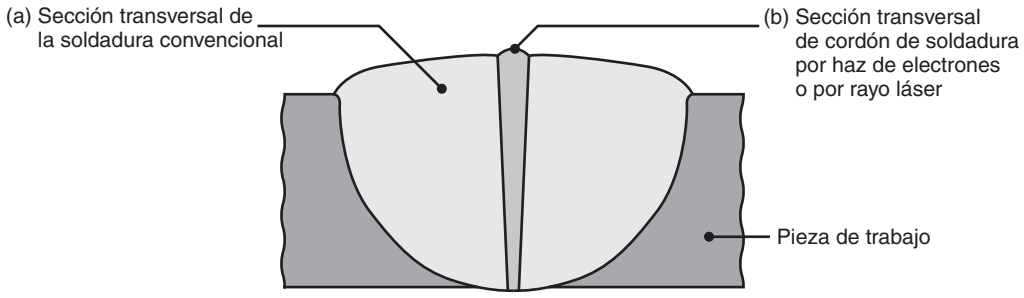


FIGURA 31.16 Tamaños relativos de los cordones de soldadura obtenidos mediante arco de tungsteno y por soldadura por haz de electrones o por rayo láser.

31.6 Soldadura por explosión

En la *soldadura por explosión* (EXW, por sus siglas en inglés) se aplica presión detonando una capa de explosivo que se ha colocado sobre uno de los componentes a unir, llamado *aleta* (fig. 31.17a y b). Las presiones de contacto desarrolladas son extremadamente altas y la energía cinética de la placa que golpea al componente coincidente genera una interfaz ondulada.

Este impacto engancha mecánicamente las dos superficies (fig. 31.17c y d), de manera que también ocurre una soldadura por presión mediante deformación plástica. La aleta se coloca en ángulo y cualquier película de óxido presente en la interfaz se rompe y es expulsada de ésta; en consecuencia, la resistencia de la soldadura por explosión es muy alta.

El explosivo puede ser una lámina flexible de plástico o cuerda, o tener forma granulada o líquida, que se vacía o presiona sobre la aleta. Es común que la velocidad de detonación se encuentre en el intervalo de 2400 a 3600 m/s (8000 a 12,000 pies/s); depende del tipo de explosivo, el espesor de la capa explosiva y la densidad de su empacado. Existe una velocidad mínima de detonación necesaria para que ocurra la soldadura en este proceso. La detonación se efectúa mediante una espoleta comercial normal.

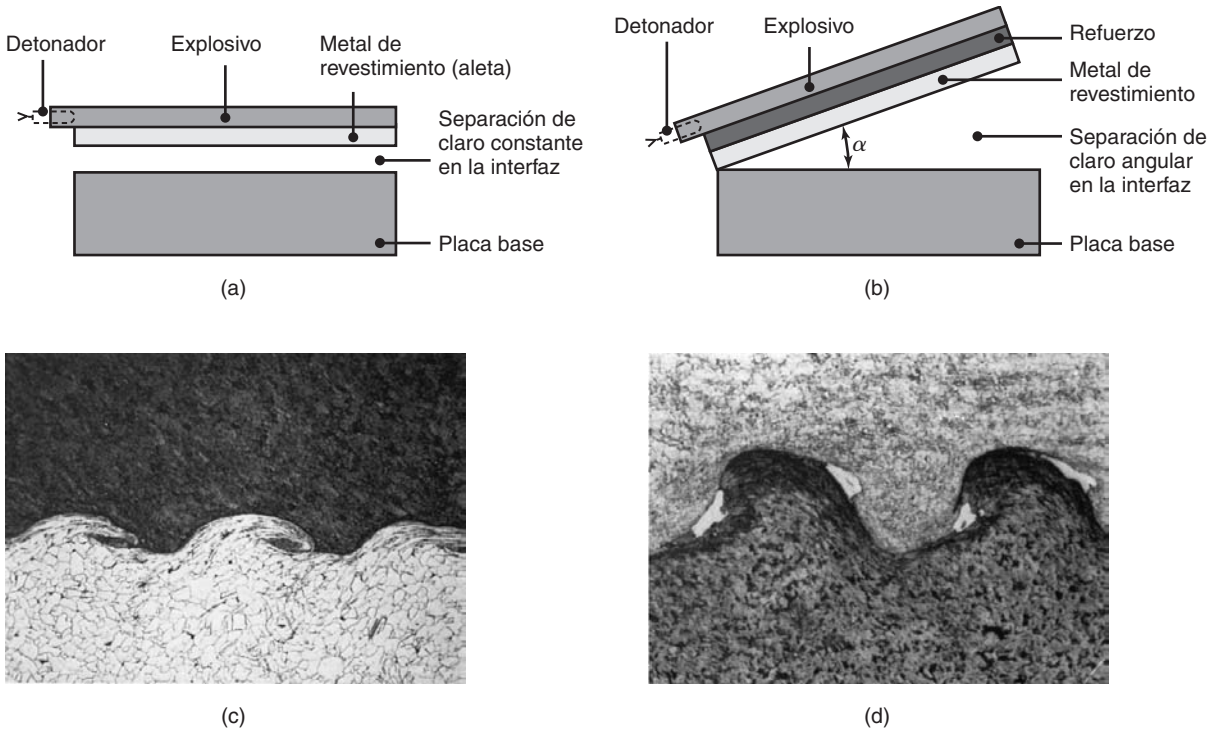


FIGURA 31.17 Esquema del proceso de soldadura por explosión: *(a)* separación de claro constante en la interfaz, y *(b)* separación de claro angular en la interfaz. *(c)* Sección transversal de unión soldada por explosión: titanio (arriba) y acero al bajo carbono (abajo). *(d)* Aleación hierro-níquel (arriba) y acero al bajo carbono (abajo).

Este proceso se desarrolló en la década de 1940. Es particularmente adecuado para revestir una placa o planchón con un metal distinto. Mediante el revestimiento por explosión se han recubierto placas hasta de 6 × 2 m (20 × 7 pies). Después, estas placas se pueden laminar para obtener secciones más delgadas. Es posible unir los tubos a los orificios en las placas de los cabezales de calderas e intercambiadores de calor colocando el explosivo dentro del tubo; la explosión expande el tubo. La soldadura por explosión es peligrosa, por lo que requiere un manejo seguro por personal bien capacitado y con experiencia.

31.7 Unión por difusión

La *unión por difusión* o **soldadura por difusión** (DFW, por sus siglas en inglés) es un proceso en el que la resistencia de la unión se debe fundamentalmente a la difusión (movimiento de los átomos a través de la interfaz) y en segundo lugar a la deformación plástica de las superficies de empalme. Este proceso requiere temperaturas de alrededor de 0.5 T_m (donde T_m es el punto de fusión del metal en la escala absoluta) para tener un índice de difusión suficientemente elevado entre las partes a unir.

La interfaz unida mediante DFW tiene en esencia las mismas propiedades físicas y mecánicas que el metal base. Su resistencia depende de *(a)* la presión, *(b)* la temperatura, *(c)* el tiempo de contacto, y *(d)* la limpieza de las superficies de empalme. Mediante el uso de metal de aporte en la interfaz se pueden flexibilizar estos requisitos. Dependiendo de los materiales unidos, es posible formar compuestos intermetálicos frágiles en la interfaz. Éstos se pueden evitar recubriendo las superficies mediante electrodeposición con aleaciones metálicas adecuadas.

En la unión por difusión se puede aplicar presión por medio de pesos muertos, una prensa y presión diferencial de gas, o mediante dilatación térmica de las partes a unir. Es

común calentar las partes en un horno o mediante resistencia eléctrica. También se utilizan autoclaves de alta presión para unir partes complejas.

Aunque este proceso se desarrolló en la década de 1970 como una moderna tecnología de soldadura, el principio de la unión por difusión data de siglos atrás, cuando los orfebres bañaban el cobre con oro para crear un producto llamado **chapa de oro**. Primero, se producía una lámina delgada de oro mediante martillado; después, se colocaba sobre el cobre y, sobre ambos, un peso. Finalmente, el ensamble se colocaba en un horno y se dejaba en él hasta que se obtenía una fuerte unión, de ahí que a este proceso también se le llamara *soldadura por presión y calor* (HPW, por sus siglas en inglés).

En general, la unión por difusión es más adecuada para unir metales distintos. También se usa en metales reactivos (como el titanio, berilio, zirconio y aleaciones metálicas refractarias) y en materiales compósitos, como los compósitos de matriz metálica (sección 9.5). La unión por difusión es además un mecanismo importante de sinterización en la metalurgia de polvos (sección 17.4). Debido a que la difusión implica la migración de los átomos a través de la unión, este proceso es más lento que otros procesos de soldadura.

Aunque la DFW se utiliza para fabricar partes complejas en cantidades pequeñas para las industrias aeroespacial, nuclear y electrónica, se ha automatizado a fin de hacerla adecuada y económica para la producción de volúmenes moderados. A menos que el proceso sea altamente automatizado, se requiere capacitación y habilidad considerables del operador. El costo del equipo se relaciona con el área unida por difusión, y se encuentra en el intervalo de \$3 a \$6 dólares por mm^2 (\$2000 a \$4000 dólares por $pulg^2$).

EJEMPLO 31.4 Aplicaciones de la unión por difusión

La unión por difusión es adecuada para metales como el titanio y las superaleaciones utilizadas en aeronaves militares. Las posibilidades de diseño permiten conservar materiales estratégicos costosos y reducir los costos de manufactura. La aeronave militar ilustrada en la figura 31.18 tiene más de 100 partes unidas por difusión, algunas de las cuales se muestran en ella.

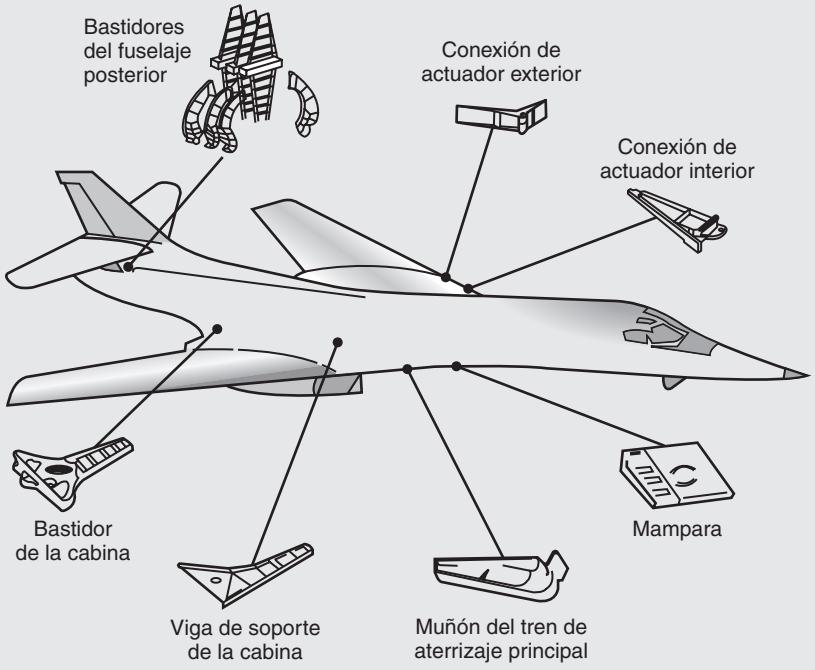


FIGURA 31.18 Aplicación aeroespacial de la unión por difusión.

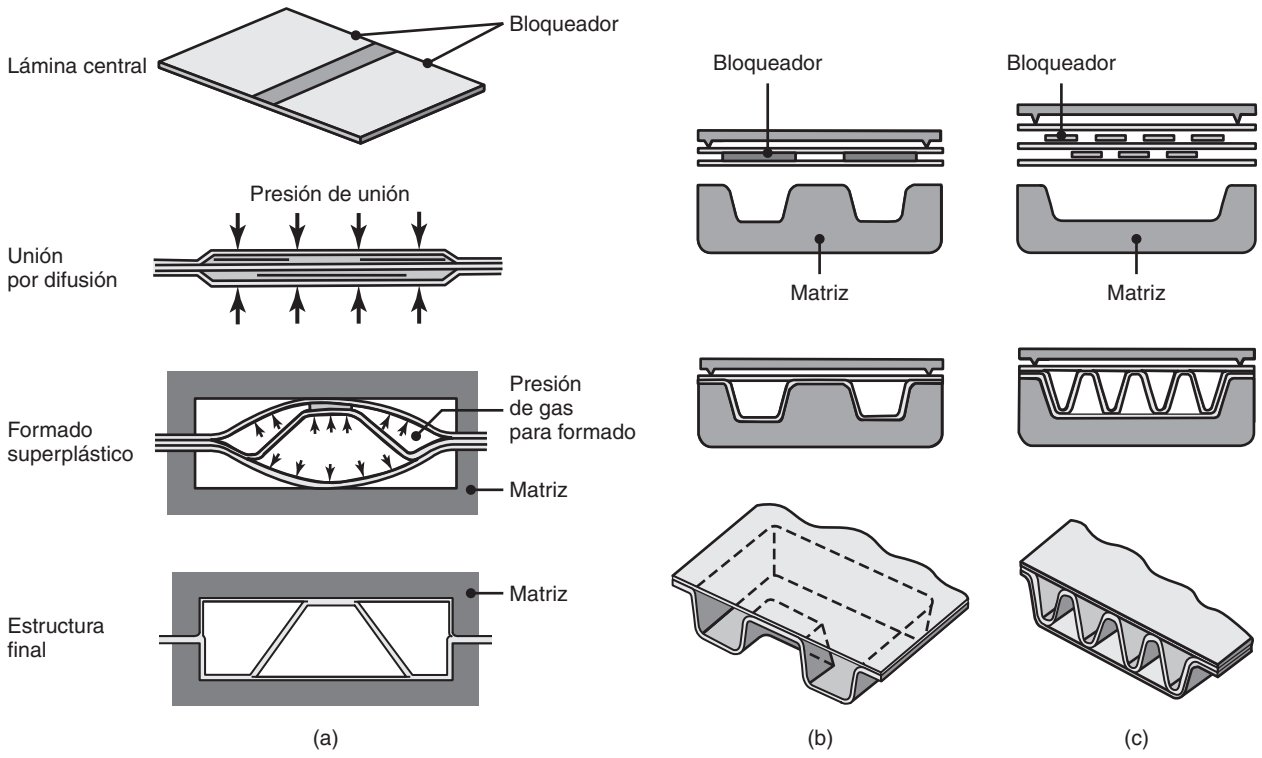


FIGURA 31.19 Secuencia de operaciones en la fabricación de una estructura mediante unión por difusión y el formado superplástico de tres láminas originalmente planas. *Fuentes: (a)* D. Stephen y S. J. Swadling. *(b)* y *(c)* Cortesía de Rockwell International Corp.

Unión por difusión y formado superplástico. Se pueden fabricar estructuras de láminas metálicas mediante la combinación de la *unión por difusión* con el *formado superplástico* (ver también la sección 16.10). En la figura 31.19 se muestran estructuras típicas en las que algunas láminas, por lo general planas, se unen por difusión y se forman. Después de la unión por difusión de las áreas seleccionadas en las láminas, se dilatan en un molde las regiones no unidas (*bloqueadas*) por medio de aire o fluido a presión. Estas estructuras son delgadas y tienen grandes relaciones de rigidez a peso, de ahí que sean muy útiles en aeronaves y aplicaciones aeroespaciales.

Este proceso mejora la productividad al eliminar el número de partes en una estructura, sujetadores mecánicos, mano de obra y costo. Produce partes con buena precisión dimensional y con esfuerzos residuales bajos. Desarrollada por primera vez en la década de 1970, en la actualidad esta tecnología está muy avanzada para estructuras de titanio y aluminio (que suelen utilizar Ti-6Al-4V y 7475-T6, respectivamente) y diversas aleaciones para aplicaciones aeroespaciales.

31.8 Economía de las operaciones de soldadura

TLas características, ventajas y limitaciones de los procesos de soldadura descritos hasta ahora incluyeron breves comentarios en relación con los costos de la soldadura. En las tablas 30.1 y VI.1 se muestran los costos relativos de algunos procesos seleccionados. Al igual que en las otras operaciones de manufactura, los costos en los procesos de unión y soldadura pueden variar ampliamente, dependiendo de factores como la capacidad del equipo, el nivel de automatización, la habilidad requerida de la mano de obra, la calidad de la soldadura, la capacidad de producción, la preparación necesaria y otras consideraciones específicas para cada proceso de unión en particular.

Los *costos* generales de *la soldadura* y *la unión* para algunas operaciones comunes (descritas en los capítulos 30 a 32) se pueden resumir de la siguiente manera:

- *Altos:* soldadura fuerte y sujetadores (como pernos y tuercas), ya que requieren operaciones de fabricación de orificios y costos de los sujetadores.
- *Intermedios:* soldadura por arco, remachado, unión con adhesivos.
- *Bajos:* soldadura por resistencia, costura y engargolado, ya que realizarlos y automatizarlos es relativamente simple.

Los *costos del equipo* para soldadura se pueden resumir como sigue, haciendo notar que pueden variar ampliamente:

- *Altos* ($100,000 a $200,000 dólares): soldadura por haz de electrones y por rayo láser.
- *Intermedios* ($5000 a $50,000+ dólares): soldadura por puntos, arco sumergido, arco metálico y gas, arco de tungsteno y gas, arco con núcleo de fundente, soldadura eléctrica por gas, electroescoria, arco de plasma y ultrasónica.
- *Bajos* ($1000+ dólares): soldadura por arco metálico protegido y con oxígeno y combustible gaseosos.

En general, los costos de la mano de obra en la soldadura son más altos que en otras operaciones de metalformado debido a la habilidad del operador, el tiempo de soldado y la preparación requerida. Sin embargo, mucho depende de la automatización del equipo empleado, incluyendo el uso de controles robóticos y de computadora, programados para seguir una trayectoria prescrita (*rastreo de la costura*) durante la soldadura. Se ha observado que en los sistemas con controles robóticos, el número alcanza hasta 80%, mientras que en las operaciones de soldadura manual (ver tabla 30.1) el tiempo real de soldadura empleado por el operador es sólo 30% del tiempo total.

Los costos de la mano de obra se pueden resumir como sigue:

- *Altos a intermedios:* soldadura con oxígeno y combustible gaseosos y soldadura por arco metálico protegido.
- *Altos a bajos:* soldadura por haz de electrones y por rayo láser y soldadura por arco con núcleo de fundente.
- *Intermedios a bajos:* soldadura por arco sumergido.

RESUMEN

- Además de los procesos tradicionales de unión con oxígeno y combustible gaseosos y soldadura por arco, existen muchos otros procesos de unión que se basan en la producción de una unión fuerte bajo presión o calor.
- La preparación de la superficie y la limpieza son importantes en algunos de estos procesos. La presión se aplica por medios mecánicos o por explosivos. El calor puede suministrarse de manera externa (resistencia eléctrica u hornos) o generarse internamente, como en la soldadura por fricción.
- Entre los desarrollos importantes se encuentra la combinación de los procesos de unión por difusión y formado superplástico. Se mejora la productividad, al igual que la capacidad para fabricar partes complejas de manera económica.
- Al igual que en todas las operaciones de manufactura, ciertos riesgos son inherentes en las operaciones de soldadura. Algunos se relacionan con la maquinaria y el equipo utilizado; otros, con la naturaleza del proceso. Siempre deben tomarse medidas de seguridad apropiadas en las áreas de trabajo donde se realiza la soldadura.

TÉRMINOS CLAVE

Aleta
Botón de soldadura
Chapa de oro
Férula
Formado superplástico
Soldadura a tope por presión
Soldadura de costura por resistencia
Soldadura de estado sólido
Soldadura de pernos
Soldadura en frío
Soldadura por explosión
Soldadura por fricción
Soldadura por fricción e inercia
Soldadura por fricción lineal
Soldadura por fricción y agitación
Soldadura por percusión
Soldadura por puntos por rodillo
Soldadura por resistencia
Soldadura por resistencia de alta frecuencia
Soldadura de proyecciones por resistencia
Soldadura por puntos por resistencia
Soldadura ultrasónica
Superficies de empalme
Unión por difusión (soldadura)
Unión por laminación (soldadura)

BIBLIOGRAFÍA

ASM Handbook, Vol. 6: *Welding, Brazing, and Soldering*, ASM International, 1993.

Bowditch, W. A. y Bowditch, K. E., *Welding Technology Fundamentals*, Goodheart-Willcox, 1997.

Cary, H. B., *Modern Welding Technology*, 4a. ed., Prentice Hall, 1997.

Davies, A. C., *The Science and Practice of Welding*, 10a. ed., 2 vols., Cambridge University Press, 1993.

Easterling, K. E., *Introduction to the Physical Metallurgy of Welding*, Butterworth, 1983.

Evans, G. M. y Bailey, N., *Metallurgy of Basic Weld Metal*, Woodhead Publishing, 1997.

Galyen, J., Sear, G. y Tuttle, C., *Welding: Fundamentals and Procedures*, Wiley, 1984.

Granjon, H., *Fundamentals of Welding Metallurgy*, Woodhead Publishing, 1991.

Hicks, J. G., *Welded Joint Design*, 2a. ed., Abington, 1997.

Jeffus, L. F., *Welding: Principles and Applications*, 4a. ed., Delmar Publishers, 1997.

Jellison, R., *Welding Fundamentals*, Prentice Hall, 1995.

Lancaster, J. F., *The Metallurgy of Welding*, Chapman & Hall, 1993.

Messler, R. W., Jr., *Joining of Advanced Materials*, Butterworth-Heinemann, 1993.

Mouser, J. D., *Welding Codes, Standards, and Specifications*, McGraw-Hill, 1997.

Nicholas, M. G., *Joining Process: Introduction to Brazing and Diffusion Bonding*, Chapman & Hall, 1998.

North, T. H., *Advanced Joining Technologies*, Chapman & Hall, 1990.

Tool and Manufacturing Engineers Handbook, Vol. 4: *Quality Control and Assembly*, Society of Manufacturing Engineers, 1986.

Welding Handbook, 8a. ed., 3 vols., American Welding Society, 1987.

PREGUNTAS DE REPASO

31.1 Explique lo que significa soldadura de estado sólido.
31.2 ¿Qué es la soldadura en frío? ¿Por qué se llama así?
31.3 ¿Cuáles son las superficies de empalme en los procesos de soldadura de estado sólido? ¿Qué significan?
31.4 ¿Cuál es el principio básico de *(a)* la soldadura ultrasónica, y *(b)* la unión por difusión?
31.5 ¿Qué ventajas tiene la soldadura por fricción sobre otros métodos descritos en éste y en el capítulo precedente?
31.6 Describa las ventajas y limitaciones de la soldadura por explosión.
31.7 Describa el principio de los procesos de soldadura por resistencia.
31.8 ¿Qué tipo de productos son adecuados para la soldadura de pernos? ¿Por qué?
31.9 ¿Cuál es la ventaja de la soldadura por fricción lineal sobre la soldadura por fricción e inercia?
31.10 Describa cómo funciona la soldadura a tope por alta frecuencia.

PROBLEMAS CUALITATIVOS

31.11 Explique las similitudes y diferencias entre los procesos de unión descritos en este capítulo y los presentados en el capítulo 30.

31.12 Explique las razones por las que se desarrollaron los procesos descritos en este capítulo.

31.13 Describa sus observaciones en relación con la figura 31.17c y d.

31.14 ¿Le preocuparía el tamaño de los cordones de soldadura mostrados en la figura 31.16? Explique su respuesta.

31.15 Discuta los factores que influyen en la resistencia de un componente *(a)* unido por difusión, y *(b)* soldado en frío.

31.16 Describa las fuentes de calor para los procesos descritos en este capítulo.

31.17 Comente la viabilidad de aplicar soldadura por explosión en el ambiente fabril.

31.18 ¿Se puede aplicar el proceso de unión por rodillos a varias configuraciones de partes? Explique su respuesta.

31.19 ¿Por qué la unión por difusión es un proceso atractivo de fabricación (cuando se combina con el formado superplástico de láminas metálicas)? ¿Tiene alguna limitación?

31.20 Describa las características de un botón de soldadura. ¿De qué depende su resistencia?

31.21 Liste algunos productos que se puedan fabricar mediante procesos de soldadura por resistencia.

31.22 Dé algunas razones por las que suele utilizarse la soldadura por puntos en las carrocerías automotrices y en artículos domésticos.

31.23 Explique la importancia de la magnitud de la presión aplicada mediante los electrodos durante una operación de soldadura por puntos.

31.24 Sugiera algunas aplicaciones para *(a)* soldadura a tope por presión; *(b)* soldadura de pernos, y *(c)* soldadura por percusión.

31.25 Analice la necesidad y el papel de los soportes fijos para sujetar piezas de trabajo en las operaciones de soldadura descritas en este capítulo.

31.26 Revise la figura 31.4 y explique por qué se desarrollan esas formas particulares de zona de fusión en función de la presión y la velocidad. Comente la influencia de las propiedades de los materiales.

31.27 Discuta sus observaciones relativas a los lineamientos de diseño de soldaduras ilustrados en la figura 31.14d y e.

31.28 ¿Se puede soldar por fricción si una de las piezas a soldar no es circular? Explique y dé algunos ejemplos.

31.29 ¿Podría el proceso mostrado en la figura 31.12 aplicarse también a formas de partes diferentes de las redondas? Explique su respuesta y dé ejemplos específicos.

31.30 ¿Qué aplicaciones serían adecuadas para el proceso de soldadura por puntos por rodillos mostrado en la figura 31.11?

31.31 Investigue en la bibliografía técnica disponible sobre soldadura por fricción y elabore una tabla de los metales similares y disímiles, así como de los materiales no metálicos que se pueden soldar por fricción.

31.32 ¿Podrían fabricarse las partes soldadas por proyección y mostradas en la figura 31.13 por cualquiera de los procesos descritos en otros capítulos de este libro? Explique su respuesta.

31.33 Explique la diferencia entre la soldadura de costura por resistencia y la soldadura por resistencia por puntos.

31.34 En relación con la figura 14.11b, ¿se podría utilizar alguno de los procesos descritos en los capítulos 30 y 31 para fabricar un perno largo soldando la cabeza al zanco? Explique las ventajas y limitaciones de este método.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

31.35 Se están soldando por puntos dos láminas planas de cobre (de 1.5 mm de espesor cada una), utilizando una corriente de 7000 A y un tiempo de flujo de la corriente de 0.3 s. Los electrodos tienen 5 mm de diámetro. Calcule el calor generado en la zona de soldadura. Suponga que la resistencia es 200 $\mu\Omega$.

31.36 Calcule la elevación de temperatura en el problema 31.35, suponiendo que el calor generado se confina al volumen del material, directamente entre los dos electrodos redondos, y la temperatura se distribuye de manera uniforme.

31.37 Calcule el intervalo de corrientes permisibles para el problema 31.35 si la temperatura debiera estar entre 0.7 y 0.85 veces la temperatura de fusión del cobre. Repita este problema para el acero al carbono.

31.38 La energía aplicada en la soldadura por fricción está dada por la fórmula $E = IS^2/C$, donde I es el momento de inercia del volante, S la velocidad del husillo en rpm y C una constante de proporcionalidad (5873, cuando el momento de inercia está dado en libras-pie^2). Para una velocidad del husillo de 600 rpm y una operación en la que se suelda tubo de acero (de 3.5 pulgadas de DE y

0.25 pulgada de espesor de pared) a una estructura plana, ¿cuál es el momento de inercia requerido en el volante si toda la energía se utiliza para calentar la zona de soladura (alrededor de $\frac{1}{4}$ de pulgada de profundidad y directamente debajo del tubo)? Suponga que se necesita 1.4 pies-lbm para fundir el electrodo.

31.39 Se sabe que la energía requerida en la soldadura ultrasónica se relaciona con el producto del espesor y la dureza de la pieza de trabajo. Explique por qué existe esta relación.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

31.40 Explique cómo fabricaría las estructuras mostradas en la figura 31.19 mediante métodos diferentes de la unión por difusión y formado superplástico.

31.41 Comente el tamaño de la pieza de trabajo y las limitaciones de forma (en su caso) para cada uno de los procesos descritos en este capítulo.

31.42 Describa las formas de las partes que no se pueden unir mediante los procesos descritos en este capítulo. Dé ejemplos específicos.

31.43 Elabore una tabla en la que se den las velocidades de soldadura (en función de los parámetros relevantes) para los procesos descritos en los capítulos 30 y 31. Comente sus observaciones.

31.44 Haga una descripción completa de este capítulo; incluya diagramas de posibles diseños de uniones soldadas (distintas de las que ya se proporcionaron) y de sus aplicaciones en ingeniería. Dé ejemplos específicos para cada tipo de unión.

31.45 Mediante una lupa, inspeccione la sección transversal de monedas (como las de 5 y 10 centavos de dólar estadounidense) y comente sus observaciones.

31.46 En las pruebas de soldadura por puntos, ¿cuál sería la razón para que fallara la soldadura en los lugares mostrados en la figura 31.10?

31.47 Describa los métodos que utilizaría para retirar las rebabas de las soldaduras, como las mostradas en la figura 31.3. ¿Cómo automatizaría estos métodos para obtener tasas de producción elevadas?

31.48 Para cada una de las operaciones descritas en este capítulo, elabore un cartel en el que se den instrucciones efectivas y concisas para las prácticas de seguridad en la soldadura. Consulte diversas publicaciones del Nacional Safety Council (de Estados Unidos) y organizaciones similares.

31.49 En el proceso de unión por laminación mostrado en la figura 31.1, ¿cómo haría para asegurar que las interfaces están limpias y no tienen contaminantes para que se desarrolle una buena unión? Explique su respuesta.

31.50 Revise varios contenedores metálicos para productos domésticos y alimentos y bebidas. Identifique aquellos en los que se haya utilizado alguno de los procesos descritos en este capítulo. Describa sus observaciones.

31.51 Analice diversos procesos que se pueden utilizar para sujetar tubos a las placas cabezales de las calderas.

31.52 Describa diseños de partes que no se puedan unir mediante alguno de los procesos de soldadura por fricción descritos en este capítulo.

31.53 Inspeccione la carrocería de lámina metálica de un automóvil y comente el tamaño y la frecuencia de los puntos de soldadura aplicados. ¿Cómo haría para calcular el número de soldaduras?

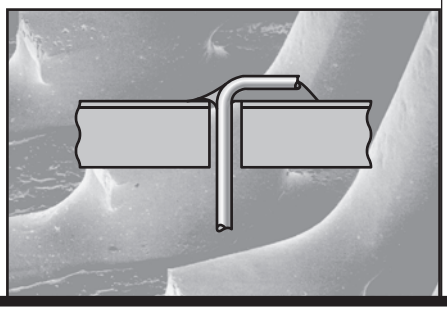
31.54 El material Alclad se fabrica con aleación de aluminio 5182 y tiene ambos lados recubiertos con una delgada capa de aluminio puro. El 5182 proporciona alta resistencia, mientras que las capas exteriores de aluminio puro proporcionan buena resistencia a la corrosión debido a su capa estable de óxido. Por esa razón el Alclad suele utilizarse en aplicaciones estructurales aeroespaciales. Investigue otros materiales comunes unidos por laminación y sus usos, y elabore una tabla resumen.

31.55 Investigue en Internet acerca de las máquinas existentes para soldadura por puntos, sus capacidades y sus costos. Describa sus observaciones.

31.56 ¿Qué tipo de aplicaciones podrían tener las estructuras mostradas en la figura 31.19b y c? Explique su respuesta.

Procesos de soldadura fuerte, blanda, unión con adhesivos y sujeción mecánica

CAPÍTULO 32



En este último capítulo de uniones se describen diversos procesos de unión, adhesión y sujeción que comprenden mecanismos diferentes a los presentados en los dos capítulos anteriores. Los temas específicos que se cubren son:

- Soldadura fuerte, soldadura blanda y sus aplicaciones.
- El uso de adhesivos para unir materiales.
- Métodos de sujeción mecánica, particularmente el uso de tornillos y remaches.
- Métodos para unir termoplásticos, termofijos, cerámicos y vidrios.
- Economía de estos procesos de unión.

32.1 Introducción 1003
32.2 Soldadura fuerte 1004
32.3 Soldadura blanda 1009
32.4 Unión con adhesivos 1014
32.5 Sujeción mecánica 1023
32.6 Unión de plásticos, cerámicos y vidrios 1027
32.7 Economía de las operaciones de unión 1030

EJEMPLO:

32.1 Soldadura blanda de los componentes en una tarjeta de circuitos impresos 1012

ESTUDIO DE CASO:

32.1 Curado mediante luz de adhesivos acrílicos para productos médicos 1020

32.1 Introducción

En la mayoría de los procesos de unión descritos en los capítulos 30 y 31, las superficies de contacto de los componentes se calentaban a temperaturas elevadas por diversos medios externos o internos para producir fusión o adhesión en la unión. ¿Qué pasaría si se quisiera unir materiales que no pueden soportar altas temperaturas, como los componentes electrónicos? ¿Y si las partes unidas fueran delicadas, complejas o se hubieran fabricado con dos o más materiales de características, propiedades, tamaños, espesores y secciones transversales muy diferentes?

En este capítulo primero se describen dos procesos de unión, *soldadura fuerte* y *soldadura blanda*, que requieren temperaturas inferiores a las de la soldadura. Los metales de aporte se colocan o alimentan en la unión y se funden utilizando una fuente de calor externa. Al solidificarse, se obtiene una unión resistente. Las soldaduras fuerte y blanda se distinguen arbitrariamente por la temperatura. Las temperaturas de la soldadura blanda son inferiores a las de la fuerte y la resistencia de una unión por soldadura blanda es mucho menor.

También se describen los principios y tipos de *uniones con adhesivos*. El método antiguo de unión de partes con pegamentos de origen animal (por lo general, empleados en el encuadernado, etiquetado y empaque) se ha desarrollado como una técnica de unión importante de materiales metálicos y no metálicos. Este proceso tiene grandes

aplicaciones en numerosos productos de consumo e industriales, así como en las industrias aérea y aeroespacial. Los materiales que van a unirse (como los termoplásticos, termofijos, cerámicos y vidrios), ya sea entre ellos mismos o con otros materiales, presentan diversos desafíos.

Aunque todas las uniones descritas hasta ahora son de naturaleza permanente, en muchas aplicaciones los componentes unidos tienen que separarse para reemplazo, mantenimiento, reparación o ajuste. ¿Cómo se separa un producto sin destruir la unión? Si se necesitan uniones no permanentes, pero que sean tan resistentes como las uniones soldadas, la solución obvia consiste en utilizar *sujeciones mecánicas*, como el uso de pernos, tornillos, tuercas u otros sujetadores. También se describen las ventajas y limitaciones de estas técnicas.

32.2 Soldadura fuerte

La *soldadura fuerte* es un proceso de unión en el que un metal de aporte se coloca entre las superficies de empalme a unirse (o en su periferia) y la temperatura se eleva lo suficiente para fundir dicho metal, pero no los componentes (metal base), como sería el caso de la soldadura por fusión. Por lo tanto, la soldadura fuerte es un proceso de unión de estados líquido y sólido. Una vez que el metal de aporte se enfría y solidifica, se obtiene una unión resistente. Los metales de aporte utilizados para soldadura fuerte suelen fundirse arriba de 450 °C (840 °F), lo que está por debajo del punto de fusión (*temperatura de solidus*) de los metales a unir (por ejemplo, ver fig. 4.5). El concepto *soldadura fuerte* proviene del término *latón* (un vocablo arcaico que significa "endurecer") y se usó por primera vez entre los años 3000 y 2000 a.C.[N. del R.T] En la figura 32.1 se muestran aplicaciones típicas de la soldadura fuerte.

N. del R.T El término original es brass cuyo significado arcaico es "endurecer".

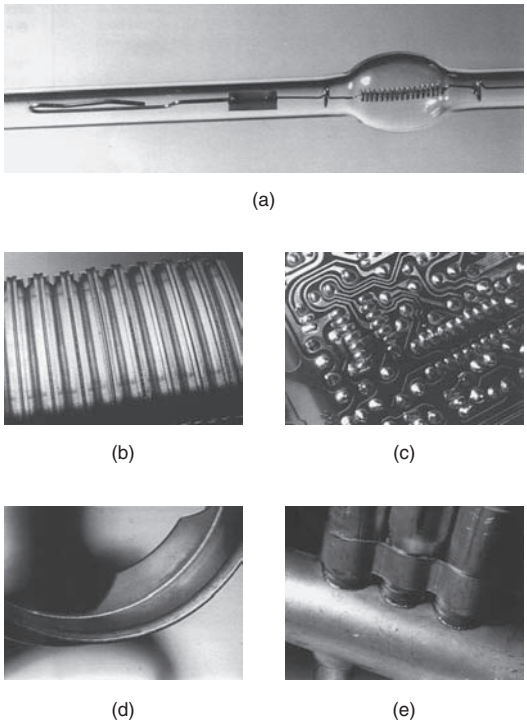


FIGURA 32.1 Ejemplos de partes unidas por soldaduras fuerte y blanda. *(a)* Filamento de bombilla de resistencia unido por soldadura fuerte; *(b)* intercambiador de calor de radiador unido por soldadura fuerte; *(c)* tarjeta de circuitos unida por soldadura blanda; *(d)* alojamiento de anillo unido por soldadura fuerte, y *(e)* intercambiador de calor unido por soldadura fuerte. *Fuente*: Cortesía de Edison Welding Institute.

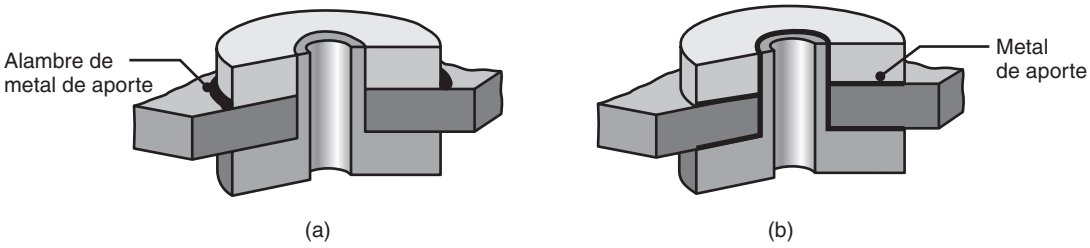


FIGURA 32.2 Ejemplo de soldadura fuerte en horno: *(a)* antes, y *(b)* después de la soldadura fuerte. El metal de aporte es un alambre moldeado y pasa al interior de las interfaces por la acción capilar con la aplicación de calor.

En una operación común de soldadura fuerte, se coloca un alambre metálico de aporte (fuerte) a lo largo de la periferia de los componentes a unir (fig. 32.2a). Se aplica calor por diversos medios externos, se funde el metal fuerte y rellena (por la acción *capilar*) el espacio en las interfaces, que se ajusta de manera estrecha (holgura de la unión) (fig. 32.2b).

En la **soldadura fuerte con oxigás** el metal de aporte (por lo general, latón) se deposita en la unión con una técnica similar a la soldadura con oxígeno y combustible gaseosos (ver fig. 30.1d). La diferencia principal es que el metal base no se funde. Su aplicación principal es el trabajo de reparación de aceros y hierros fundidos. Debido a los espacios más amplios que hay entre los componentes que se sueldan (como en la soldadura con oxígeno y combustible gaseosos), se utiliza más metal de soldadura fuerte que en la soldadura fuerte convencional.

En general, los metales disímiles se pueden ensamblar con buena resistencia de unión. En la figura 32.3 se muestran ejemplos de uniones realizadas. Es posible unir con rapidez formas complejas, livianas y con poca distorsión.

Metales de aporte. Existen diversos metales de aporte (*metales de soldadura fuerte*) con una gama de temperaturas de soldadura fuerte (tabla 32.1). Obsérvese que, a diferencia de los de las operaciones de soldadura, los metales de aporte para soldadura fuerte por lo general tienen una composición muy diferente de la de los metales a unir. Se encuentran en varias formas, como alambre, varilla, anillos, cuñas y limaduras. La selec-

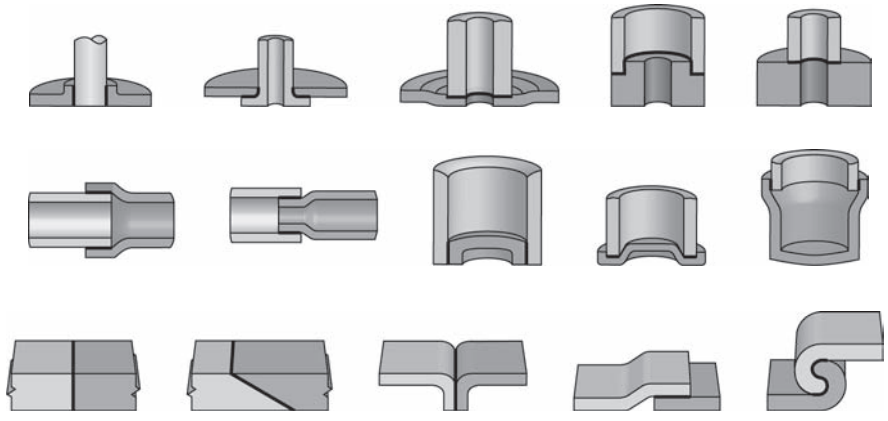


FIGURA 32.3 Diseños de unión comúnmente utilizados en operaciones de soldadura fuerte. La holgura entre las dos partes que se están soldando es un factor importante en la resistencia de la unión. Si la holgura es demasiado pequeña, el metal fuerte fundido no penetra totalmente la interfaz. Si es demasiado grande, habrá acción capilar insuficiente para que el metal fundido llene la interfaz.

TABLA 32.1

Metales de aporte comunes para la soldadura fuerte de diversos metales y aleaciones

Metal base	Metal de aporte	Temperatura de soldadura fuerte (°C)
Aluminio y sus aleaciones	Aluminio-silicio	570–620
Aleaciones de magnesio	Magnesio-aluminio	580–625
Cobre y sus aleaciones	Cobre-fósforo	700–925
Ferrosos y no ferrosos (excepto aluminio y magnesio)	Aleaciones de plata y cobre, cobre-fósforo	620–1150
Aleaciones de bases hierro, níquel y cobalto	Oro	900–1100
Aceros inoxidables, aleaciones de bases níquel y cobalto	Níquel-plata	925–1200

ción del tipo de metal de aporte y su composición son importantes para evitar la *fragilización* de la unión por *(a)* penetración de metal líquido en los límites del grano, como se indica en la sección 1.4.2; *(b)* formación de *compuestos frágiles intermetálicos* en la unión, como se indica en la sección 4.2.2, y *(c) corrosión galvánica* en la unión.

Debido a la difusión entre el metal de aporte y el metal base, las propiedades mecánicas y metalúrgicas de la unión pueden cambiar en un procesamiento posterior, o durante la vida de servicio de la parte unida por soldadura fuerte. Por ejemplo, al soldar titanio con estaño puro como metal de aporte, es posible que el estaño se difunda por completo en el metal base de titanio al someterse a envejecimiento o a tratamiento térmico posterior. Por consiguiente, la unión desaparece.

Fundentes. En la soldadura fuerte, el uso de un *fundente* es fundamental para evitar la oxidación y retirar películas de óxido de las superficies de la pieza de trabajo. Por lo general, los fundentes de soldadura fuerte se producen con bórax, ácido bórico, boratos, fluoruros y cloruros. También se pueden agregar *agentes humectantes* para mejorar las características de humectación del metal de aporte fundido y la acción capilar.

Es fundamental que las superficies a soldar estén limpias y no tengan óxido, aceite y otros contaminantes para *(a)* obtener una humectación y propagación adecuadas del metal de aporte fundido en la unión, y *(b)* desarrollar una resistencia máxima en la unión. También se puede utilizar un chorro de granalla a fin de mejorar el acabado superficial de empalme para aplicar la soldadura fuerte. Debido a que son corrosivos, los fundentes deben retirarse tras la soldadura, por lo general lavándolos con agua caliente.

Resistencia de la unión soldada. La resistencia de la unión soldada depende *(a)* de la holgura de la unión; *(b)* del área de la unión, y *(c)* de la naturaleza de la adhesión en las interfaces entre los componentes y el metal de aporte. Por lo general, las holguras de la unión van de 0.025 mm a 0.2 mm (0.001 a 0.008 pulgada). Como se muestra en la figura 32.4, cuanto más pequeño es el espacio, mayor será la *resistencia cortante* de la unión. La resistencia cortante de las uniones soldadas puede alcanzar 800 MPa (120 ksi) mediante aleaciones de soldadura fuerte que contienen plata (*soldadura de plata*). Además, existe una separación óptima para lograr la máxima *resistencia a la tensión*.

Debido a que las holguras son muy pequeñas, la rugosidad superficial de las superficies de contacto se vuelve importante. Las superficies a unir por soldadura fuerte deben limpiarse química o mecánicamente para asegurar una acción capilar total. En consecuencia, también es importante el uso de un fundente.

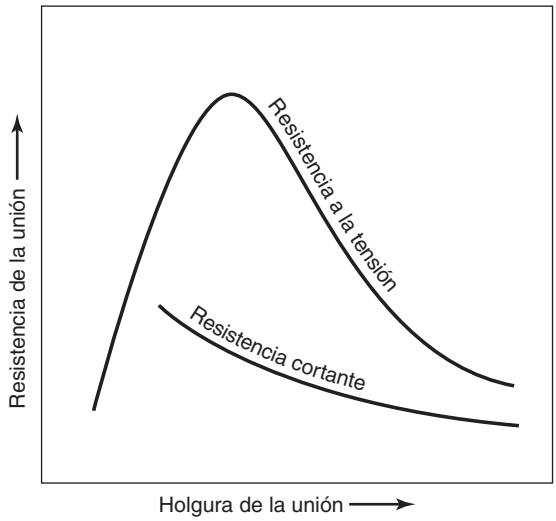


FIGURA 32.4 Efecto de la holgura de la unión sobre la resistencia a la tensión y cortante de uniones soldadas. Obsérvese que a diferencia de la resistencia a la tensión, la resistencia cortante disminuye continuamente al aumentar la holgura.

32.2.1 Métodos de soldadura fuerte

Los métodos de calentamiento utilizados en la soldadura fuerte también sirven para identificar los diversos procesos, como se describe a continuación.

Soldadura fuerte con soplete. La fuente de calor en la *soldadura fuerte con soplete* (TB, por sus siglas en inglés) es gas de oxiacetileno con una flama de carburante (ver fig. 30.1c). La soldadura fuerte se realiza primero calentando la unión con el soplete y después depositando la varilla o alambre de soldadura fuerte en la unión. Por lo general, los espesores adecuados de la parte son de 0.25 mm a 6 mm (0.01 a 0.25 pulgada). La soldadura fuerte con soplete es difícil de controlar y requiere mano de obra experta; sin embargo, puede automatizarse como proceso de producción utilizando sopletes múltiples. Este proceso también se puede usar para trabajos de reparación.

Soldadura fuerte en horno. En una *soldadura fuerte en horno* (FB, por sus siglas en inglés), primero se limpian las partes y se cargan previamente con la soldadura en las configuraciones apropiadas; después se coloca el ensamble en un horno, en el que se calienta de manera uniforme. Los hornos pueden ser tipo lote, para formas complejas, o de tipo continuo, para líneas de producción grandes, en particular para partes pequeñas con diseños simples de unión. Para metales que reaccionan con el ambiente se utilizan hornos al vacío o de atmósferas controladas. No se requiere mano de obra calificada y se pueden soldar formas complejas porque todo el ensamble se calienta de modo uniforme en el horno.

Soldadura fuerte por inducción. La fuente de calor en la *soldadura fuerte por inducción* (IB, por sus siglas en inglés) es el calentamiento por inducción por CA de alta frecuencia. Las partes se cargan previamente con metal de aporte y se colocan junto a las bobinas de inducción para calentarlas con rapidez. Por lo general, se utilizan fundentes, a menos que se use una atmósfera protectora (neutra). Los espesores de las partes suelen ser menores de 3 mm (0.125 pulgada). La soldadura fuerte por inducción es apropiada sobre todo para soldar partes de manera continua (fig. 32.5).

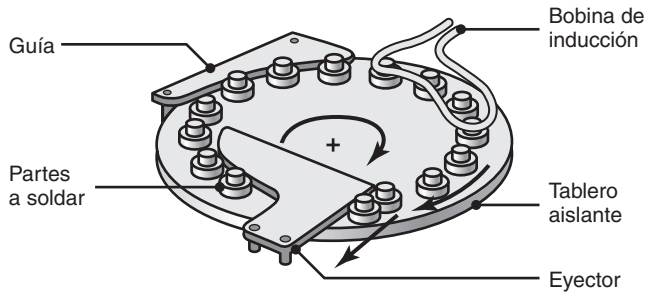


FIGURA 32.5 Esquema de la preparación de la soldadura fuerte por inducción continua para aumentar la productividad.

Soldadura fuerte por resistencia. En la *soldadura fuerte por resistencia* (RB, por sus siglas en inglés), la fuente de calor es la resistencia eléctrica de los componentes a soldar. En este método se utilizan electrodos, como se hace en la soldadura por resistencia. Las partes se cargan de modo previo con metal de aporte o se alimentan de manera externa con el metal durante la soldadura. Las partes comúnmente soldadas tienen espesores de 0.1 mm a 12 mm (0.004 a 0.5 pulgada). Como en la soldadura fuerte por inducción el proceso es rápido, las zonas de calentamiento se pueden confinar en áreas muy pequeñas y es posible automatizar el proceso para producir con una calidad confiable y uniforme.

Soldadura fuerte por inmersión. La *soldadura fuerte por inmersión* (DB, por sus siglas en inglés) se efectúa sumergiendo los ensambles a soldar en un baño de metal de aporte fundido, o un baño de sales fundidas (sección 4.12) a una temperatura apenas arriba del punto de fusión del metal de aporte, por lo que las superficies de todos los componentes se recubren con este metal. En consecuencia, la soldadura por inmersión en baño de metal se utiliza comúnmente para partes pequeñas (como láminas, alambres y accesorios) que suelen tener menos de 5 mm (0.2 pulgada) de espesor o diámetro. Los baños de sales disueltas (que también actúan como fundentes) se usan en ensambles complejos de diversos espesores. Dependiendo del tamaño de las partes y el tamaño del baño, pueden realizarse hasta 1000 uniones simultáneas mediante soldadura fuerte por inmersión.

Soldadura fuerte infrarroja. La fuente de calor en la *soldadura fuerte infrarroja* (IRB, por sus siglas en inglés) es una lámpara de cuarzo de alta intensidad. Este proceso es apropiado en particular para soldar componentes muy pequeños, por lo general menores de 1 mm (0.04 pulgada) de espesor, incluyendo estructuras de panal (sección 16.12). La energía radiante se enfoca en la unión y la soldadura fuerte se puede realizar en vacío. También es posible utilizar *calentamiento con microondas*.

Soldadura fuerte por difusión. La *soldadura fuerte por difusión* (DFB, por sus siglas en inglés) se realiza en un horno en el que (con control adecuado de temperatura y tiempo) el metal de aporte se difunde en las superficies de unión de los componentes a unir. El tiempo de soldadura fuerte requerido puede ser de 30 minutos a 24 horas. Este proceso se utiliza para uniones fuertes traslapadas o a tope y para operaciones de difícil unión. Debido a que la velocidad de difusión en la interfaz no depende del espesor de los componentes, los espesores de las partes pueden ser desde lámina delgada hasta de 50 mm (2 pulgadas).

Haces de alta energía. Para aplicaciones especiales y de gran precisión, y con metales y aleaciones de alta temperatura, se puede utilizar el calentamiento con *haces de electrones* o *rayos láser*.

Soldadura fuerte por oxígeno y gas combustible. La unión en la *soldadura fuerte por oxígeno y gas combustible* se prepara como se hace en la soldadura por fusión (ver capítulo 30). Aunque se utiliza un soplete de oxiacetileno con una flama oxidante, el metal de aporte se deposita en la unión en lugar de hacerlo por acción capilar. Como resultado, se usa considerablemente más metal de aporte que en la soldadura fuerte. Sin

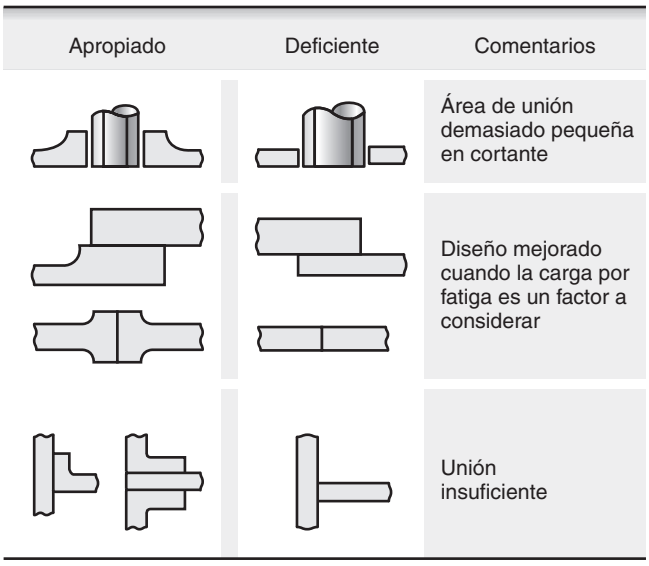


FIGURA 32.6 Ejemplos de diseño apropiado y deficiente de soldadura fuerte. *Fuente*: American Welding Society.

embargo, las temperaturas en la soldadura fuerte por oxígeno y gas combustible por lo general son inferiores a las de la soldadura por fusión y la distorsión de las partes es mínima. El uso de fundente es fundamental en este proceso. El uso principal de la soldadura fuerte por oxígeno y gas combustible es para trabajos de mantenimiento y reparación, como en las fundiciones ferrosas y los componentes de acero, aunque este proceso también se puede automatizar para producción en masa.

32.2.2 Diseño de la soldadura fuerte

Como en todos los procesos de unión, el *diseño de uniones* es importante en la soldadura fuerte. En la figura 32.6 se proporcionan algunos lineamientos de diseño. Las uniones resistentes requieren un área de contacto más grande para soldadura fuerte que para soldadura convencional. Pueden necesitarse varios accesorios especiales para mantener las partes unidas durante la soldadura fuerte; algunas tienen elementos para considerar la dilatación térmica y la contracción durante la operación.

32.3 Soldadura blanda

En la *soldadura blanda*, el metal de aporte (conocido como **aleaciones para soldadura blanda**) se funde a una temperatura relativamente baja. Como en la soldadura fuerte, la aleación para soldadura blanda rellena la unión por la acción capilar entre los componentes que se ajustan o colocan de manera estrecha. Características importantes de las aleaciones para soldadura blanda son la baja tensión superficial y la alta capacidad de humectación. Por lo general, las fuentes de calor para la soldadura blanda son cautines, sopletes u hornos. Su aplicación con aleaciones de cobre-oro y estaño-plomo se practicaba desde los años 4000 a 3000 a.C. El término "soldadura" deriva del latín *solidare*, que significa "volver sólido".

32.3.1 Tipos de aleaciones y fundentes para soldadura blanda

Las aleaciones para soldadura blanda se funden a una temperatura que es el *punto eutéctico* de dichas aleaciones (ver fig. 4.7). Tradicionalmente, las aleaciones para soldadura blanda han sido aleaciones de estaño-plomo en diversas proporciones. Por ejemplo, una aleación de 61.9% de Sn-38.1% de Pb la composición se funde a 188 °C (370 °F), en tanto que el estaño se funde a 232 °C (450 °F) y el plomo a 327 °C (621 °F). Para aplicaciones especiales y resistencia superior de la unión (en particular a temperaturas eleva-

TABLA 32.2

Tipos de aleaciones de soldadura blanda y sus aplicaciones	
Estaño-plomo	Propósito general
Estaño-zinc	Aluminio
Plomo-plata	Resistencia a temperaturas superiores a la ambiente
Cadmio-plata	Resistencia a altas temperaturas
Zinc-aluminio	Aluminio, resistencia a la corrosión
Estaño-plata	Electrónica Estaño-bismuto Electrónica

das), otras composiciones de aleaciones para soldadura blanda son las aleaciones de estaño-zinc, plomo-plata, cadmio-plata y zinc-aluminio (tabla 32.2).

Debido a la toxicidad del plomo y sus efectos adversos sobre el medio ambiente, a menudo se desarrollan **aleaciones sin plomo** y, en la actualidad, su uso es más amplio. Entre los diversos materiales posibles se encuentran las aleaciones eutécticas de plata, indio y bismuto, en combinación con el estaño. Tres composiciones comunes son 96.5% de Sn-3.5% de Ag, 42% de Sn-58% de Bi, y 48% de Sn-52% de In. Sin embargo, ninguna de estas combinaciones es apropiada para todas las aplicaciones.

En la soldadura blanda se utilizan **fundentes** para los mismos propósitos que en la soldadura convencional y la soldadura fuerte, como se indica en la sección 32.2. Por lo general, los fundentes para soldadura blanda son de dos tipos:

1. *Ácidos o sales inorgánicas*, como soluciones de cloruro de zinc y amonio que limpian la superficie con rapidez. Después de efectuar la soldadura blanda, deben retirarse los residuos del fundente lavando por completo la unión con agua para evitar la corrosión.
2. *Fundentes de base resina* no corrosivos utilizados en aplicaciones eléctricas.

32.3.2 Soldabilidad blanda

La *soldabilidad blanda* se puede definir de manera similar a la soldabilidad convencional (sección 30.9.2). Se han desarrollado fundentes especiales para mejorar la soldabilidad blanda de muchos metales y aleaciones. Como guía general: *(a)* el cobre, la plata y el oro se sueldan con facilidad; *(b)* el hierro y el níquel son más difíciles de soldar; *(c)* el aluminio y los aceros inoxidables se sueldan con dificultad debido a sus delgadas y resistentes películas de óxido; *(d)* el titanio, magnesio, los hierros fundidos y los aceros, así como los cerámicos y el grafito, se pueden soldar si se electrodepositan primero con elementos metálicos apropiados que induzcan la adhesión interfacial. Este método es similar al utilizado para unir carburos y cerámicos (ver sección 32.6.3). Un ejemplo común de este método es la *hojalata*, hoja de acero recubierta con estaño que facilita la soldadura. La hojalata es un material común usado en la fabricación de latas para alimentos.

32.3.3 Técnicas de soldadura blanda

Algunas técnicas de soldadura blanda son similares a los métodos de soldadura fuerte, como:

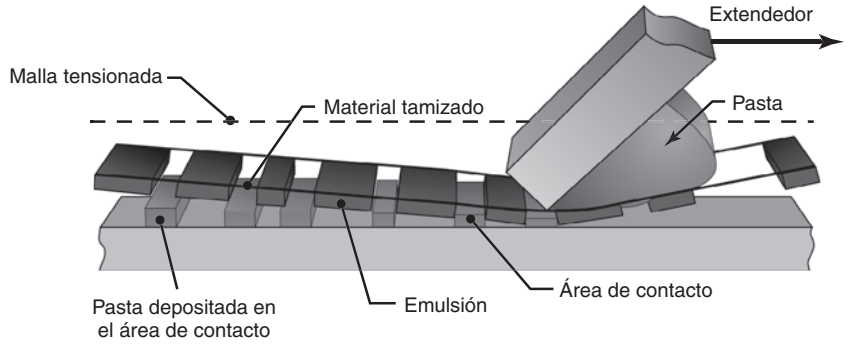
Soldadura blanda con soplete (TS, por sus siglas en inglés)
Soldadura blanda en horno (FS, por sus siglas en inglés)
Soldadura blanda con cautín (INS, por sus siglas en inglés) (con el uso de un cautín de soldadura blanda)
Soldadura blanda por inducción (IS, por sus siglas en inglés)
Soldadura blanda por resistencia (RS, por sus siglas en inglés)
Soldadura blanda por inmersión (DS, por sus siglas en inglés)
Soldadura blanda infrarroja (IRS, por sus siglas en inglés)

Otras técnicas de soldadura blanda son:

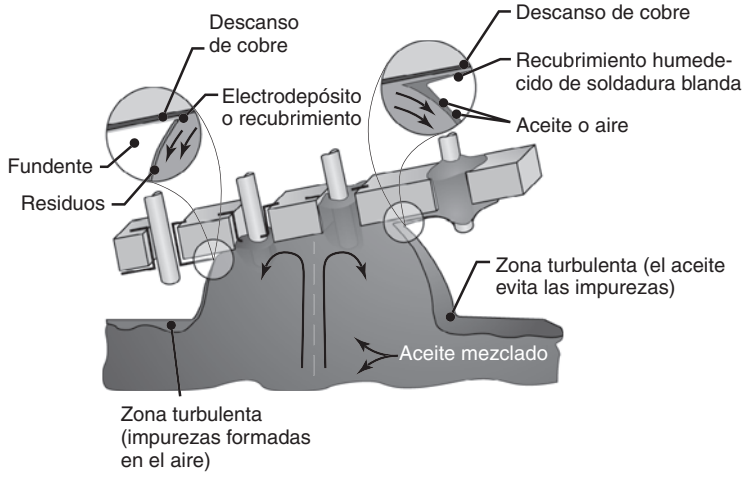
Soldadura blanda ultrasónica (en la que un transductor somete la soldadura blanda fundida a cavitación ultrasónica. Esta acción retira las películas de óxido de las superficies a unir y elimina así la necesidad de un fundente, de ahí el término *soldadura blanda sin fundente*).
Soldadura con pasta o de reflujo (**RS**, por sus siglas en inglés).
Soldadura con olas (**WS**, por sus siglas en inglés).

Las últimas dos técnicas de soldadura blanda son muy diferentes a los otros métodos de soldadura y se utilizan ampliamente para unir y empacar en la *tecnología de montaje de superficie*, como se indica en la sección 28.11. En las siguientes secciones se describen de manera más detallada.

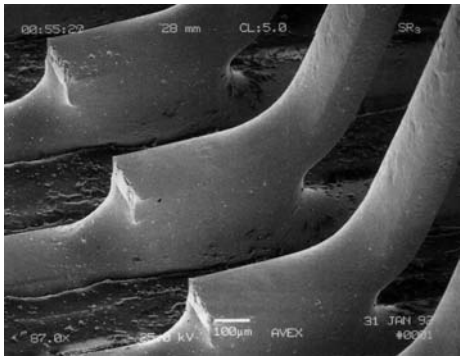
Soldadura con pasta. Las *pastas de soldadura* son partículas metálicas de aleaciones que se mantienen unidas por el fundente, agentes aglutinantes y humectantes. Las pastas son de consistencia semisólida y se caracterizan por su alta viscosidad, pero tienen la capacidad de mantener una forma sólida por periodos relativamente largos. La pasta se coloca de manera directa en la unión o en objetos planos para detalle más fino y se puede aplicar mediante un proceso de *tamizado* o *estarcido*, como se muestra en la figura 32.7a. El



(a)



(b)



(c)

FIGURA 32.7 *(a)* Tamizado de pasta de soldadura blanda en una tarjeta de circuitos impresos en soldadura con pasta. *(b)* Esquema del proceso de soldadura con olas. *(c)* Imagen SEM de unión sometida a soldadura con olas en un dispositivo de montaje de superficie. *Fuente*: *(a)* V. Solberg.

estarcido se utiliza muy comúnmente durante la sujeción de componentes eléctricos a las tarjetas de circuitos impresos. Un beneficio adicional de la soldadura con pasta es que la tensión superficial de la pasta ayuda a mantener los empaques de montaje de superficie alineados en sus placas; esta característica mejora la confiabilidad de las uniones de soldadura.

Una vez colocada la pasta y ensamblada la unión, la pasta se calienta en un horno y ocurre la soldadura. En la soldadura con pasta, el producto se calienta en forma controlada de modo que ocurre la siguiente secuencia de eventos:

1. Se evaporan los solventes que hay en la pasta.
2. Se activa el fundente en la pasta y ocurre la acción de fundido.
3. Los componentes se precalientan cuidadosamente.
4. Se funden las partículas de soldadura blanda y humedecen la unión.
5. Se enfría el ensamble a baja velocidad para evitar el choque térmico y la fractura de la unión de la soldadura blanda.

Aunque dicho proceso parece ser directo, existen diversas variables del proceso para cada etapa y debe mantenerse buen control sobre las temperaturas y exposiciones en cada etapa a fin de garantizar la resistencia apropiada de la unión.

Soldadura con olas. La *soldadura con olas* es una técnica muy común para sujetar componentes de circuitos a sus tarjetas (ver sección 28.11). Para entender el principio de la soldadura con olas, es imperativo observar que la soldadura blanda fundida no humedece todas las superficies. De hecho, la soldadura blanda no se adhiere a la mayoría de las superficies de polímero y es fácil de remover mientras está fundida. Además, como se puede observar con un simple cautín manual de soldadura blanda, la aleación humedece superficies metálicas y forma una buena unión sólo cuando el metal se precalienta a cierta temperatura. Por lo tanto, la soldadura con olas requiere aplicación de fundente y operaciones de calentamiento por separado antes de poder concluirla con éxito.

En la figura 32.7b se muestra una operación común de soldadura con olas. Una bomba genera una ola laminar alzada de aleación fundida. Después, las tarjetas de circuitos precalentadas y con fundente se pasan sobre la ola. La aleación humedece las superficies metálicas expuestas, pero no permanece adherida al empaque de polímero de los circuitos integrados ni se pega a las tarjetas de circuitos con recubrimiento de polímero. Una *cuchilla de aire* (que es básicamente un chorro de aire caliente a alta velocidad) sopla el exceso de soldadura blanda de la unión para evitar que se puentee entre terminales adyacentes.

Cuando se van a someter a soldadura con olas, los empaques de montaje de superficie deben unirse con adhesivos a la tarjeta de circuitos antes de comenzar la soldadura blanda. Por lo general, esta unión se realiza *(a)* tamizando o estarciendo epóxico sobre las tarjetas; *(b)* colocando los componentes en los lugares apropiados; *(c)* curando el epóxico; *(d)* invirtiendo la tarjeta, y *(e)* realizando la soldadura con olas. En la figura 32.7c se muestra una fotografía de microscopio electrónico de barrido (SEM) de una unión común con montaje superficial.

EJEMPLO 32.1 Soldadura blanda de los componentes en una tarjeta de circuitos impresos

Las industrias de computación y electrónica de consumo colocan demandas extremadamente altas de componentes electrónicos. Se espera que los circuitos integrados y otros dispositivos electrónicos funcionen de manera confiable por periodos prolongados, durante los cuales se pueden someter a variaciones significativas de temperatura y a vibración. En reconocimiento de este requisito, es fundamental que las uniones con aleaciones de soldadura blanda utilizadas para sujetar dichos dispositivos a las tarjetas de circuitos sean lo suficientemente resistentes y confiables, y también que las uniones de soldadura blanda se apliquen con extrema rapidez y con equipo automatizado.

Una tendencia continua en las industrias de computación y electrónica de consumo se enfoca en la reducción de tamaños de los chips y la compactación creciente de las tarjetas de circuitos. Se logra más ahorro de espacio montando circuitos integrados en los empaques de montaje de superficie, que permiten el empaque más ajustado en una tarjeta de circuitos y (más importante) el montaje de componentes en ambos lados de una tarjeta de circuitos.

Cuando una tarjeta de circuitos impresos tiene circuitos de montaje superficial y en línea en la misma tarjeta, surge un problema desafiante y conviene soldar todas las uniones mediante un proceso automatizado confiable. Cabe reconocer un punto delicado: debe restringirse la inserción de todos los circuitos en línea a un solo lado de la tarjeta. De hecho, no existe un requisito de desempeño que dicte lo contrario y esta restricción simplifica en gran medida la manufactura.

Los pasos básicos en la soldadura blanda de conexiones en una tarjeta son los siguientes (fig. 32.7b y c):

1. Aplicar pasta de soldadura blanda en uno de los lados.
2. Colocar los empaques de montaje superficial en la tarjeta e insertar empaques en línea a través del lado principal de la tarjeta.
3. Efectuar el reflujo de la soldadura plana.
4. Aplicar adhesivo al lado secundario de la tarjeta.
5. Sujetar los dispositivos de montaje superficial en el lado secundario, utilizando el adhesivo.
6. Curar el adhesivo.
7. Efectuar una operación de soldadura con olas en el lado secundario para producir una sujeción eléctrica de los montajes de superficie y los circuitos en línea a la tarjeta.

La pasta de soldadura blanda se aplica con esténciles o tamices atacados químicamente, de manera que la pasta sólo se deposita sobre las áreas designadas de una tarjeta de circuitos (los esténciles se utilizan más para dispositivos de paso fino y producen un espesor de pasta más uniforme). Después se colocan los componentes con circuitos de montaje superficial en la tarjeta y ésta se calienta en un horno a alrededor de 200 °C (400 °F) para efectuar el reflujo de la soldadura blanda y formar conexiones resistentes entre el montaje de superficie y la tarjeta de circuitos.

En este punto, se insertan los componentes con terminales en el lado principal de la tarjeta, las terminales se doblan hacia dentro y se voltea la tarjeta. Se imprime un patrón adhesivo sobre la tarjeta utilizando un punto de epóxico en el centro de la ubicación de un componente de montaje superficial. Después los empaques de montaje superficial se colocan en el adhesivo, por lo general mediante sistemas de control por computadora automatizados, de alta velocidad. Luego se cura el adhesivo, se voltea la tarjeta y se realiza la soldadura con olas.

La operación de soldadura con olas une de manera simultánea los componentes de montaje superficial al lado secundario y suelda las terminales de los componentes en línea al lado principal de la tarjeta. Después, ésta se limpia e inspecciona antes de efectuar las verificaciones electrónicas de calidad.

32.3.4 Aplicaciones y lineamientos de diseño de la soldadura blanda

La soldadura blanda se utiliza ampliamente en la industria electrónica. Debido a que las temperaturas de la soldadura blanda son un tanto bajas, una unión por soldadura blanda tiene uso muy limitado a temperaturas elevadas. Además, ya que las aleaciones de soldadura blanda no tienen mucha resistencia, el proceso no puede usarse para miembros que soporten cargas (o estructurales). Sin embargo, la resistencia de las uniones puede mejorarse de manera significativa mediante *enclavamiento mecánico* de la unión (fig. 32.8).

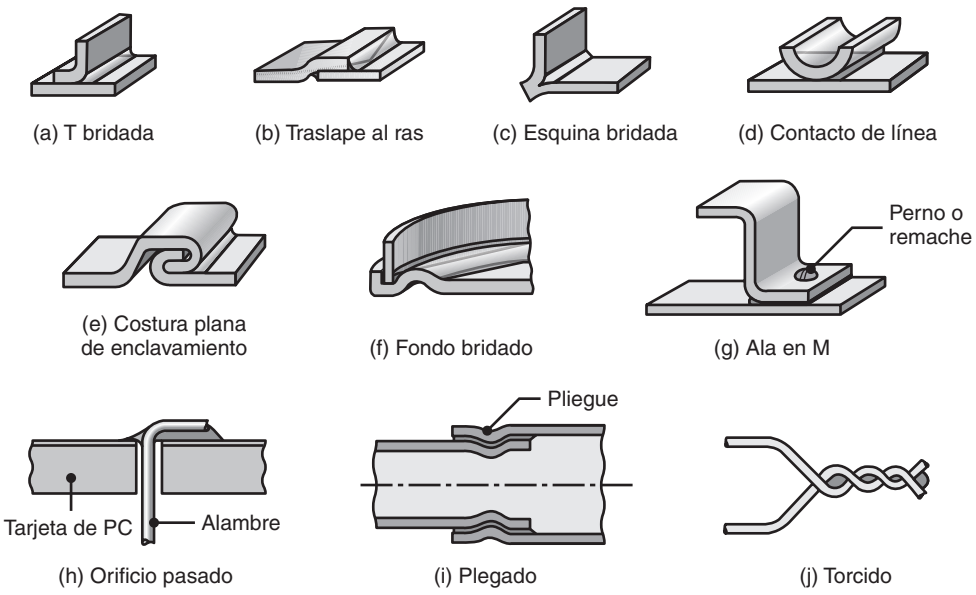


FIGURA 32.8 Diseños de uniones comúnmente utilizadas para soldadura blanda.

La soldadura blanda se puede utilizar para unir diversos metales y espesores. El cobre y los metales preciosos como la plata y el oro son fáciles de soldar. El aluminio y los aceros inoxidables son difíciles de soldar debido a su resistente y delgada película de óxido. Sin embargo, estos y otros metales pueden soldarse con la ayuda de fundentes especiales que modifican las superficies. Aunque las operaciones manuales requieren experiencia y son laboriosas, las velocidades de soldadura blanda pueden ser altas con equipo automatizado.

Los **lineamientos de diseño** para la soldadura blanda son similares a los de la soldadura fuerte. En la figura 32.8 se muestran algunos diseños de unión utilizados con frecuencia. Obsérvese la importancia de las superficies grandes de contacto (debido a la baja resistencia de las aleaciones de soldadura blanda) para desarrollar suficiente resistencia de las uniones en los productos soldados. Por lo general, debido a que en las uniones a tope las superficies de empalme podrían ser pequeñas, raramente se usan las aleaciones de soldadura blanda para este tipo de uniones.

32.4 Unión con adhesivos

Diversas partes y componentes se pueden unir y ensamblar con **adhesivos** en lugar de uno o más de los métodos de unión descritos hasta ahora. La *unión con adhesivos* ha sido un método común de unión y ensamble en aplicaciones como etiquetado, empaque, encuadernado, aditamentos para el hogar y calzado. Desarrollado en 1905, el contrachapado es un ejemplo común de la unión con adhesivos en la que varias capas de madera se unen con pegamento especial.

La unión con adhesivos ha ganado cada vez más aceptación en la manufactura, incluso desde su primer uso a gran escala: el ensamble de componentes de soporte de carga en aeronaves durante la Segunda Guerra Mundial (1939-1945). Existen adhesivos en diversas formas: líquido, pasta, solución, emulsión, polvo, cinta y película. Al aplicarse, los adhesivos suelen tener un espesor aproximado de 0.1 mm (0.004 pulgada).

Para satisfacer los requisitos de una aplicación en particular, un adhesivo puede requerir una o más de las siguientes propiedades (tabla 32.3):

- Resistencia: cortante y al desprendimiento.
- Tenacidad.
- Resistencia a diversos fluidos y productos químicos.

TABLA 32.3

Propiedades y características comunes de los adhesivos estructurales químicamente reactivos

	Epóxico	Poliuretano	Acrílico modificado	Cianoacrilato	Anaeróbico
Resistencia al impacto	Pobre	Excelente	Buena	Pobre	Aceptable
Resistencia a la tensión y cortante, MPa (10^3 psi)	15.4 (2.2)	15.4 (2.2)	25.9 (3.7)	18.9 (2.7)	17.5 (2.5)
Resistencia al desprendimiento, N/m (lbf/pulg)	<525 (3)	14,000 (80)	5250 (30)	<25 (3)	1750 (10)
Máx. temperatura de servicio, °C (°F)	120 (250)	80 (175)	120 (250)	80 (175)	150 (300)

- Resistencia a degradación ambiental, incluyendo calor y humedad.
- Capacidad para humedecer las superficies a unir.

32.4.1 Tipos de adhesivos y sistemas adhesivos

Existen varios tipos de adhesivos y continúan desarrollándose más para proporcionar resistencia adecuada a la unión, incluyendo resistencia a la fatiga (tabla 32.4). Los tres tipos básicos de adhesivos son los siguientes:

1. **Adhesivos naturales**, como almidón, dextrina (una sustancia pegajosa que se obtiene del almidón), harina de soya y productos animales.
2. **Adhesivos inorgánicos,** como silicato de sodio y oxicloruro de magnesio.
3. **Adhesivos orgánicos sintéticos,** que pueden ser termoplásticos (utilizados para uniones no estructurales y algunas estructurales) o polímeros termofijos (usados principalmente para uniones estructurales).

Dada su resistencia, los adhesivos orgánicos sintéticos son los más importantes en los procesos de manufactura, en particular para aplicaciones de soporte de carga. Se clasifican de la siguiente manera:

- **Químicamente reactivos:** poliuretanos, silicios, epóxicos, cianoacrilatos, acrílicos modificados, fenólicos y poliamidas. También se incluyen anaeróbicos, que curan en ausencia de oxígeno, como Loctite® para sujetadores roscados (ver también el estudio de caso 32.1).
- **Sensibles a la presión:** hule natural, hule de estireno-butadieno, hule de butil, hule de nitrilo y poliacrilatos.
- **De fusión en caliente:** termoplásticos (como copolímeros de acetato de etileno-vinil, poliolefinas, poliamidas y poliéster) y elastómeros de termoplásticos.
- **Reactivos por fusión en caliente:** una parte de los termofijos (con base en la química del uretano) con propiedades mejoradas.
- **Evaporativos o por difusión:** vinilos, acrílicos, fenólicos, poliuretanos, hules sintéticos y hules naturales.
- **De película** y **de cinta:** epóxicos de nailon, epóxicos de elastómero, fenólicos de nitrilo, fenólicos vinílicos y poliamidas.
- **De punto retrasado:** copolímeros de estireno-butadieno, acetatos polivinílicos, poliestirenos y poliamidas.
- **Eléctrica y térmicamente conductivos:** epóxicos, poliuretanos, silicones y poliamidas. La conductividad eléctrica se obtiene mediante la adición de cargas o rellenos metálicos, como plata (el más utilizado), cobre, aluminio y oro. Por lo general, los rellenos metálicos que mejoran la conductividad eléctrica de los adhesivos también mejoran su conductividad térmica.

Sistemas adhesivos. Estos se pueden clasificar con base en sus características químicas específicas.

TABLA 32.4

Características generales de los adhesivos

Tipo	Comentarios	Aplicaciones
Acrílico	Termoplástico; fraguado rápido; unión tenaz a temperatura ambiente; dos componentes; buena resistencia a productos químicos solventes e impacto; vida corta de trabajo; oloroso; requiere ventilación.	Uniones tipo sándwich de fibra de vidrio y acero; raquetas de tenis, partes metálicas y plásticos.
Anaeróbico	Termofijo; fácil de utilizar; curado lento; uniones a temperatura ambiente; el curado ocurre en ausencia de aire; no ocurre en las partes en que el aire hace contacto con los adhesivos; un solo componente; y no es bueno en superficies permeables.	Partes para máquinas de ajuste cerrado, como flechas y poleas, tuercas y tornillos, bujes y pasadores.
Epóxico	Termofijo; uno o dos componentes; unión tenaz; el más fuerte de los adhesivos de ingeniería; alta resistencia a la tensión y baja resistencia al desprendimiento; resisten la humedad y alta temperatura; difícil de utilizar.	Partes metálicas, cerámicos y de plásticos rígidos.
Cianocrilato	Termoplástico; fraguado rápido; unión tenaz a temperatura ambiente; fácil de utilizar; incoloro.	"Cola loka®"
Material fundido	Termoplástico; fraguado rápido; uniones rígidas o flexibles; fácil de aplicar; frágil a bajas temperaturas; con base en acetato de vinil-etileno, poliolefinas, poliamidas y poliéster.	Une la mayoría de los materiales. Empaque, encuadernado de libros y uniones de latas metálicas.
Sensible a la presión	Uniones de resistencia variable de termoplásticos; la capa de fondo fija el adhesivo en el dorso del material de respaldo de cintas en rollo (un agente de liberación en la parte posterior del alma permite el desenrollado; se fabrica con esteres de poliacrilato y diversos hules naturales y sintéticos.	Cintas, etiquetas y distintivos adhesivos.
Fenólico	Termofijo; curado en horno; unión resistente; alta resistencia a la tensión y baja resistencia al impacto; frágil; fácil de utilizar; se cura por evaporación de solventes.	Protección acústica, revestimiento de frenos y placas para embragues, unión de granos abrasivos y estructuras de panal.
Silicón	Termofijo; curado lento; flexible; uniones a temperatura ambiente; alta resistencia al impacto y al desprendimiento; similar al hule.	Empaques y selladores.
Formaldehído Urea Melamina Fenol Resorcinol	Termofijo; resistente en uniones de madera; la urea es poco costosa, disponible como polvo o líquido y requiere un catalizador; la melamina es más costosa, se cura con calor y la unión es resistente al agua; el resorcinol forma unión resistente al agua a temperatura ambiente. Se pueden combinar tipos.	Uniones de madera, contrachapado y pegado.
Uretano	Termofijo; uniones a temperatura ambiente, o curado en horno; buenas cualidades para rellenar espacios.	Partes de cuerpos de fibra de vidrio, hule y tejidos.
Base agua Animal Vegetal Hules	Poco costoso, no tóxico, no inflamable.	Madera, papel, tejidos, piel y envolventes de sellado en seco.

- **Sistemas base epóxico:** estos sistemas tienen propiedades de alta resistencia y alta temperatura, hasta de 200 °C (400 °F). Las aplicaciones comunes incluyen recubrimientos de frenos automovilísticos y como agente aglutinante de moldes de arena para fundición.
- **Acrílicos:** son apropiados para aplicaciones con sustratos que no están limpios.

- **Sistemas anaeróbicos:** el curado de estos adhesivos se realiza al privarlos de oxígeno y, por lo general, la unión es dura y frágil. Los tiempos de curado se pueden reducir por calor externo o por radiación ultravioleta (UV).
- **Cianoacrilato:** las líneas de unión son delgadas y la unión se realiza en un tiempo de 5 a 40 segundos.
- **Uretanos:** tienen alta tenacidad y flexibilidad a temperatura ambiente; se utilizan ampliamente como selladores.
- **Silicones:** altamente resistentes a la humedad y los solventes, tienen alta resistencia al impacto y al desprendimiento; sin embargo, generalmente los tiempos de curado son de uno a cinco días.

Muchos de estos adhesivos se pueden combinar para optimizar sus propiedades, como *epóxico-silicón, nitrilo-fenólico, epóxico-fenólico*. Los adhesivos menos costosos son los epóxicos y los fenólicos, que van seguidos de los poliuretanos, acrílicos, silicones y cianoacrilatos. Por lo general, los adhesivos para aplicaciones de alta temperatura, en una gama de hasta 260 °C (500 °F) (como las poliamidas y los polibenzimidazoles), son los más caros. La mayoría de los adhesivos tienen una temperatura óptima (que va casi de la temperatura ambiente hasta 200 °C) para máxima resistencia cortante.

32.4.2 Adhesivos eléctricamente conductores

Aunque la mayor parte del uso de las uniones con adhesivos es para resistencia mecánica, un avance hasta cierto punto reciente es el desarrollo y la aplicación de adhesivos eléctricamente conductores para reemplazar aleaciones base plomo para soldadura blanda, sobre todo en la industria electrónica. Requieren temperaturas de curado inferiores a las que se exigen para la soldadura blanda.

En estos adhesivos, el polímero es la matriz y contiene metales conductores (rellenos) en forma de hojuelas y partículas (ver también sección 7.3 sobre *polímeros eléctricamente conductores*). Existe una proporción mínima (en volumen) de rellenos necesarios para hacer que el adhesivo sea conductor eléctrico; por lo general, se encuentra en el intervalo de 40 a 70%.

El tamaño, la forma y la distribución de las partículas metálicas, el método de aplicación de calor y presión y la geometría individual de contacto de las partículas de conducción pueden controlarse para proporcionar conductividad eléctrica isotrópica y anisotrópica al adhesivo. Los metales empleados comúnmente son plata, níquel, cobre y oro, así como carbono. Los desarrollos recientes incluyen partículas poliméricas (como poliestireno) recubiertas con películas metálicas de plata u oro delgadas. Por lo general, los materiales de las matrices son epóxicos, aunque también pueden utilizarse termoplásticos y están disponibles como película o pasta. Las aplicaciones de adhesivos eléctricamente conductores incluyen calculadoras, controles remotos y tableros de control. Además, existen usos de alta densidad en ensambles electrónicos, pantallas de cristal líquido, televisores de bolsillo y juegos electrónicos.

32.4.3 Preparación de la superficie, capacidades del proceso y aplicaciones

La **preparación de la superficie** es muy importante en la unión con adhesivos. La resistencia de la unión depende en gran medida de la ausencia de suciedad, polvo, aceite y muchos otros contaminantes. Esta dependencia puede observarse al intentar aplicar una cinta adhesiva sobre una superficie con polvo o grasosa. Los contaminantes también afectan la capacidad de humectación del adhesivo e incluso evitan su difusión sobre la interfaz. Las películas delgadas de óxido, débiles o sueltas en las superficies de las piezas de trabajo, son perjudiciales para las uniones con adhesivos. Por otro lado, quizá se desee una película de óxido porosa o delgada y resistente, en particular una con cierta rugosidad superficial para mejorar la adhesión o introducir enclavamiento mecánico. Sin

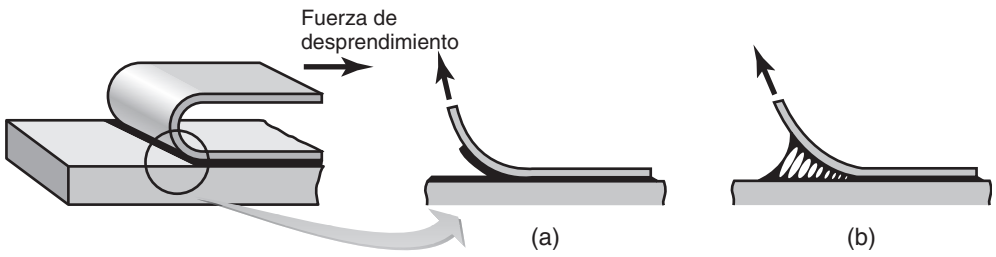


FIGURA 32.9 Comportamiento característico de adhesivos: *(a)* frágiles, y *(b)* tenaces en una prueba de desprendimiento. Esta prueba es similar al desprendimiento de una cinta adhesiva de una superficie sólida.

embargo, la rugosidad no debe ser demasiado alta, porque el aire puede quedar atrapado y se reduciría la resistencia de la unión. Existen diversos compuestos y capas de fondo que modifican las superficies para mejorar la resistencia de la unión con adhesivo. Se pueden aplicar adhesivos líquidos con cepillos, rociadores y rodillos.

Capacidades del proceso. Se pueden utilizar adhesivos para unir una amplia variedad de materiales y componentes metálicos y no metálicos, similares o no, con diferentes formas, tamaños y espesores. También es posible combinar la unión con adhesivos con métodos de unión mecánica (sección 32.5) para mejorar la resistencia de la unión. El diseño de las uniones y los métodos de unión exigen cuidado y experiencia. Por lo general, se requiere equipo especial, como soportes fijos, prensas, herramientas y autoclaves y hornos para curado.

Las uniones con adhesivos están diseñadas para soportar fuerzas cortantes, de compresión y de tensión, pero no deben someterse a *desprendimiento* (fig. 32.9). Por ejemplo, obsérvese la facilidad con que se puede desprender la cinta adhesiva de una superficie, aun cuando no se pueda deslizar a lo largo de la superficie. Durante el desprendimiento, el comportamiento de un adhesivo puede ser frágil, o dúctil y tenaz, requiriendo fuerzas elevadas para desprenderlo.

Aplicaciones. Las principales industrias que utilizan con amplitud la unión con adhesivos son la aeroespacial, automotriz, de aparatos eléctricos y de productos para construcción. Las aplicaciones incluyen sujeción de espejos retrovisores a parabrisas, ensambles de recubrimiento de frenos automovilísticos, vidrio laminado para parabrisas, aparatos eléctricos, hélices de helicópteros, estructuras de panal y cuerpos y superficies de control de aeronaves.

Un factor que debe considerarse en el uso de adhesivos en la producción es el *tiempo de curado*, que puede ser de algunos segundos (a altas temperaturas) a varias horas (a temperatura ambiente), en particular para los adhesivos termofijos. Por lo tanto, las capacidades de producción pueden ser bajas en comparación con las de otros procesos de unión. Además, las uniones con adhesivos para aplicaciones estructurales pocas veces son apropiadas para servicio arriba de 250 °C (500 °F).

La inspección no destructiva de la calidad y resistencia de los componentes unidos adhesivamente puede ser difícil. Algunas de las técnicas descritas en la sección 36.10 (como impacto acústico [golpeteando], holografía, detección infrarroja y prueba ultrasónica) son métodos efectivos de pruebas no destructivas para adhesivos.

A continuación se indican las principales ventajas de la unión con adhesivos:

- Proporciona una unión en la interfaz para resistencia estructural o para aplicaciones no estructurales, como sellado, aislamiento, prevención de corrosión electroquímica entre metales disímiles y reducción de vibración y ruido (por medio de amortiguamiento interno en las uniones).
- Distribuye la carga en una interfaz, por lo que elimina los esfuerzos localizados que en general se deben a la unión de componentes con sujetadores mecánicos, como pernos y tornillos. Además, se mantiene la integridad estructural de las secciones (debido a que no se requieren orificios).
- No se afecta la apariencia externa de los componentes unidos.
- Se pueden unir componentes muy delgados y frágiles sin aumento significativo de peso.

- Se pueden unir materiales porosos y materiales de propiedades y tamaños muy diferentes.
- Debido a que por lo general se efectúa a una temperatura entre la temperatura ambiente y alrededor de 200 °C (400 °F), no existe distorsión significativa de los componentes ni cambio en sus propiedades originales. Es importante evitar la distorsión, sobre todo en materiales que son sensibles al calor.

Las principales limitaciones de la unión con adhesivos son las siguientes:

- Intervalo limitado de temperaturas de servicio.
- El tiempo de unión puede ser largo.
- La necesidad de tener mucho cuidado en la preparación de la superficie.
- La dificultad de probar las uniones adheridas de manera no destructiva, en particular para estructuras grandes.
- La confiabilidad limitada de las estructuras unidas con adhesivos durante su vida útil y en condiciones ambientales hostiles (como *degradación* por temperatura, oxidación, corrosión por esfuerzos, radiación y disolución) puede ser una consideración significativa.

El costo de las uniones con adhesivos depende de la operación específica. Sin embargo, en muchos casos, la economía general del proceso hace que las uniones con adhesivos sean procesos atractivos de unión. En algunas ocasiones, es la única posible o práctica. El costo del equipo varía en gran medida según el tamaño y tipo de operación.

32.4.4 Diseño de uniones con adhesivos

- Los diseños de uniones con adhesivos deben garantizar que las uniones se sometan sólo a fuerzas de compresión, tensión y cortante y no a desprendimiento o escisión.
- En las figuras 32.10 a 32.12 se muestran varios diseños de uniones para unión con adhesivos. Su resistencia varía en forma considerable; por lo tanto, es importante la selección apropiada del diseño, que debe incluir consideraciones del tipo de carga y el ambiente.
- Las uniones a tope requieren superficies grandes de unión. Las uniones de traslape simple tienden a distorsionarse bajo tensión debido al par de fuerzas en la unión (ver fig. 31.10a).
- Es preferible que los coeficientes de dilatación térmica de los componentes a unir sean casi iguales para evitar esfuerzos internos durante la unión con adhesivos. Además, deben evitarse situaciones en las que los ciclos térmicos puedan provocar movimiento diferencial a lo largo de la unión.

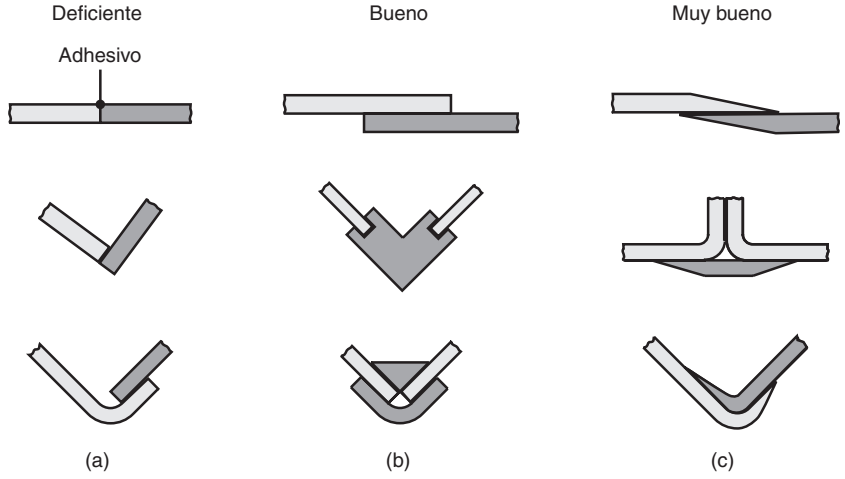


FIGURA 32.10 Diversos diseños de uniones realizadas con adhesivos. Obsérvese que los diseños adecuados requieren grandes áreas de contacto entre los miembros a unir.

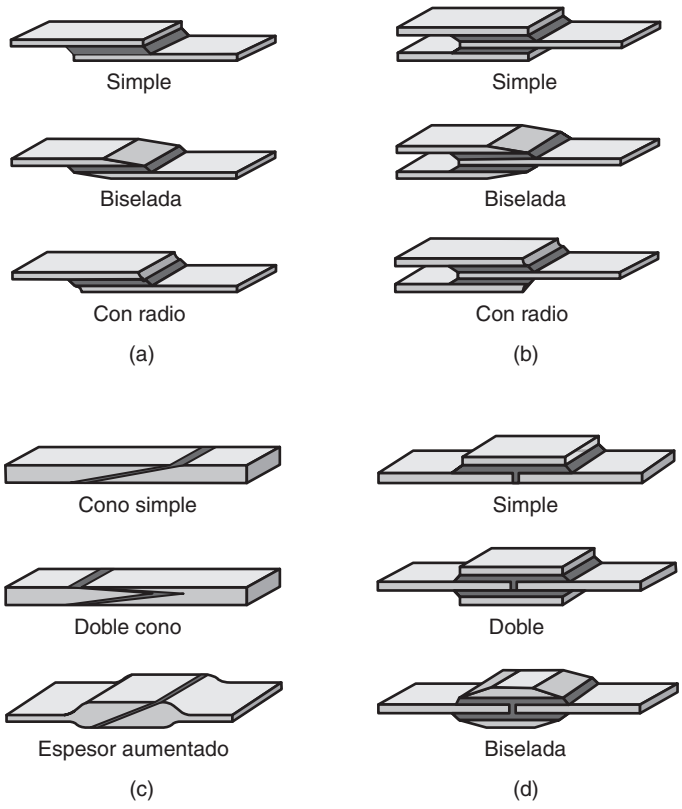


FIGURA 32.11 Configuraciones deseables para uniones con adhesivos: *(a)* de traslape simple; *(b)* doble traslape; *(c)* rebajada, y *(d)* reforzada.

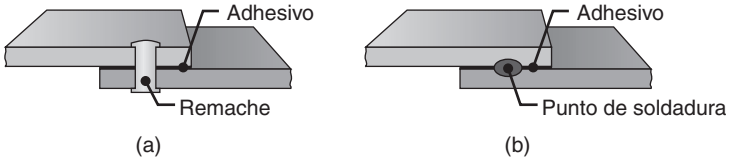


FIGURA 32.12 Dos ejemplos de uniones combinadas, para efectos de mejor resistencia, hermeticidad y resistencia a la corrosión por hendiduras.

ESTUDIO DE CASO 32.1 Curado mediante luz de adhesivos acrílicos para productos médicos

Cobe Cardiovascular, Inc., es un fabricante líder en sistemas de recolección y procesamiento sanguíneos, así como en sistemas extracorporales para cirugía cardiovascular. En 1993, la compañía (como muchos otros fabricantes de dispositivos) utilizó solventes para unir diversos componentes y ensambles auxiliares de dispositivos. Sin embargo, diversas entidades federales empezaron a exhortar a las industrias para que evitaran el uso de solventes; en particular, Cobe quería eliminar el uso del cloruro de metileno por razones de seguridad ambiental y ocupacional. Enfocada en esta meta, la compañía empezó a rediseñar la mayoría de sus ensambles para que aceptaran adhesivos de

curado mediante luz (ultravioleta o visible). La mayoría de los dispositivos de la compañía se hacían de plásticos transparentes. Por lo tanto, sus ingenieros requerían uniones con adhesivos transparentes para efectos estéticos y sin tendencia al agrietamiento o fisuración por esfuerzos.

Como ejemplo de un producto común, el depósito de salvamento o recolección sanguínea de Cobe es un dispositivo oval de policarbonato de unos 300 mm (12 pulgadas) de altura, 200 mm (8 pulgadas) de diámetro principal y 100 mm (4 pulgadas) de profundidad (fig. 32.13). El depósito es un dispositivo para ser usado sólo una vez o desechable; su propósito es recolectar y mantener la sangre durante las cirugías a corazón abierto o de pecho, o para procedimientos artroscópicos y en salas de emergencia. Se pueden almacenar hasta 3000 cc de sangre en el depósito mientras se espera su paso a una centrifugadora de 250 cc, que limpia la sangre y la regresa al paciente después de concluir el procedimiento quirúrgico. El depósito de recolección consta de una tapa transparente de policarbonato unida a un compartimiento también de policarbonato. La unión tiene una configuración machihembrada; el objetivo era crear una unión elástica y resistente que pudiera soportar esfuerzos repetidos sin posibilidades de fuga.

Los adhesivos de acrílico curados mediante luz ofrecen una gama de propiedades de desempeño que los hacen muy apropiados para esta aplicación. Ante todo, logran alta resistencia de la unión para los termoplásticos utilizados comúnmente a fin de formar cubiertas para dispositivos médicos. Por ejemplo, el Loctite® 3211 (ver *adhesivos anaeróbicos*, sección 32.4.1) logra resistencias cortantes de 11 MPa (1600 psi) en el policarbonato. Aunque es muy importante la resistencia inicial cortante, resulta aún más esencial que el adhesivo tenga la capacidad de mantener una alta resistencia de la unión después de su esterilización. Por fortuna, los dispositivos médicos desechables se someten, por lo general, a muy pocos ciclos de esterilización durante la manufactura. Además, estos adhesivos pueden soportar una cantidad limitada de ciclos de irradiación gamma, irradiación de haz de electrones, autoclave, óxido de etileno o inmersión química.

Otra consideración que hace que los adhesivos curados mediante luz se adapten bien para esta aplicación es la diversidad de formulaciones que les permite soportar grandes deformaciones antes de la fluencia; el Loctite® 3211 fluye en elongaciones que exceden el 200%. Esta flexibilidad es crítica, ya que por lo general las uniones se someten a numerosas operaciones de doblado y flexionado cuando los dispositivos se presu-



FIGURA 32.13 Depósito sanguíneo de Cobe Laboratories. La tapa se une al recipiente con una unión adhesiva hermética y con una unión machihembrada. *Fuente*: Cortesía de Cobe Laboratories.

rizan durante la prueba de calificación y uso. Si un adhesivo es demasiado rígido, no pasará este tipo de prueba, incluso si ofrece mayor resistencia cortante que un adhesivo comparable y más flexible. Por último, existe una amplia diversidad de formulaciones disponibles para los acrílicos curados mediante luz, que satisfacen la certificación internacional de normas de calidad (ISO; ver sección 36.6), lo que significa que al procesarlos adecuadamente no producen problemas de biocompatiblidad en el ensamble final.

Aunque estas características de desempeño son atractivas, el adhesivo también debe satisfacer ciertas características de procesamiento durante la manufactura. Los adhesivos de acrílico curados mediante luz han tenido un amplio uso en las operaciones de ensamble/unión de dispositivos médicos, debido a que sus peculiaridades de procesamiento son compatibles con los procesos automatizados de manufactura de alta velocidad. Estos adhesivos están disponibles en una amplia variedad de viscosidades y se dosifican con facilidad mediante sistemas de dosificación de presión-tiempo o desplazamiento positivo. Una vez dosificados en la parte, pueden permanecer en contacto con partes de plástico, incluso sometidas a altos esfuerzos durante varios minutos, o más, sin causar agrietamiento por esfuerzos ni degradación plástica. Por ejemplo, el líquido Loctite® 3211 puede permanecer en contacto con el policarbonato que ya se dobló para inducir esfuerzos hasta de 17 MPa (2500 psi) durante más de 15 minutos sin agrietamiento por esfuerzos. Por último, el adhesivo puede convertirse en su totalidad de un estado líquido a uno sólido en segundos al exponerlo a la luz de la intensidad y longitud de onda apropiadas.

Puesto que el Loctite® 3211 absorbe luz tanto del espectro visible como del ultravioleta, puede utilizarse con éxito en plásticos que contienen bloqueadores de UV, como muchos grados de policarbonato. La capacidad de tener un tiempo largo abierto, en el que las partes pueden colocarse y todavía curar el adhesivo cuando se requiera, es un beneficio único para los adhesivos curados por luz, que reduce ampliamente los costos por desperdicios. Por lo regular, el equipo empleado para irradiar la parte con luz de alta intensidad requiere un espacio de 10×20 pies^2 en una línea de producción, que por lo común es mucho menor a lo solicitado para los hornos usados por los adhesivos curados mediante calor o los anaqueles de almacenamiento requeridos para adhesivos de curado más lento. Debido a que el espacio de piso implica una prima de costos en ambientes de cuartos limpios, es un beneficio significativo.

También es importante que la unión se diseñe de manera apropiada para maximizar el desempeño de la misma. Si el contenedor se adhiere con una unión que consta de dos superficies planas en contacto íntimo, los esfuerzos de desprendimiento (ver fig. 32.9) actúan sobre la unión al presurizar el recipiente. Los esfuerzos de desprendimiento son el tipo más difícil a soportar por la unión con adhesivos, debido a que toda la carga se concentra en el extremo frontal de dicha unión. El diseño machihembrado utilizado se concentró en este problema, en el cual la ranura actúa como depósito para contener el adhesivo durante la operación de dosificación. Cuando las partes entran en contacto y se cura el adhesivo, este diseño permite traducir mucha de la carga sobre la unión (al presurizar el dispositivo) en fuerzas cortantes y de tensión, que el adhesivo soporta mejor. El espacio entre el macho y la hembra puede variar ampliamente porque la mayoría de los adhesivos curados mediante luz pueden curarse a profundidades que exceden 5 mm (0.20 pulgadas). Esto permite al fabricante tener un proceso de unión robusta (lo que significa que se pueden aceptar amplias tolerancias dimensionales).

Con el nuevo diseño y este adhesivo se eliminaron las preocupaciones ambientales y los problemas asociados con uniones mediante solventes, logrando el beneficio de una unión más segura, rápida y consistente. El adhesivo de curado mediante luz proporcionó la línea de unión estética que la compañía quería: una transparente y apenas perceptible. También proporcionó la resistencia estructural necesaria y, por lo tanto, mantuvo una ventaja competitiva en el mercado.

Fuente: Cortesía de P. J. Courtney, Loctite Corporation.

32.5 Sujeción mecánica

Quizá tengan que unirse o sujetarse dos o más componentes de modo que se puedan separar en algunas ocasiones durante la vida útil o ciclo de vida del producto. Diversos productos (incluyendo los lápices mecánicos, relojes de pulsera, computadoras, aparatos eléctricos, motores y bicicletas) tienen componentes que se sujetan mecánicamente. Tal vez se prefiera la *sujeción mecánica* sobre otros métodos por las siguientes razones:

- Facilidad de manufactura.
- Facilidad de ensamble y transporte.
- Facilidad de desensamble, mantenimiento, reemplazo de partes o reparación.
- Facilidad para crear diseños que requieren uniones móviles, como bisagras, mecanismos de deslizamiento y componentes, y accesorios ajustables.
- Costo general inferior por manufactura del producto.

El método más común de sujeción mecánica es el uso de tornillos, tuercas, pernos, pasadores y otras variedades de **sujetadores**; estas operaciones también se conocen como **ensamble mecánico**. Por lo general, la sujeción mecánica requiere que los componentes tengan *orificios* a través de los cuales se inserten los sujetadores. Estas uniones se pueden someter a esfuerzos cortantes y de tensión, y deben diseñarse para resistir estas fuerzas.

Preparación de los orificios. Un aspecto importante de la sujeción mecánica es la preparación de los orificios. Como se indica en los capítulos 16, 23 y 27, un orificio en un cuerpo sólido se puede producir mediante diversos métodos, como troquelado, taladrado, medios químicos y eléctricos, y haces de alta energía. La selección del método depende del tipo de material, sus propiedades y espesor. Recuérdese de las partes II y III que los orificios también se pueden *producir integralmente* en el producto durante la fundición, forjado, extrusión y metalurgia de polvos. Para mejorar la precisión y el acabado superficial, muchas operaciones de producción de orificios pueden ir seguidas de operaciones de acabado, como rasurado, rebabeo, escariado y honeado, como ya se indicó en diversas secciones de la parte IV.

Debido a las diferencias fundamentales en sus características, cada una de las operaciones de fabricación de orificios produce orificios con diferentes acabados y propiedades superficiales, así como características dimensionales. La influencia más significativa de un orificio en un cuerpo sólido es su tendencia a reducir la vida por fatiga del componente mediante la concentración de esfuerzos. En el caso de los orificios, la vida por fatiga se puede mejorar induciendo esfuerzos residuales a compresión en la superficie cilíndrica del orificio. Por lo general, estos esfuerzos se desarrollan empujando una barra redonda (*mandril*) a través del orificio, dilatándolo en muy pequeñas dimensiones. Esta operación deforma plásticamente las capas superficiales del orificio, de manera similar a la que se observa en el granallado o el bruñido por laminación (sección 34.2).

Sujetadores roscados. Los pernos, tornillos y tuercas se encuentran entre los *sujetadores roscados* de uso más común. En las referencias al final de este capítulo se describen diversos estándares y especificaciones (incluyendo dimensiones de las roscas, tolerancias dimensionales, paso, resistencia y calidad de los materiales usados para fabricar estos sujetadores). Los pernos y tornillos se pueden asegurar con tuercas, o pueden ser de *autorroscado*, en el que el tornillo corta o forma la rosca en la parte a sujetar. El método de autorroscado es muy efectivo y económico en productos de plástico en los que la sujeción no exige un orificio machueleado o una tuerca.

Si la unión se va a someter a vibración (como en una aeronave, motores y maquinaria), existen diversas tuercas y contratuercas especialmente diseñadas. Aumentan la resistencia a la fricción en la dirección de torsión inhibiendo así cualquier aflojamiento de los sujetadores debido a la vibración.

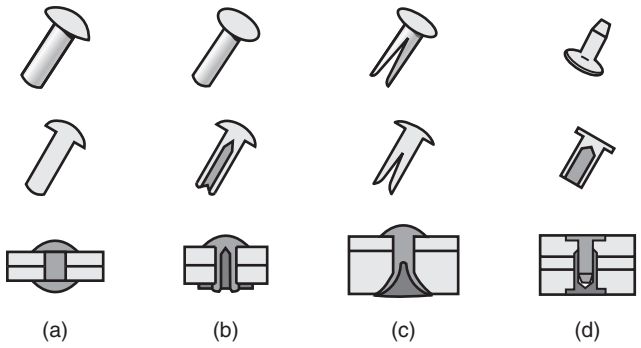


FIGURA 32.14 Ejemplos de remaches: *(a)* sólidos; *(b)* tubulares, *(c)* divididos o bifurcados, y *(d)* de compresión.

Remaches. El método más común de uniones mecánicas permanentes o semipermanentes es por *remachado* (fig. 32.14). Se pueden utilizar cientos de miles de remaches en la construcción y el ensamble de un avión comercial grande. Pueden ser sólidos o tubulares. La instalación de un remache sólido implica dos pasos: la colocación del remache en el orificio (por lo general, troquelado o taladrado) y la deformación del extremo de su vástago por recalcado (*cabeceado*). Los remaches huecos se instalan abocardando su extremo más pequeño. Se pueden colocar explosivos en el interior de la cavidad del remache y detonarlos para expandir el extremo de éste. El remachado se puede realizar a temperatura ambiente o elevada. También es posible efectuar esta operación por medios manuales o mecanizados, incluyendo el uso de robots programables. En la figura 32.15 se ilustran algunos lineamientos de diseño para el remachado.

32.5.1 Otros métodos de sujeción

En las aplicaciones de unión y ensamble se utilizan diversos tipos de sujetadores. A continuación se describen los tipos más comunes.

Pespunteo y engrapado de metales. El proceso de *pespunteo y engrapado de metales* (fig. 32.16) es muy similar al engrapado ordinario de papeles. Esta operación es rápida y particularmente apropiada para unir materiales delgados metálicos y no metálicos, incluyendo madera. Un ejemplo común es el engrapado de cajas de cartón. En

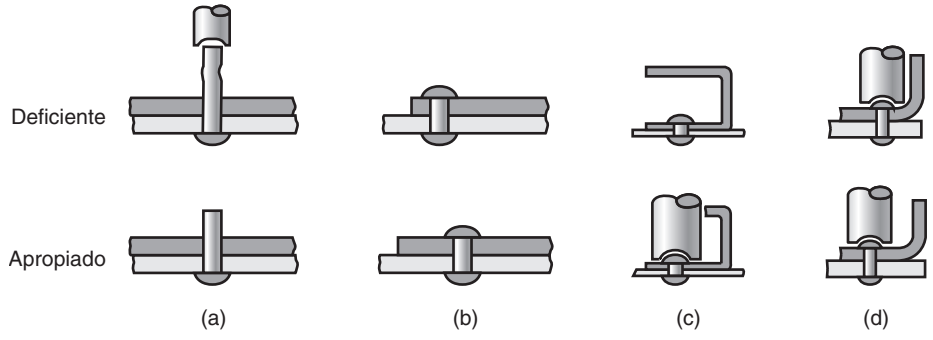


FIGURA 32.15 Lineamientos de diseño para remachado. *(a)* El vástago expuesto es demasiado largo; el resultado es pandeo en lugar de recalcado. *(b)* Los remaches deben colocarse lo suficientemente lejos de los bordes para evitar concentraciones de esfuerzos. *(c)* Las secciones unidas deben permitir una holgura amplia para las herramientas de remachado. *(d)* La curvatura de la sección no debe interferir en el proceso de remachado. *Fuente*: J. G. Bralla.

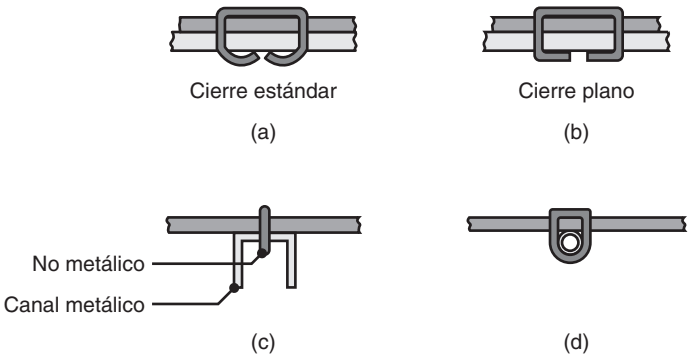


FIGURA 32.16 Ejemplos comunes de engrapado metálico.

el *cierre*, el material del sujetador debe ser suficientemente delgado y dúctil para soportar la gran deformación localizada durante el agudo doblado.

Engargolado. El *engargolado* se basa en el principio simple de doblar juntas dos piezas delgadas de material. Es un proceso muy similar a la unión de dos hojas de papel (cuando no se tiene disponible un clip) doblándolas en la esquina (fig. 32.17). Ejemplos comunes de engargolado se ven en la parte superior de las latas para bebidas (ver última ilustración en la fig. 16.31), en contenedores para productos alimenticios y domésticos, y en los ductos de calefacción y aire acondicionado. En el engargolado, los materiales deben tener la capacidad de someterse a doblado y plegado a radios muy pequeños; de otra manera se agrietarían. El desempeño y la confiabilidad de las costuras pueden mejorarse (así como hacerlas impermeables) con la adición de adhesivos, recubrimientos y sellos poliméricos, o por soldadura blanda.

Plegado. El proceso de *plegado* es un método de unión sin usar sujetadores. Puede realizarse con resaltes o depresiones (fig. 32.18), que es posible producir mediante emboquillado o estampado. El plegado se puede realizar en partes tubulares o planas, siempre que los materiales sean lo suficientemente delgados y dúctiles para soportar las grandes deformaciones localizadas. Las corcholatas y otras tapas se sujetan a las botellas mediante plegado, al igual que algunos conectores al cableado eléctrico.

Sujetadores de agarre o ajuste instantáneo. En la figura 32.19 se muestran diversos tipos de sujetadores de resorte o ajuste instantáneo, los cuales se utilizan ampliamente en carrocerías automotrices y aparatos eléctricos domésticos. Son económicos y permiten el ensamble fácil y rápido de los componentes.

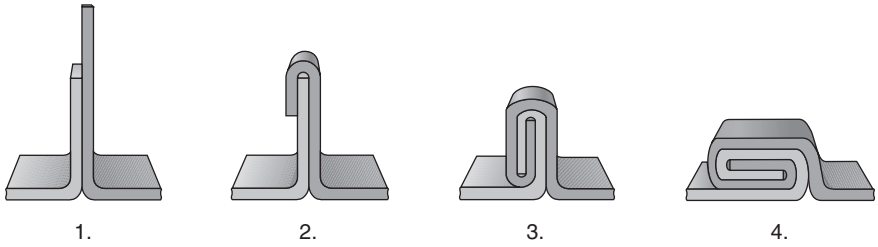


FIGURA 32.17 Etapas en el formado de una costura de doble seguro.

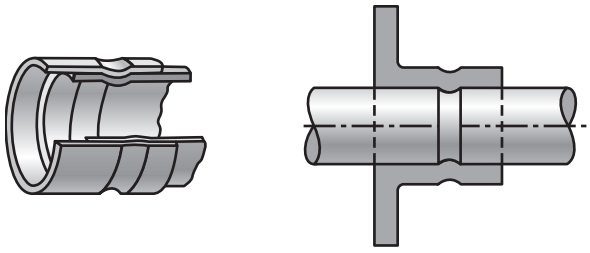


FIGURA 32.18 Dos ejemplos de unión mecánica por plegado.

Ajustes por contracción y por prensado. Los componentes también se pueden ensamblar mediante ajustes por contracción y por prensado. Los *ajustes por contracción* se basan en la contracción térmica de dos componentes. Las aplicaciones comunes son el ensamble de componentes para matrices y el montaje de engranes y levas en las flechas. En los *ajustes por prensado*, se fuerza un componente sobre otro; este proceso produce una unión de alta resistencia.

Aleaciones con memoria de forma. En la sección 6.13 se describen las características de estos materiales, en los que se hizo notar su uso como sujetadores, debido a su capacidad para recuperar su forma con el calentamiento. Diversas aplicaciones avanzadas incluyen su uso como acoplamiento en el ensamble de tubos de aleación de titanio para aeronaves.

32.5.2 Diseño de las sujeciones mecánicas

El diseño de las uniones mecánicas requiere la consideración del tipo de carga a que se someterá la estructura y del tamaño y espaciado de los orificios. Es importante la *compatibilidad* del material del sujetador con el de los componentes a unir. La incompatibili-

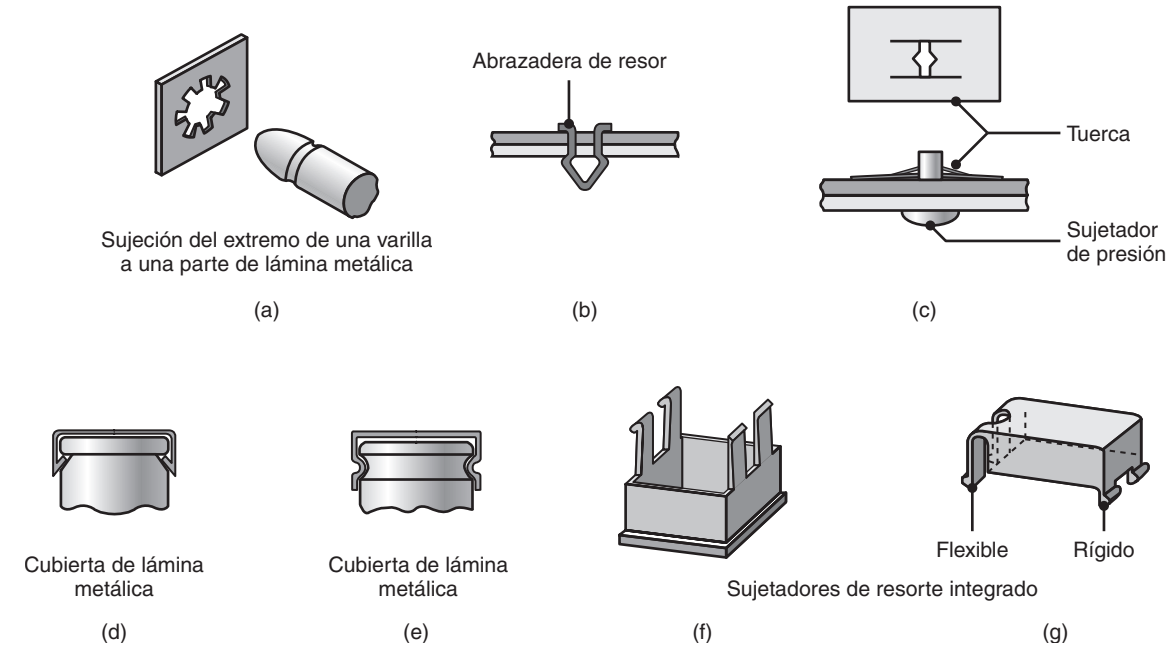


FIGURA 32.19 Ejemplos de sujetadores de resorte y de ajuste instantáneo utilizados para facilitar el ensamble.

dad puede producir *corrosión galvánica*, también conocida como *corrosión de hendidura* (sección 3.8). Por ejemplo, en un sistema en el que se utiliza un perno o remache de acero para sujetar láminas de cobre, el perno es anódico y la placa de cobre es catódica; esta combinación produce rápida corrosión y pérdida de resistencia de la unión. Los sujetadores de aluminio o zinc en productos de cobre reaccionan de manera similar.

Otros lineamientos generales de diseño para las uniones mecánicas son los siguientes (ver también sección 37.10):

- Por lo general, es menos costoso utilizar menos sujetadores (más grandes) que usar una gran cantidad de pequeños.
- El ensamble de partes debe realizarse con una cantidad mínima de sujetadores.
- El ajuste entre las partes a unir debe ser tan suelto como sea posible para reducir costos y facilitar el proceso de ensamble.
- Siempre que sea posible, deben utilizarse sujetadores de tamaño estándar.
- Los orificios no deben estar demasiado cerca de los bordes o esquinas para evitar el posible desgarramiento del material al someterlo a fuerzas externas.

32.6 Unión de plásticos, cerámicos y vidrios

Los plásticos se pueden unir mediante muchos de los métodos ya descritos para unir materiales metálicos y no metálicos, en particular por medio de la unión con adhesivos y la sujeción mecánica.

32.6.1 Unión de termoplásticos

Los termoplásticos se pueden unir mediante los siguiente métodos: medios térmicos, unión con adhesivos, unión por solventes y sujeción mecánica.

Métodos térmicos. Los termoplásticos se ablandan y funden al aumentar la temperatura. Por consiguiente, se pueden unir por medios en los cuales se genera calor (de una fuente externa o interna) en la interfaz, permitiendo que ocurra la **fusión**. El calor ablanda el termoplástico en la interfaz, pasa a un estado viscoso o fundido y asegura una buena unión con la aplicación de presión.

Debido a la baja conductividad térmica de los termoplásticos, la fuente de calor puede quemar o calcinar las superficies de los componentes si se aplica a una velocidad demasiado alta, causando posibles dificultades para obtener una fusión lo suficientemente profunda para que la unión sea resistente. La *oxidación* también puede ser un problema al unir algunos polímeros (como el polietileno), lo que provoca degradación. Por lo general, se utiliza un gas inerte de protección (como el nitrógeno) para evitar la oxidación.

Se pueden elegir **fuentes externas de calor** de entre las siguientes; la elección depende de la compatibilidad de los polímeros a unir:

- *Aire caliente, gases inertes*, o también se utiliza un material de relleno del mismo tipo.
- En un proceso conocido como *soldadura de herramienta caliente* o *soldadura de placa caliente*, se prensan herramientas o matrices calientes contra las superficies que se calientan, teniendo lugar la unión por la interdifusión de las cadenas moleculares. Es común utilizar este proceso en tubos y tubería soldados a tope (extremo a extremo).
- La *radiación infrarroja* (que utiliza lámparas de calor de cuarzo de alta intensidad) se concentra en un haz angosto sobre la superficie a unir.
- La *radiofrecuencia* es particularmente útil para capas delgadas; las frecuencias se encuentran en el intervalo de 100 a 500 Hz.

- El *calentamiento dieléctrico* a frecuencias de hasta 100 MHz es efectivo para el calentamiento de polímeros, como nailon, cloruro polivinílico, poliuretano y hule.
- Los elementos de *resistencias eléctricas* (como alambres o trenzados, o cintas de base carbono, láminas y cuerdas) se colocan en la interfaz para crear calor mediante el paso de la corriente eléctrica; este proceso es conocido como *soldadura de implante resistivo*. De manera alternativa, en la *soldadura por inducción,* estos elementos en la interfaz se pueden someter a una radiofrecuencia. En ambos casos, debido a que se quedan en la zona de soldadura, los elementos en la interfaz deben ser compatibles con el uso del producto unido.
- El *láser* que emite haces desenfocados a baja potencia evita la degradación del polímero.

Las **fuentes internas de calor** se desarrollan mediante los siguientes medios:

- La *soldadura ultrasónica* es el proceso de uso más común para los termoplásticos, en particular los polímeros amorfos como el ABS y el poliestireno de alto impacto; las frecuencias se encuentran en el intervalo de 20 a 40 kHz.
- La *soldadura por fricción* (también conocida como *soldadura por rotación* para polímeros) y la *soldadura por fricción lineal* (llamada asimismo *soldadura por vibración*) son útiles en particular para unir polímeros con un alto grado de cristalinidad, como acetal, polietileno, nailons y polipropileno.
- La *soldadura orbital* es similar a la soldadura por fricción, excepto que el movimiento giratorio de un componente se efectúa en una trayectoria orbital.

El método de fusión es efectivo sobre todo con plásticos que no pueden unirse con facilidad por medio de adhesivos. De esta manera se pueden unir plásticos (como cloruro polivinílico, polietileno, polipropileno, acrílicos y acrilonitrilo butadieno estireno [ABS]). Por ejemplo, se utilizan sistemas portátiles de sellado por fusión diseñados especialmente para permitir la unión en campo de tubos de plástico (por lo general, fabricados con polietileno y usados para la entrega de gas natural).

Las múltiples envolturas coextruidas para alimentos constan de diferentes tipos de películas, que se unen por calor durante la extrusión (sección 19.2.1). Cada película tiene una función; por ejemplo, una puede mantener fuera la humedad, otra puede mantener fuera el oxígeno y una tercera puede facilitar el sellado térmico durante el proceso de empaque. Algunas envolturas tienen hasta siete capas, todas unidas durante la producción de la película.

Unión con adhesivos. Este método se ilustra mejor en la unión de secciones de tubos de cloruro polivinílico (utilizados ampliamente en los sistemas de cañerías) y tubos de ABS (usados en los sistemas de drenaje, desechos y ventilación). El adhesivo se aplica a la camisa de conexión y a las superficies de los tubos mediante una capa de fondo para mejorar la adhesión (un paso muy similar al empleado para las capas de fondo de pintura) y después se unen las piezas.

La unión del polietileno, polipropileno y politetrafluoroetileno (Teflón) con adhesivos puede resultar difícil, porque éstos no se adhieren con facilidad a ellos. Por lo general, las superficies de las partes fabricadas con estos materiales deben tratarse químicamente para mejorar la unión. También es efectivo el uso de capas de fondo adhesivas o cintas adhesivas de doble lado.

Sujeción mecánica. Este método es efectivo para la mayoría de los termoplásticos (debido a su tenacidad y resiliencia inherentes) y para unir plásticos a metales. Se pueden utilizar tornillos de plástico o metálicos; el uso de tornillos metálicos de autorroscado es una práctica común. Los *sujetadores de resorte integrado* han ganado amplia aceptación para simplificar operaciones de ensamble; en la figura 32.19f y g se muestran geometrías de sujetadores. Debido a que el sujetador puede moldearse directamente al mismo tiempo que el plástico, agrega muy poco al costo del ensamble. Esta técnica es de costo muy eficaz, porque reduce el tiempo de ensamble y minimiza la cantidad de partes requeridas.

Unión por solventes. Este método consiste en la siguiente secuencia de pasos:

1. Desbastar las superficies con un abrasivo.
2. Secar y limpiar las superficies con un solvente apropiado para el polímero específico.
3. Prensar las superficies y mantenerlas unidas hasta que se desarrolle suficiente resistencia en la unión.

Unión electromagnética. Los termoplásticos también se pueden unir por medios magnéticos, embutiendo partículas diminutas del orden de 1 μm (40 μpulg) en el polímero. Un campo de alta frecuencia produce el calentamiento por inducción del polímero y lo funde en las interfaces a unir.

32.6.2 Unión de termofijos

Los plásticos termofijos (como epóxico y fenólicos) se pueden unir mediante las siguientes técnicas:

- *Insertos roscados* u otros moldeados.
- *Sujetadores mecánicos*, en particular utilizando tornillos de autorroscado y sujetadores de resorte integrado.
- **Unión por solventes.**
- *Cocurado*, en el que se juntan los dos componentes a unir y se curan de manera simultánea.
- *Unión con adhesivos*.

32.6.3 Unión de cerámicos y vidrios

En la actualidad existe una amplia variedad y tipos de cerámicos y vidrios con propiedades únicas e importantes. Los cerámicos y vidrios se utilizan como productos, como componentes de productos o como herramientas, moldes y matrices. Con frecuencia, estos materiales se ensamblan como componentes o subensambles y se unen con el mismo tipo de material, o con diferentes materiales metálicos o no metálicos. Por lo general, los cerámicos, vidrios y muchos materiales se pueden unir con adhesivos. Un ejemplo común es el ensamble de piezas de cerámicos rotas utilizando un epóxico de dos componentes, que se aplica de dos tubos separados y se mezcla justo antes de la aplicación. Otros métodos de unión incluyen medios mecánicos, como sujetadores y ajustes por resorte o presión.

Cerámicos. Como se indica en el capítulo 8, los cerámicos tienen propiedades muy diferentes de las que poseen los materiales metálicos y no metálicos, incluyendo rigidez, dureza, fragilidad, resistencia a alta temperatura e inactividad química. Por lo tanto, la unión entre ellos o con otros materiales metálicos o no metálicos requiere consideraciones especiales y se han desarrollado procesos de unión altamente especializados.

Una técnica común y eficaz en la unión de combinaciones de materiales difíciles de unir consiste primero en aplicar un recubrimiento de un material que se una bien a uno o a ambos componentes, actuando así como agente de unión. Por ejemplo, la superficie de *cerámicos de alúmina* se puede *metalizar*, como se describe en la sección 34.5. En esta técnica, conocida como *proceso de Mo-Mn*, primero se recubre la parte de cerámicos con un lodo de óxidos de molibdeno y manganeso. Después de cocerla, se forma una capa vidriada sobre la superficie de la parte. Luego, esta capa se recubre con níquel, y como ahora la parte ya tiene superficie metálica, se puede soldar a una superficie metálica utilizando un metal de aporte apropiado.

El carburo de tungsteno y el carburo de titanio se pueden soldar fácilmente a otros metales debido a que ambos tienen una matriz metálica: el WC posee una matriz de cobalto y el TiC una aleación de níquel y molibdeno como matriz. Las aplicaciones comunes incluyen la soldadura de puntas de nitruro de boro cúbico o de diamante a insertos de carburos (figs. 22.10 y 22.11) y las puntas de carburo para brocas de mampostería (fig. 23.22). Dependiendo de su estructura particular, los cerámicos y metales también pueden someterse a *unión por difusión*. Quizá sea necesario colocar una capa metálica en la unión para hacerla más resistente.

También se pueden unir o ensamblar componentes cerámicos durante su proceso primario de moldeo; un ejemplo común consiste en sujetar las asas a las tazas de café antes de cocerlas. Por lo tanto, el moldeado de todo el producto se realiza integralmente, en lugar de hacerlo como operación adicional después de que la parte ya está fabricada.

Vidrios. Como se demuestra por la disponibilidad de diversos objetos de vidrio, éstos se pueden unir entre sí con facilidad. Por lo común, esto se hace ablandando primero la superficie a unir, después prensando las dos piezas y enfriándolas. También es posible la unión de vidrio a metales por la difusión de los iones de los metales en la estructura superficial del vidrio. Sin embargo, deben considerarse las diferencias en sus coeficientes de dilatación térmica.

32.7 Economía de las operaciones de unión

Como en la economía de las operaciones de soldadura convencional (que se describen en la sección 31.8), los procesos de unión descritos en este capítulo también dependen en gran medida de diversas consideraciones. Si se revisa la tabla VI.1, se puede observar que, en términos relativos, la distribución de costos de algunos de estos procesos es de la siguiente manera:

- *Los más altos:* soldadura fuerte, tornillos, tuercas y otros sujetadores.
- *Intermedios*: remachado y unión con adhesivos.
- *Bajos*: engargolado y plegado.

Debido a la variedad de procesos comprendidos, a continuación se describen brevemente los costos generales implicados.

Soldadura fuerte

- *Soldadura fuerte manual*: el equipo básico tiene un costo aproximado de $300 dólares, pero puede ser hasta de $50,000+ dólares para sistemas automatizados.
- *Soldadura fuerte en horno*: los costos varían ampliamente, desde alrededor de $2000 dólares para hornos simples por lotes, hasta $300,000+ dólares para hornos de vacío continuo.
- *Soldadura fuerte por inducción:* para pequeñas unidades, el costo es de unos $10,000 dólares.
- *Soldadura fuerte por resistencia:* los costos del equipo son de $1000 dólares para unidades simples hasta $10,000+ dólares para unidades más grandes y complejas.
- *Soldadura fuerte por inmersión:* el costo del equipo varía ampliamente, de $2000 a $200,000+ dólares; el equipo más costoso incluye diversas características de control por computadora.
- *Soldadura fuerte infrarroja:* el costo del equipo va de $500 dólares a $30,000 dólares.
- *Soldadura fuerte por difusión:* el costo del equipo va de $50,000 hasta $300,000 dólares.

Soldadura blanda. El costo del equipo de soldadura blanda depende de su complejidad y del nivel de automatización. El costo es de menos de $100 dólares para cautines manuales de soldadura blanda, hasta $50,000+ dólares para equipo automatizado.

RESUMEN

- Los procesos de unión que no se basan en la fusión o presión en las interfaces incluyen la soldadura fuerte y la soldadura blanda. Estos procesos utilizan material de relleno que requiere cierto aumento de temperatura en la unión. Pueden usarse para unir metales distintos de formas complejas y diversos espesores.
- La unión con adhesivos ha ganado aceptación creciente en industrias importantes, como la automotriz y la aeroespacial. Además de su buena resistencia, los adhesivos tienen otras características favorables, como la capacidad de sellar, aislar, evitar corrosión electroquímica entre metales diferentes y reducir la vibración y el ruido por medio de amortiguamiento interno en la unión.
- La preparación de la superficie y el diseño de la unión son factores importantes en la unión con adhesivos.
- La sujeción mecánica es uno de los métodos de unión más antiguos y usados. Los pernos, tornillos y tuercas son sujetadores comunes de componentes y estructuras de máquinas que tienen la capacidad de separarse a fin de recibir mantenimiento, facilitar su transporte o por muchas otras razones.
- Los remaches son sujetadores semipermanentes o permanentes utilizados en construcciones, puentes y equipo de transporte. Existe una amplia variedad de otros sujetadores y técnicas de sujeción para diversas aplicaciones permanentes o semipermanentes.
- Los termoplásticos se pueden unir mediante técnicas de soldadura por fusión, unión con adhesivos o sujeción mecánica. Por lo general, los termofijos se unen por medios mecánicos (como insertos y sujetadores moldeados) o mediante unión por solventes. Los cerámicos se pueden unir mediante adhesivos y técnicas de metalización. Los vidrios se unen calentando la interfaz y utilizando adhesivos.

TÉRMINOS CLAVE

Adhesivos eléctricamente conductores
Ajuste por contracción
Ajuste por prensado
Aleaciones para soldadura blanda sin plomo
Engargolado
Engrapado de metales
Fundente
Metal de aporte
Pespunteo
Plegado
Preparación de orificios
Remache
Soldadura blanda
Soldadura con olas
Soldadura con pasta o de reflujo
Soldadura fuerte
Soldadura fuerte por oxígeno y gas combustible
Sujeción mecánica
Sujetador de ajuste instantáneo
Sujetadores
Sujetadores roscados
Unión con adhesivos
Unión por solventes

BIBLIOGRAFÍA

Adams, R. D., Comyn, J. y Wake, W. C., *Structural Adhesive Joints in Engineering*, Chapman & Hall, 1997.

ASM Handbook, Vol. 6: *Welding, Brazing, and Soldering*, ASM International, 1993.

Baghdachi, J., *Adhesive Bonding Technology*, Marcel Dekker, 1996.

Bickford, J. H. y Nassar, S. (eds.), *Handbook of Bolts and Bolted Joints*, Marcel Dekker, 1998.

Blake, A., *What Every Engineer Should Know about Threaded Fasteners*, Marcel Dekker, 1983.

Brazing Handbook, 4a. ed., American Welding Society, 1991.

Engineered Materials Handbook, Vol. 3, *Adhesives and Sealants*, ASM International, 1991.
Hamrock, B. J., Jacobson, B. y Schmid, S. R., *Fundamentals of Machine Elements*, McGraw-Hill, 1998.
Handbook of Plastics Joining: A Practical Guide, William Andrew, Inc., 1996.
Humpston, G. y Jacobson, D. M., *Principles of Soldering*, ASM International, 2004.
Hwang, J. S., *Modern Solder Technology for Competitive Electronics Manufacturing*, McGraw-Hill, 1996.
Jacobson, D. M. y Humpston, G., *Principles of Brazing*, ASM International, 2005.
Lambert, L., *Soldering for Electronic Assemblies*, Marcel Dekker, 1988.
Landrock, A. H., *Adhesives Technology Handbook*, Noyes, 1985.
Lee, L.-H., *Adhesive Bonding*, Plenum, 1991.
Lincoln, B., Gomes, K. J. y Braden, J. F., *Mechanical Fastening of Plastics*, Marcel Dekker, 1984.
Manko, H. H., *Soldering Handbook for Printed Circuits and Surface Mounting*, Van Nostrand Reinhold, 1995.
_____, *Solders and Soldering—Materials, Design, Production, and Analysis for Reliable Bonding*, McGraw-Hill, 1992.
Messler, R. W., Jr., *Joining of Advanced Materials*, Butterworth—Heinemann, 1993.
Nicholas, M. G., *Joining Processes: Introduction to Brazing and Diffusion Bonding*, Chapman & Hall, 1998.
Parmley, R. O. (ed.), *Standard Handbook of Fastening and Joining*, 3a. ed., McGraw-Hill, 1997.
Peaslee, R. L., *Brazing Footprints: Case Studies in High-Temperature Brazing*, Wall Colmonoy Corp., 2003.
Pecht, M. G., *Soldering Processes and Equipment*, Wiley, 1993.
Petrie, E. M., *Handbook of Adhesives and Sealants*, McGraw-Hill, 1999.
Rahn, A., *The Basics of Soldering*, Wiley Interscience, 1993.
Sadek, M. M., *Industrial Applications of Adhesive Bonding*, Elsevier, 1987.
Satas, D. (ed.), *Handbook of Pressure Sensitive Adhesive Technology*, 3a. ed., Satas & Associates, 1999.
Schwartz, M. M., *Brazing*, 2a. ed., ASM International, 2003.
_____, *Ceramic Joining*, ASM International, 1990.
_____, *Joining of Composite-Matrix Materials*, ASM International, 1994.
Shields, J., *Adhesives Handbook*, 3a. ed., Butterworths, 1984.
Skeist, I., *Handbook of Adhesives*, 3a. ed., Van Nostrand Reinhold, 1990.
Speck, J. A., *Mechanical Fastening, Joining, and Assembly*, Marcel Dekker, 1997.
Welding Handbook, 8a. ed., 3 vols., American Welding Society, 1987.
Woodgate, R. W., *Handbook of Machine Soldering*, Wiley, 1996.

PREGUNTAS DE REPASO

32.1 Explique el principio en el que se basa la soldadura fuerte.
32.2 ¿Cuál es la diferencia entre soldadura fuerte convencional y por oxígeno y gas combustible?
32.3 ¿Son necesarios los fundentes en la soldadura fuerte? Si es así, ¿por qué?
32.4 ¿Cree que es aceptable diferenciar arbitrariamente la soldadura fuerte de la soldadura blanda por la temperatura de aplicación? Coméntelo.
32.5 ¿Por qué es importante la preparación de la superficie en la unión con adhesivos?
32.6 ¿Por qué se han desarrollado métodos de unión mecánica? Dé varios ejemplos específicos de sus aplicaciones.
32.7 Describa las similitudes y diferencias entre las funciones de un perno y las de un remache.
32.8 ¿Qué precauciones deben tomarse en la unión mecánica de metales diferentes?
32.9 ¿Qué dificultades están implícitas en la unión de plásticos? ¿Por qué?
32.10 ¿Qué es la soldadura con olas?
32.11 ¿Qué es una prueba de desprendimiento? ¿Por qué es útil?
32.12 ¿Cómo se aplica el metal de aporte en la soldadura fuerte en horno?
32.13 ¿Por qué no se utiliza soldadura al unir componentes eléctricos a tarjetas de circuitos?
32.14 Describa algunas aplicaciones en la manufactura de cintas adhesivas de un solo lado y algunas de doble lado.

PROBLEMAS CUALITATIVOS

32.15 Comente sus observaciones sobre las uniones mostradas en las figuras 32.3 y 32.6.
32.16 ¿En qué se diferencia la unión con adhesivos de otros métodos de unión? ¿Qué limitaciones tiene?
32.17 Comente la necesidad de soportes fijos para sostener piezas de trabajo en los procesos de unión descritos en este capítulo.
32.18 Por lo general, se aplica soldadura blanda a los componentes más delgados. Explique por qué.

32.19 Explique por qué las uniones hechas con adhesivos tienden a ser débiles ante el desprendimiento.
32.20 Es una práctica común estañar **bornes** eléctricos para facilitar la soldadura blanda. ¿Por qué se utiliza estaño?
32.21 ¿Cuán importante es un ajuste estrecho entre dos partes que se van a unir por soldadura fuerte?
32.22 Si se está diseñando una unión que necesita ser resistente y también es necesario desensamblarse algunas veces durante la vida del producto, ¿qué tipo de unión se utilizaría? Explique su respuesta.
32.23 Loctite® es un adhesivo usado para evitar que los tornillos se aflojen con la vibración; básicamente, pega el tornillo a la tuerca y el orificio roscado. Explique cómo funciona.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

32.24 Observe las uniones simples a tope y de traslape mostradas en la parte superior izquierda de la figura 32.10. *(a)* Suponiendo que el área de la unión a tope es de 3 mm × 20 mm y consultando las propiedades de los adhesivos en la tabla 32.3, calcule la fuerza de tensión mínima y máxima que puede soportar esta unión. *(b)* Calcule estas fuerzas para la unión de traslape suponiendo que su área es de 15 mm × 15 mm.
32.25 En la figura 32.12a, suponga que la sección transversal de la unión de traslape es de 20 mm × 20 mm y que el diámetro del remache sólido es de 5 mm y está hecho de cobre. Utilizando el adhesivo más resistente mostrado en la tabla 32.3, calcule la máxima fuerza de tensión que puede soportar esta unión.
32.26 Como se muestra en la figura 32.15a, un remache puede pandearse si es demasiado largo. Tomando en consideración la referencia al capítulo 14 sobre forjado, calcule la máxima relación de longitud a diámetro de un remache, de manera que no se pandee durante el remachado.
32.27 En la figura 32.4 se muestra cualitativamente la resistencia a la tensión y cortante de la soldadura fuerte en función de la holgura de la unión. Busque en la bibliografía técnica, consiga información y represente cuantitativamente estas curvas. Comente sus observaciones.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

32.28 Examine diversos productos domésticos y describa cómo se unen y ensamblan sus componentes. Explique por qué se utilizan dichos procesos.
32.29 Mencione varios productos que se hayan ensamblado mediante: *(a)* engargolado; *(b)* engrapado, y *(c)* soldadura blanda.
32.30 Sugiera métodos de sujeción de una barra redonda (fabricada con un plástico termofijo) de manera perpendicular a una placa metálica plana. Comente sus resistencias.
32.31 Describa las herramientas y el equipo que son necesarios para realizar las operaciones de engargolado de doble seguro mostradas en la figura 32.17. Inicie con una lámina plana.
32.32 Prepare una lista de lineamientos de diseño de uniones por los procesos descritos en este capítulo. ¿Serían comunes estos lineamientos para la mayoría de los procesos? Explique su respuesta.
32.33 ¿Qué métodos de unión serían adecuados para ensamblar una cubierta termoplástica sobre un bastidor metálico? Suponga que la cubierta se retira periódicamente, como la tapa de una lata de café.
32.34 Responda el problema 32.33, pero para una tapa fabricada con: *(a)* un termofijo; *(b)* un metal, y *(c)* un cerámico. Describa los factores comprendidos en su selección de métodos.
32.35 Comente las limitaciones de tamaño y forma de la pieza de trabajo (en su caso) para cada uno de los procesos descritos en este capítulo.
32.36 Describa las formas de las partes que no pueden unirse por los procesos explicados en este capítulo. Proporcione ejemplos específicos.
32.37 Describa las similitudes y diferencias entre los procesos descritos en este capítulo y los presentados en los capítulos 30 y 31.
32.38 Proporcione ejemplos de productos en los que quizá sea necesario extraer los remaches en una estructura o ensamble y después reemplazarlos con nuevos remaches.
32.39 Utilizando la Internet, investigue la geometría de las cabezas de tornillos que son sujetadores permanentes; es decir, las que pueden atornillarse, pero ya no pueden extraerse.
32.40 Consiga un cautín de soldadura blanda e intente soldar dos alambres. Primero, intente aplicar la soldadura blanda al mismo tiempo que coloca la punta del cautín en los alambres. Después, precaliente los cables antes de aplicar la soldadura blanda. Repita el mismo procedimiento para una superficie fría y una caliente. Anote sus resultados y explique sus hallazgos.
32.41 Investigue en la bibliografía para determinar las propiedades y tipos de adhesivos utilizados para sujetar caderas artificiales al fémur humano.
32.42 Utilizando dos cintas de acero de 1 pulgada de ancho y 8 pulgadas de largo, diseñe y fabrique una unión que proporcione la máxima resistencia en una prueba de tensión en dirección longitudinal.

PARTE

VII

Tecnología de superficies

Nuestro primer contacto visual o táctil con los objetos que nos rodean es a través de sus **superficies.** Podemos ver o sentir la rugosidad, textura, ondulación, color, reflectividad y otras características como rayaduras y abolladuras de las superficies. En los capítulos anteriores, se describieron las propiedades de los materiales y componentes manufacturados, básicamente en términos de sus características volumétricas, como resistencia, ductilidad, dureza y tenacidad. Además, se incluyeron algunas descripciones de la influencia de las superficies sobre estas propiedades, como el efecto de la preparación de las superficies en la vida a la fatiga y la sensibilidad de los materiales frágiles a rayaduras superficiales.

La maquinaria y los accesorios tienen muchas partes que se deslizan entre sí: pistones y cilindros, guías, rodamientos, así como herramentales y matrices para corte y formado. Un examen cuidadoso revela que *(a)* algunas de estas superficies son lisas, en tanto que otras son rugosas; *(b)* algunas están lubricadas, mientras que otras están secas; *(c)* algunas se someten a cargas pesadas, en tanto que otras soportan cargas ligeras; *(d)* algunas se someten a temperaturas elevadas (matrices para trabajo en caliente), mientras que otras están a temperatura ambiente, y *(e)* algunas superficies se deslizan entre sí a altas velocidades relativas (altas velocidades de corte), en tanto que otras se mueven lentamente (la consola en una fresa o el carro en la bancada de una máquina herramienta).

Además de sus características geométricas, una superficie constituye una capa delgada en la masa del material. Las propiedades físicas, químicas, metalúrgicas y mecánicas de una superficie dependen no sólo del material y su historia de procesamiento, sino también del ambiente al que se expone la superficie. El término **integridad superficial** se utiliza para describir sus características físicas, químicas y mecánicas.

Debido a los diversos efectos mecánicos, físicos, térmicos y químicos que se producen por su historia de procesamiento, la superficie de una parte manufacturada suele poseer propiedades y comportamiento que son significativamente diferentes a las del resto de su volumen. Por lo común, aunque el volumen del material determina las propiedades mecánicas generales del componente, sus superficies influyen directamente en el desempeño de la parte en las siguientes áreas (fig. VII.1):

- Fricción y desgaste de los herramentales, moldes y matrices, así como de los productos fabricados con ellos.
- Eficacia de los lubricantes durante el proceso de manufactura y a lo largo de la vida útil de la parte.
- Apariencia y rasgos geométricos de la parte y su papel en operaciones posteriores, como soldadura, soldadura blanda, unión con adhesivos, pintura y recubrimiento, así como resistencia a la corrosión.

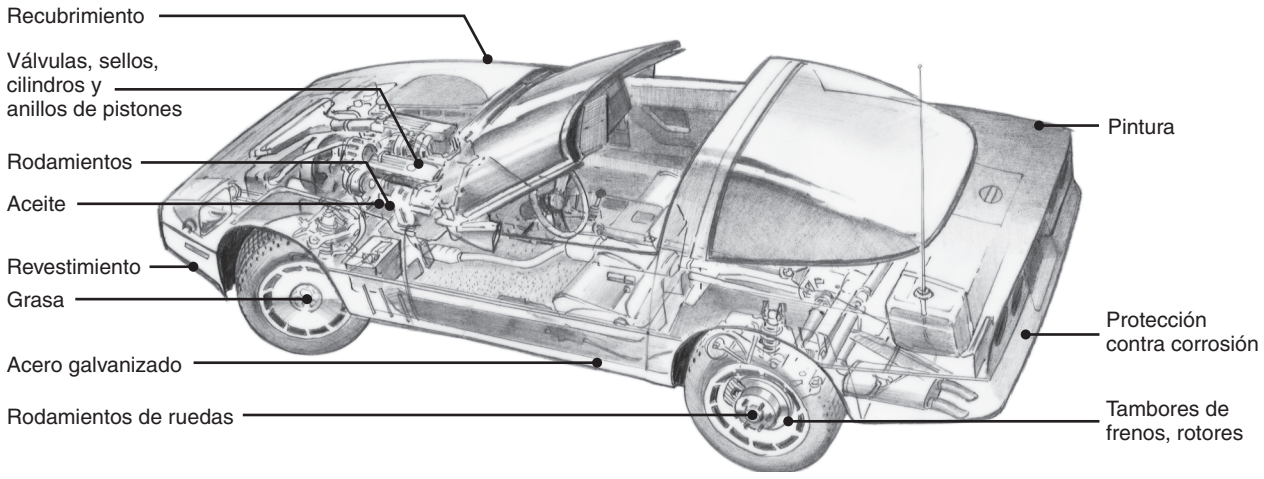


FIGURA VII.1 Componentes de un automóvil común que se relacionan con los temas descritos en la parte VII.

- Inicio de agrietamientos debido a defectos superficiales como rugosidad, raspaduras, costuras y zonas afectadas por el calor, que pueden producir debilitamiento y fallas prematuras de la parte, como fatiga total.
- Conductividad térmica y eléctrica de los cuerpos en contacto. Por ejemplo, las superficies rugosas tienen resistencias térmica y eléctrica superiores a las de las superficies lisas.

Siguiendo el esquema mostrado en la figura VII.2, en esta parte del libro se presentan las características de las superficies en términos de su estructura y topografía. Después se describen las variables de los materiales y procesos que influyen en la fricción y desgaste de los materiales. Es posible utilizar diversos métodos mecánicos, térmicos, eléctricos y químicos a fin de modificar superficies para mejorar su comportamiento a la fricción, eficacia de los lubricantes, resistencia al desgaste y a la corrosión, acabado superficial y apariencia.

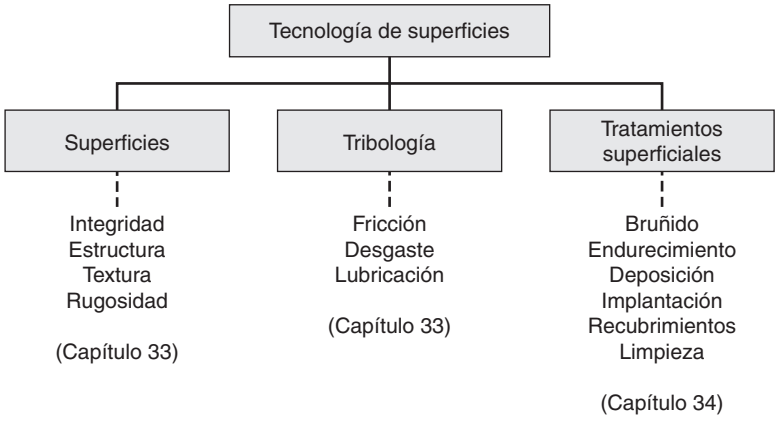
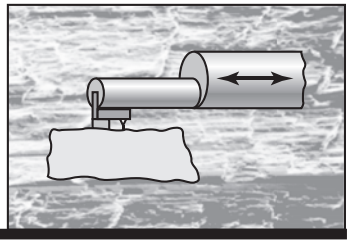


FIGURA VII.2 Esquema de los temas cubiertos en la parte VII.

CAPÍTULO

33 Rugosidad y medición superficial; fricción, desgaste y lubricación



33.1 Introducción 1036
33.2 Estructura e integridad superficial 1037
33.3 Textura y rugosidad superficial 1038
33.4 Fricción 1043
33.5 Desgaste 1046
33.6 Lubricación 1050
33.7 Fluidos para el trabajo de los metales y su selección 1052

EJEMPLO:

33.1 Determinación del coeficiente de fricción 1045

En este capítulo se describen las características de las superficies que tienen un efecto directo en los procesos de manufactura y la vida útil de las partes producidas. En específico se presentan:

- Rasgos superficiales como rugosidad, textura y direccionalidad.
- La naturaleza de la fricción y su cuantificación.
- Factores implícitos en el desgaste y la reducción del desgaste.
- Tipos de lubricación y sus efectos en las operaciones de manufactura.
- Características, selección y aplicaciones de los fluidos para el trabajo de los metales.

33.1 Introducción

Este capítulo se inicia con una descripción de la naturaleza de las superficies, que son entidades distintivas; sus propiedades son significativamente diferentes de las de la masa, sobre todo por la presencia de diversas capas superficiales de óxido. En una superficie pueden existir distintos defectos, dependiendo de la manera en que se haya generado la superficie. Estos defectos (así como diversas texturas superficiales) pueden tener una influencia importante en la integridad superficial de las piezas de trabajo, los herramentales y las matrices.

Se describen dos métodos comunes de medición de la rugosidad superficial en la práctica de ingeniería, incluyendo la instrumentación comprendida y una breve explicación de los requisitos de rugosidad superficial en la práctica de ingeniería. Debido a su creciente importancia en la manufactura de precisión y la nanofabricación, también se tratan e ilustran las mediciones superficiales tridimensionales.

En este capítulo también se describen los aspectos de *fricción, desgaste* y *lubricación*, que en forma conjunta se conocen como *tribología*, los cuales son importantes para los procesos y las operaciones de manufactura y para la vida útil de los productos. Primero se describe la fricción y el desgaste de los materiales metálicos y no metálicos y la manera en que los afectan las diversas variables de los materiales y procesos. Es necesario comprender estas relaciones a fin de seleccionar en forma apropiada los materiales para herramentales y matrices, así como los fluidos apropiados para trabajo de los metales de una operación en particular. El desgaste tiene un impacto económico importante, pues se calcula que (tan sólo en Estados Unidos) el costo total de reemplazo de partes desgastadas es mayor a $100 mil millones de dólares al año.

Después se describen los fundamentos de los fluidos de trabajo de los metales, incluyendo los tipos, características y aplicación de lubricantes líquidos y sólidos de uso común y las prácticas de lubricación empleadas. También se remarca la importancia de

consideraciones biológicas y ambientales en el uso, aplicación, reciclado y desecho final de los fluidos de trabajo de los metales.

33.2 Estructura e integridad superficial

Al examinar con cuidado la superficie de una pieza de trabajo metálica, se encuentra que por lo general consta de varias capas (fig. 33.1):

1. El metal *interior o de volumen* (también conocido como *substrato* metálico) tiene una estructura que depende de la composición y la historia de procesamiento del metal.
2. Arriba de este substrato metálico se encuentra una capa, que por lo común ya ha sido deformada plásticamente y endurecida por trabajo, en mayor medida que el volumen durante el proceso de manufactura. La profundidad y las propiedades de la capa endurecida por trabajo (*estructura superficial*) depende de factores como el método de procesamiento utilizado y la cantidad de deslizamiento por fricción a la que se somete la superficie. Por ejemplo, si ésta se produce por maquinado mediante una herramienta sin filo y desgastada, o se rectifica con un disco de rectificado sin filo, la capa será un tanto gruesa y por lo general tendrá esfuerzos residuales.
3. A menos que el metal se procese y mantenga en un ambiente inerte (libre de oxígeno) o sea un metal noble (como el oro o platino), se forma una *capa de óxido* sobre la capa endurecida por trabajo. Por lo común, el óxido en una superficie metálica es mucho más duro que el metal base, de ahí que sea más abrasivo. En consecuencia, tiene efectos importantes sobre la fricción, el desgaste y la lubricación. Por ejemplo:
   - El *hierro* tiene una estructura de óxido con FeO adyacente al volumen metálico, seguido de una capa de Fe_3O_4 y después una capa de Fe_2O_3 (que se expone al ambiente).
   - El *aluminio* tiene una capa densa, amorfa (sin estructura cristalina) de Al_2O_3 con una capa gruesa, porosa e hidratada de óxido de aluminio sobre ésta.
   - El *cobre* tiene una superficie brillante, resplandeciente cuando se acaba de rayar o maquinar. Sin embargo, poco después desarrolla una capa de Cu_2O, la cual se cubre con una capa de CuO. Esto proporciona al cobre su color un tanto deslustrado.
   - Los *aceros inoxidables* son "inoxidables" porque desarrollan una capa de protección de óxido de cromo (*pasivación*), como se describe en la sección 3.8.
4. En condiciones ambientales normales, las capas superficiales de óxido se cubren generalmente con capas *adsorbidas* de gas y humedad.
5. Por último, la superficie extrema del metal puede cubrirse con *contaminantes* como suciedad, polvo, grasa, residuos de lubricante, residuos de compuestos para limpieza y contaminantes ambientales.

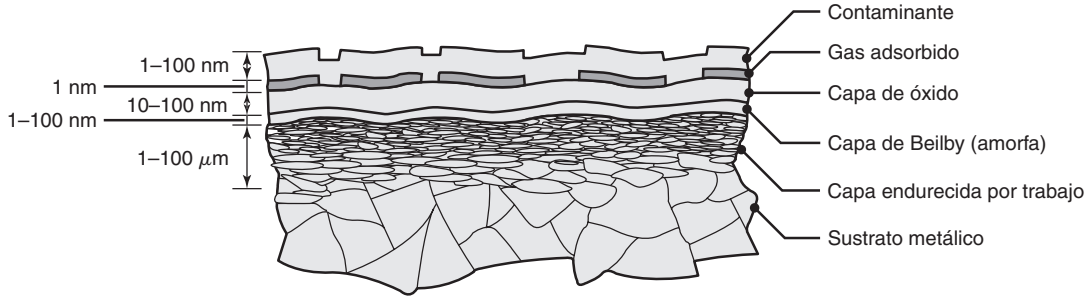


FIGURA 33.1 Esquema de una sección transversal de la estructura superficial de los metales. El espesor de las capas individuales depende de las condiciones y el ambiente de procesamiento. *Fuente*: E. Rabinowicz y B. Bhushan.

Se puede observar que las superficies tienen propiedades que, por lo general, son muy diferentes de las del material del substrato. Los factores que corresponden a las estructuras superficiales de los metales que se acaban de describir también son factores en la estructura superficial de plásticos y cerámicos. La textura superficial de estos materiales depende (como con los metales) del método de producción.

Integridad superficial. La integridad superficial describe no sólo los rasgos topológicos (geométricos) de las superficies y sus propiedades físicas y químicas, sino también sus propiedades mecánicas y metalúrgicas. La integridad superficial es un factor que debe considerarse en las operaciones de manufactura, debido a que influye en muchas propiedades como resistencia a la fatiga, resistencia a la corrosión y vida útil (por ejemplo, ver fig. 2.28).

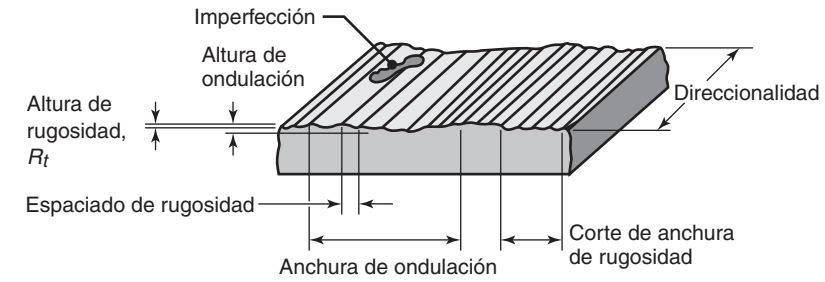
Diversos defectos superficiales producidos durante la manufactura de componentes pueden ser responsables de que la integridad superficial sea inapropiada. Por lo regular, son causados por una combinación de factores como *(a)* defectos en el material original; *(b)* el método por el que se produce la superficie, y *(c)* la falta de control apropiado de los parámetros del proceso (que pueden producir excesivos esfuerzos, temperaturas o deformación superficial).

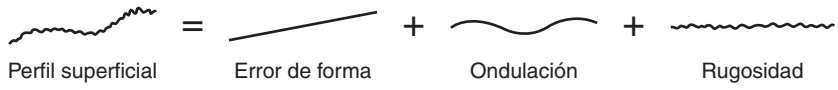
A continuación se presentan las definiciones generales de los **defectos superficiales** principales (descritos en orden alfabético) que se encuentran en la práctica:

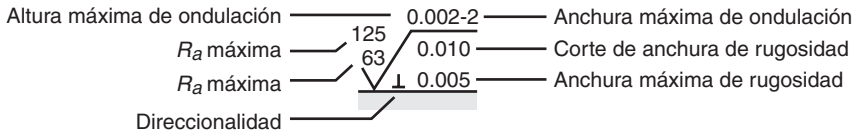
- **Ataque intergranular:** es el debilitamiento de los límites de los granos debido a la fragilización y corrosión líquido-metal.
- **Cráteres:** son depresiones profundas.
- **Deformación plástica superficial:** es una deformación superficial severa causada por altos esfuerzos debido a factores como fricción, geometría de los herramentales y matrices, herramientas desgastadas y métodos de procesamiento.
- **Esfuerzos residuales** (tensión o compresión) en la superficie: se producen por la deformación irregular y la distribución no uniforme de la temperatura.
- **Grietas:** pueden ser externas o internas; las grietas que requieren una amplificación de 10× o más para poder verse a simple vista se conocen como **microgrietas**.
- **Inclusiones:** son elementos o compuestos pequeños, no metálicos, en el material.
- **Picaduras:** son depresiones superficiales profundas, por lo general debido a algún ataque químico o físico.
- **Salpicadura:** son pequeñas partículas metálicas, fundidas y resolidificadas, que se depositan en una superficie, como durante la soldadura.
- **Transformaciones metalúrgicas:** comprenden cambios microestructurales provocados por los ciclos de temperatura del material; éstos pueden consistir en transformaciones de fase, recristalización, agotamiento de la aleación, descarburado y material fundido y refundido, resolidificado o redepositado.
- **Traslapes, pliegues** y **costuras:** son defectos superficiales resultantes del solapamiento de material durante el procesamiento.
- **Zona afectada por el calor:** es la parte de un metal que se somete a ciclos térmicos sin fundirse, como la que se muestra en la figura 30.17.

33.3 Textura y rugosidad superficial

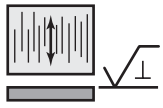
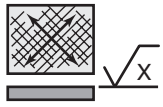
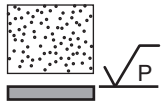
Sin importar el método de producción, todas las superficies tienen características que, en conjunto, se conocen como **textura superficial**. Aunque la descripción de textura superficial como propiedad geométrica es compleja, se han establecido ciertos lineamientos para identificarla en términos de cantidades bien definidas y cuantificables (fig. 33.2).







(a)

Símbolo de la direccionalidad	Interpretación	Ejemplos
=	Direccionalidad paralela a la línea que representa la superficie a la que se aplica el símbolo	
⊥	Direccionalidad perpendicular a la línea que representa la superficie a la que se aplica el símbolo	
X	Direccionalidad angular en ambas direcciones a la línea que representa la superficie a la que se aplica el símbolo	
P	Direccionalidad picada, protuberante, porosa o de partículas sin dirección	

(b)

FIGURA 33.2 *(a)* Terminología y símbolos estándar para describir el acabado superficial. Las cantidades están dadas en μin. *(b)* Símbolos comunes de direccionalidad superficial.

- Las **imperfecciones** o **defectos** son irregularidades aleatorias, como raspaduras, grietas, orificios, depresiones, costuras, desgarramientos o inclusiones.
- La **direccionalidad** o **sesgo** es la dirección del modelo superficial predominante, por lo general perceptible a simple vista.
- La **rugosidad** se define como las desviaciones irregulares en pequeña escala espaciadas estrechamente; se expresa en términos de su peso, anchura y distancia a lo largo de la superficie.
- La **ondulación** es la desviación recurrente de una superficie plana; se mide y describe en términos del espacio entre las crestas adyacentes de las ondas (*anchura de ondulación*) y la altura entre las crestas y valles de las ondas (*altura de ondulación*).

Por lo general, la **rugosidad superficial** se describe mediante dos métodos. El **valor medio aritmético** (R_a) se basa en el esquema de una superficie rugosa, como se muestra en la figura 33.3. Se define como:

$$R_a = \frac{a + b + c + d + \cdots}{n} \tag{33.1}$$

en donde todas las ordenadas, a, b, c, ..., son valores absolutos y n es la cantidad de lecturas.

La **rugosidad de la raíz media cuadrática** (R_q, que anteriormente se identificaba como *RMS*) se define como:

$$R_q = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + \cdots}{n}} \tag{33.2}$$

La línea de referencia AB en la figura 33.3 se localiza de manera que la suma de las áreas arriba de la línea es igual a la suma de las áreas debajo de la misma.

También se puede utilizar la **altura máxima de rugosidad** (R_t), que se define como la altura de la depresión más profunda hasta la cresta más elevada. Indica cuánto material tiene que retirarse para obtener una superficie lisa, por ejemplo, mediante pulido.

Por lo general, las unidades utilizadas para la rugosidad superficial son μm (micras) o μin. Obsérvese que 1 μm = 40 μpulg, o 1 μpulg = 0.025 μm.

Debido a su simplicidad, el valor medio aritmético (R_a) se adoptó internacionalmente a mediados de la década de 1950 y su uso es amplio en la práctica de ingeniería. Las ecuaciones 33.1 y 33.2 muestran que existe una relación entre R_q y R_a, como se muestra mediante la relación R_q/R_a. Esta relación para superficies comunes producidas mediante procesos de maquinado y acabado es la siguiente: corte, 1.1; rectificado, 1.2 y lapeado y honeado, 1.4.

En general, una superficie no se puede describir sólo por su valor R_q o R_a, ya que estos valores son promedios. Dos superficies pueden tener el mismo valor de rugosidad, pero contar con una topografía real muy diferente. Por ejemplo, ciertas depresiones profundas en una superficie de algún modo lisa no afectan de manera significativa los valo-

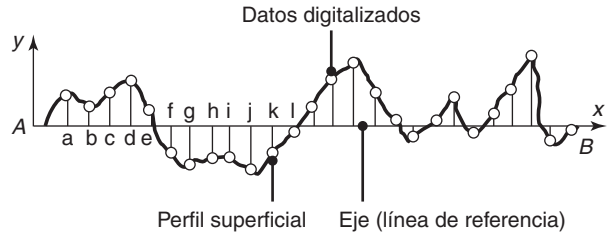


FIGURA 33.3 Coordenadas utilizadas para medir la rugosidad superficial empleando las ecuaciones 33.1 y 33.2.

res de rugosidad. Sin embargo, el tipo de perfil superficial puede ser significativo en términos de las características de fricción, desgaste y fatiga de un producto manufacturado. Por lo tanto, es importante analizar una superficie con gran detalle, en particular las partes a utilizar en aplicaciones críticas.

Símbolos para la rugosidad superficial. En los dibujos técnicos, los límites aceptables de la rugosidad superficial se especifican mediante símbolos, que por lo general se muestran alrededor de la marca de verificación en la parte baja de la figura 33.2a; los valores de estos límites se colocan a la izquierda de la marca. En la figura 33.2b se presentan los símbolos y sus significados respecto de la direccionalidad. Obsérvese que el símbolo de direccionalidad se coloca en la parte inferior derecha de la marca. Los símbolos utilizados para describir una superficie especifican sólo su rugosidad, ondulación y direccionalidad; no incluyen las imperfecciones. Por lo tanto, siempre que es necesario se incluye una nota especial en los dibujos técnicos para describir el método que debe usarse a fin de inspeccionar las imperfecciones superficiales.

Medición de la rugosidad superficial. Por lo general, se utilizan instrumentos conocidos como **rugosímetros superficiales** para medir y registrar la rugosidad superficial.

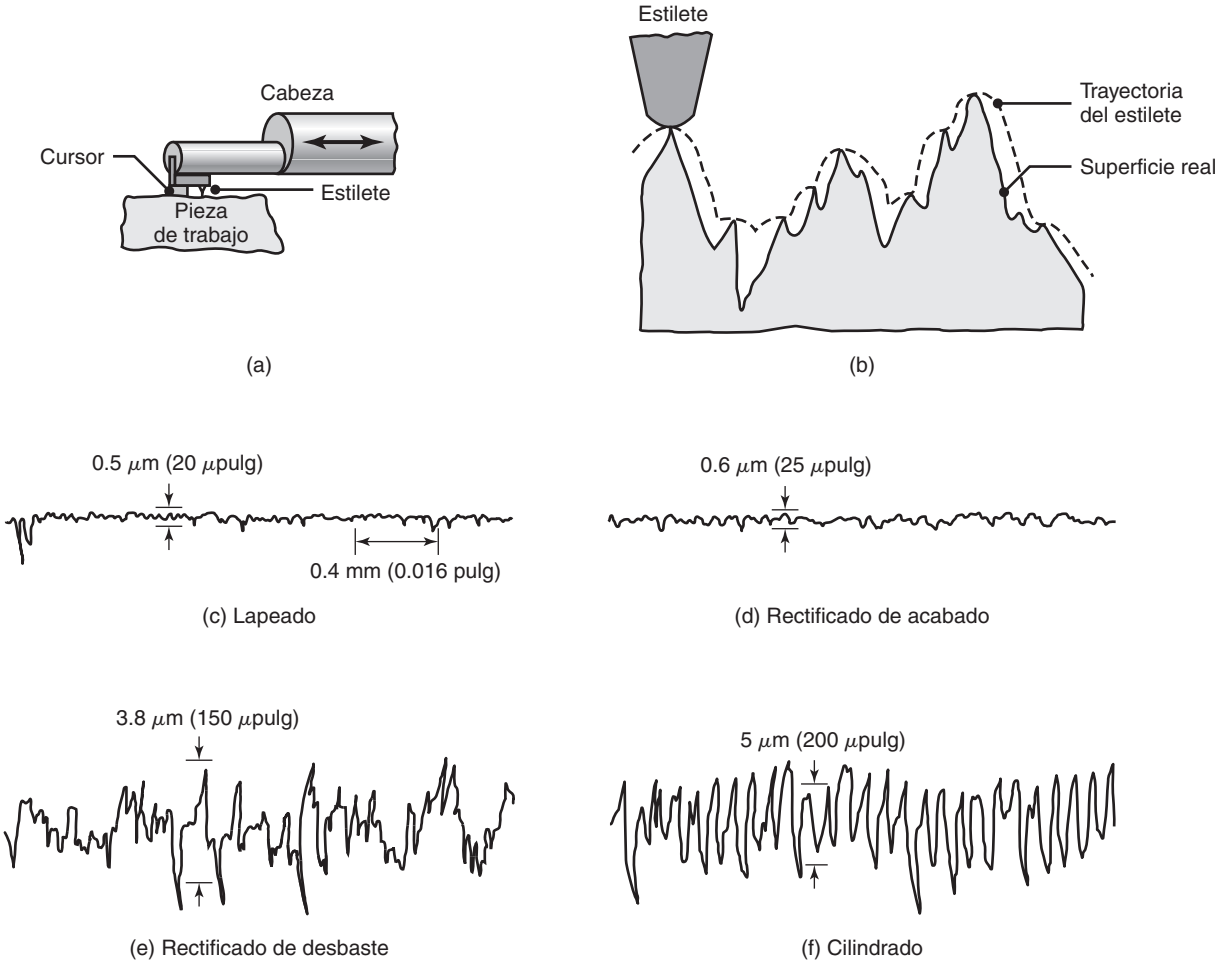


FIGURA 33.4 *(a)* Medición de la rugosidad superficial con un estilete. El cursor soporta el estilete y lo protege contra daños. *(b)* Trayectoria del estilete en mediciones de rugosidad superficial (línea punteada), en comparación con el perfil real de rugosidad. Obsérvese que el perfil de la trayectoria del estilete es más liso que el de la superficie real. *(c)* a *(f)* Perfiles superficiales comunes producidos por diversos procesos de maquinado y acabado superficial. Nótese la diferencia entre las escalas verticales y horizontales.

Un rugosímetro tiene un *estilete de diamante* que avanza en línea recta sobre la superficie (fig. 33.4a). A la distancia que avanza el estilete se le conoce como **recorrido**, que por lo regular va de 0.08 mm a 25 mm (0.003 a 1 pulgada). Un recorrido de 0.8 mm (0.03 pulgada) es común para la mayoría de las aplicaciones de ingeniería. El método empírico es que el recorrido debe ser lo suficientemente grande para incluir 10 a 15 irregularidades de rugosidad, así como toda la ondulación superficial.

Para resaltar la rugosidad, se registran las trazas del rugosímetro en una escala vertical exagerada (algunos órdenes de magnitud más grandes que la escala horizontal; ver fig. 33.4c a la f); a la magnitud de la escala se le conoce como **ganancia** en el instrumento de registro. Por lo tanto, el perfil registrado se distorsiona de manera significativa y la superficie parece ser mucho más rugosa de lo que realmente es. El instrumento de registro compensa cualquier ondulación superficial; indica sólo la rugosidad.

Debido al radio finito de la punta de diamante del estilete, la trayectoria de este último es diferente de la superficie real (obsérvese la trayectoria con la línea punteada en la fig. 33.4b) y la rugosidad medida es inferior. El diámetro de la punta del estilete más utilizado es 10 μm (400 μpulg). Cuanto más pequeño es el diámetro del estilete y más lisa la superficie, más cercana será la trayectoria del estilete al perfil superficial real.

La rugosidad superficial puede observarse de manera directa a través de un *microscopio electrónico de barrido* u *óptico*. Las fotografías estereoscópicas son útiles particularmente para vistas tridimensionales de superficies y también se pueden usar para medir la rugosidad superficial.

Medición superficial tridimensional. Debido a que las propiedades superficiales pueden variar en forma significativa dependiendo de la dirección en la que se toma una traza del rugosímetro, con frecuencia existe la necesidad de medir perfiles superficiales tridimensionales. En el caso más simple, esto se puede realizar con un rugosímetro superficial que tiene la capacidad de indexar una distancia corta entre trazas. Se han desarrollado muchas otras opciones, dos de las cuales son interferómetros ópticos y microscopios de fuerza atómica.

Los *microscopios de interferencia óptica* destellan una luz contra una superficie reflectiva y registran las franjas de interferencia que se producen por la onda incidente y su onda reflejada. Esta técnica permite medir en forma directa la pendiente superficial sobre el área de interés. Al cambiar la distancia vertical entre la muestra y el objetivo de interferencia, los modelos de franjas también cambian, permitiendo así una medición de la altura superficial.

Los *microscopios de fuerza atómica* (AFM, por sus siglas en inglés) se utilizan para medir superficies muy lisas y tienen la capacidad de distinguir átomos en superficies atómicamente lisas. En principio, un AFM es sólo un rugosímetro de superficies muy finas con un láser que se usa para medir alturas. El perfil superficial puede medirse con alta precisión y resolución vertical en la escala atómica, y las áreas de escaneo pueden ser del orden de 100 μm cuadradas, aunque son muy comunes áreas más pequeñas.

Rugosidad superficial en la práctica de ingeniería. Los requisitos para el diseño de la rugosidad superficial en las aplicaciones comunes de ingeniería varían hasta por dos órdenes de magnitud. Algunos ejemplos son:

Bolas de rodamientos	0.025 μm (1 μpulg)
Rodamientos de cigüeñales	0.32 μm (13 μpulg)
Tambores de frenos	1.6 μm (63 μpulg)
Caras de discos de embragues	3.2 μm (125 μpulg)

Debido a las diversas variables de materiales y procesos comprendidos, el intervalo de rugosidad producida, incluso dentro del mismo proceso de manufactura, puede ser significativo.

33.4 Fricción

La *fricción* desempeña un papel importante en los procesos de manufactura debido al movimiento relativo y las fuerzas que siempre se presentan en herramentales, matrices y piezas de trabajo. La fricción *(a)* disipa energía (generando así calor, que puede tener efectos perjudiciales en una operación), y *(b)* impide el libre movimiento en las interfaces (por lo que la fricción puede afectar de manera significativa el flujo y la deformación de los materiales en los procesos de conformado de los metales). Por otro lado, la fricción no siempre es indeseable; por ejemplo, sin fricción sería imposible laminar metales, sujetar piezas de trabajo en las máquinas o sostener brocas en los mandriles.

Existen muchas explicaciones del fenómeno de la fricción. Una teoría comúnmente aceptada es la **teoría de la adhesión**, que se basa en la observación de que dos superficies limpias y secas (sin importar cuán lisas sean) entran en contacto entre si (*unión*) en tan sólo una fracción de su área de contacto aparente (fig. 33.5). La pendiente máxima de la superficie suele variar entre 5° y 15°. En dicha situación, la carga normal (de contacto), *N*, está soportada por las diminutas **asperezas** (pequeñas proyecciones de la superficie) que están en contacto entre sí. Por lo tanto, los esfuerzos normales en estas asperezas son altos; esto causa *deformación plástica* en las uniones. Su contacto crea una *unión adhesiva*; las asperezas forman *microsoldaduras*. La soldadura a presión en frío (ver sección 31.2) se basa en este principio a gran escala.

Otra teoría de la fricción es la **teoría de la abrasión**, que se basa en la idea de que la aspereza de una superficie dura (como una herramienta) penetra y rebaja una superficie más blanda (pieza de trabajo). La penetración *(a)* puede causar desplazamiento del material, y *(b)* producir pequeñas virutas o astillas, como en los procesos de corte y abrasivos. Se han sugerido muchas otras explicaciones sobre el comportamiento de la fricción; sin embargo, para la mayoría de las aplicaciones en manufactura son más importantes los mecanismos de adhesión y abrasión.

El movimiento de deslizamiento entre dos cuerpos que tienen una interfaz sólo es posible si se aplica una *fuerza tangencial*. Se requiere dicha fuerza para *cizallar* las uniones o hacer un surco en el material más blando; se conoce como **fuerza de fricción**, *F*. La relación de *F/N* (fig. 33.5a) es el **coeficiente de fricción,** μ. Dependiendo de los materiales y procesos comprendidos, los coeficientes de fricción varían de modo significativo en la manufactura. Por ejemplo, en los procesos de formado de metales es de alrededor de 0.03 para trabajos en frío y hasta de 0.7 para trabajo en caliente; y de 0.5 hasta 2 para maquinado.

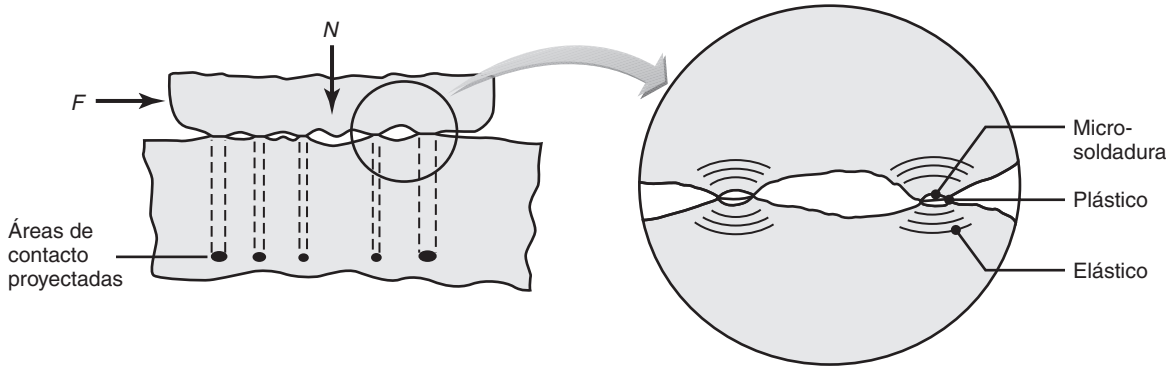


FIGURA 33.5 Esquema de la interfaz de dos cuerpos en contacto que muestran áreas reales de contacto en las asperezas. En las superficies de ingeniería, la relación de las áreas de contacto aparente a real puede ser tan alta como 4 a 5 órdenes de magnitud.

Casi toda la energía disipada para vencer la fricción se convierte en calor (una pequeña fracción se transforma en energía almacenada en las regiones deformadas plásticamente; ver sección 1.6), elevando la temperatura de la interfaz. La temperatura aumenta con la fricción, la rapidez de deslizamiento, la conductividad térmica decreciente y el calor específico decreciente de los materiales de deslizamiento. La temperatura de la interfaz puede ser lo bastante alta para suavizar e incluso fundir las superficies y, en algunas ocasiones, provocar cambios microestructurales. La temperatura también afecta la viscosidad y otras propiedades de los lubricantes, causando su ruptura. Obsérvese, por ejemplo, cómo se queman y degradan la mantequilla y el aceite cuando las temperaturas son excesivas. A su vez, estos resultados afectan de manera adversa las operaciones correspondientes.

Fricción en los plásticos y los cerámicos. Aunque su resistencia es baja en comparación con la de los metales (ver tablas 2.2 y 7.1), los *plásticos* por lo general poseen características de baja fricción. Esta propiedad los hace mejores que los metales para rodamientos, engranes, sellos, articulaciones protésicas y aplicaciones generales de reducción de fricción. De hecho, en algunas ocasiones los polímeros se describen como *autolubricantes*.

En general, los factores comprendidos en la fricción y el desgaste de los metales también se aplican a los polímeros. Al deslizarse, el componente surcador de fricción en los termoplásticos y elastómeros es un factor significativo debido a su comportamiento viscoelástico (presenta un comportamiento viscoso y elástico) y pérdida posterior de histéresis (ver fig. 7.14). Esta condición puede simularse arrastrando un clavo sin filo a través de la superficie de una llanta de hule y observando cómo la superficie de ésta recupera su forma rápidamente.

Un factor importante en las aplicaciones de los plásticos es el efecto del aumento de la temperatura en las interfaces de deslizamiento causado por la fricción. Como se describe en la sección 7.3, los termoplásticos pierden su resistencia y se vuelven blandos al elevarse la temperatura. Su baja conductividad térmica y sus puntos de fusión bajos son esenciales si se considera el calor generado por la fricción. En caso de que no se controle el aumento de la temperatura, las superficies de deslizamiento pueden sufrir una deformación permanente y una degradación térmica.

El comportamiento a la fricción de diversos polímeros sobre los metales es similar al de los metales sobre los metales. La bien conocida baja fricción del PTFE (Teflón) se atribuye a su estructura molecular, que no tiene reactividad con los metales. Por lo tanto, su adhesión es pobre y su fricción es baja. El comportamiento a la fricción de los *cerámicos* es similar al de los metales; en consecuencia, la adhesión y el surcado en las interfaces también contribuyen a la fuerza de fricción en los cerámicos.

Reducción de la fricción. La fricción puede reducirse mediante la selección de materiales con baja adhesión (como carburos y cerámicos) y el uso de películas y recubrimientos superficiales. Los *lubricantes* (como los aceites) o las películas sólidas (como el grafito) colocan una película adherente entre el herramental, la matriz y la pieza de trabajo. Esta película minimiza la adhesión e interacciones entre una superficie y otra, disminuyendo así la fricción. Ésta también se puede reducir de manera significativa sometiendo la interfaz del herramental o de la matriz con la pieza de trabajo a *vibraciones ultrasónicas*, por lo general a 20 kHz. Estas vibraciones separan en forma periódica las dos superficies y permiten que el lubricante fluya con más libertad en la interfaz durante estas separaciones.

Medición de la fricción. Por lo general, el coeficiente de fricción se determina de manera experimental, ya sea durante procesos de manufactura o en pruebas de laboratorio simuladas, utilizando especímenes a pequeña escala de diversas formas. Una prueba que ha ganado amplia aceptación, en particular para procesos de deformación volumétrica, es la *prueba de compresión de anillo*. Un anillo plano se recalca plásticamente entre dos planchas planas (fig. 33.6a). Al reducir su altura, el anillo se expande en forma radial hacia fuera. Si la fricción en las interfaces es cero, los diámetros interno y externo

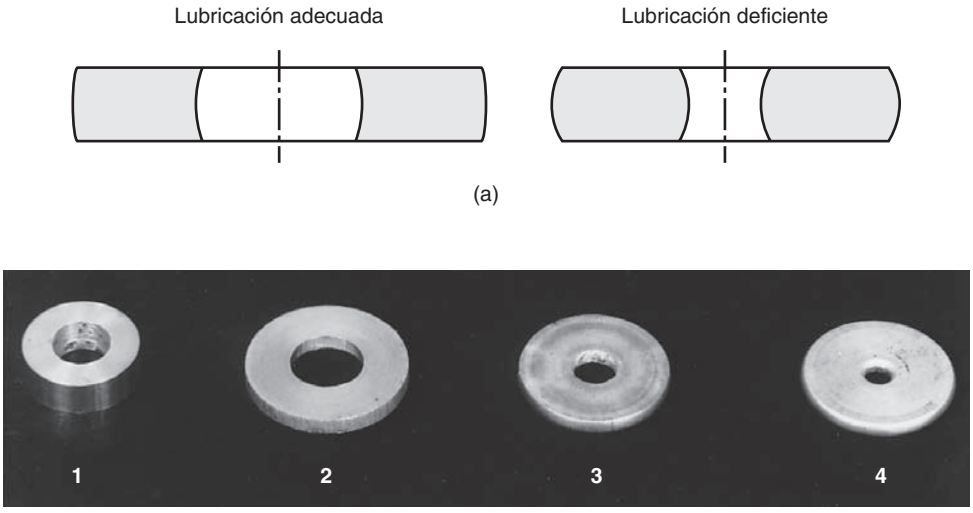


FIGURA 33.6 Prueba de compresión de anillo entre matrices planas. *(a)* Efecto de la lubricación en el tipo de abarrilamiento de un espécimen con forma de anillo. *(b)* Resultados de la prueba: (1) espécimen original, y (2) a (4) aumento de fricción. *Fuente*: A. T. Male y M. G. Cockcroft.

del anillo aumentan como si fuera un disco sólido. Sin embargo, con una fricción creciente, el diámetro interno se vuelve más pequeño. Para una reducción de altura particular, existe un valor crítico de la fricción en el cual el diámetro interno se incrementa a partir del original si μ es inferior, y disminuye si μ es superior (fig. 33.6b).

El coeficiente de fricción se puede determinar midiendo el cambio en el diámetro interno del espécimen y utilizando las curvas mostradas en la figura 33.7 (que se obtienen a través de análisis teóricos). Cada geometría y material de los anillos tiene su propia serie específica de curvas. La geometría más común de un espécimen posee unas proporciones de diámetro externo, diámetro interno y altura de 6:3:2, respectivamente. Por lo general, el tamaño real del espécimen no es relevante en estas pruebas. En consecuencia, una vez que se conoce el porcentaje de reducción en la altura y el diámetro interno, puede determinarse la magnitud de μ usando la gráfica apropiada.

EJEMPLO 33.1 Determinación del coeficiente de fricción

En una prueba de compresión de anillo, un espécimen de 10 mm de altura con un diámetro externo (DE) de 30 mm y diámetro interno (DI) de 15 mm reduce 50% su espesor. Calcule el coeficiente de fricción, μ, si el DE tiene 38 mm después de la deformación.

Solución Primero, es necesario calcular el nuevo DI (que se obtiene utilizando la constancia del volumen) de la siguiente manera:

$$\text{Volumen} = \frac{\pi}{4}(30^2 - 15^2)10 = \frac{\pi}{4}(38^2 - \text{ID}^2)5$$

Mediante esta ecuación se calcula el nuevo DI, que es de 9.7 mm.

Por lo tanto, el cambio en el diámetro interno es

$$\Delta\text{ID} = \frac{(15 - 9.7)}{15} = 0.35 \text{ o } 35\% \text{ (disminución)}$$

Con una reducción de 50% de altura y una reducción de 35% de diámetro interno, el coeficiente de fricción se puede obtener de la figura 33.7 como:

$$\mu = 0.21$$

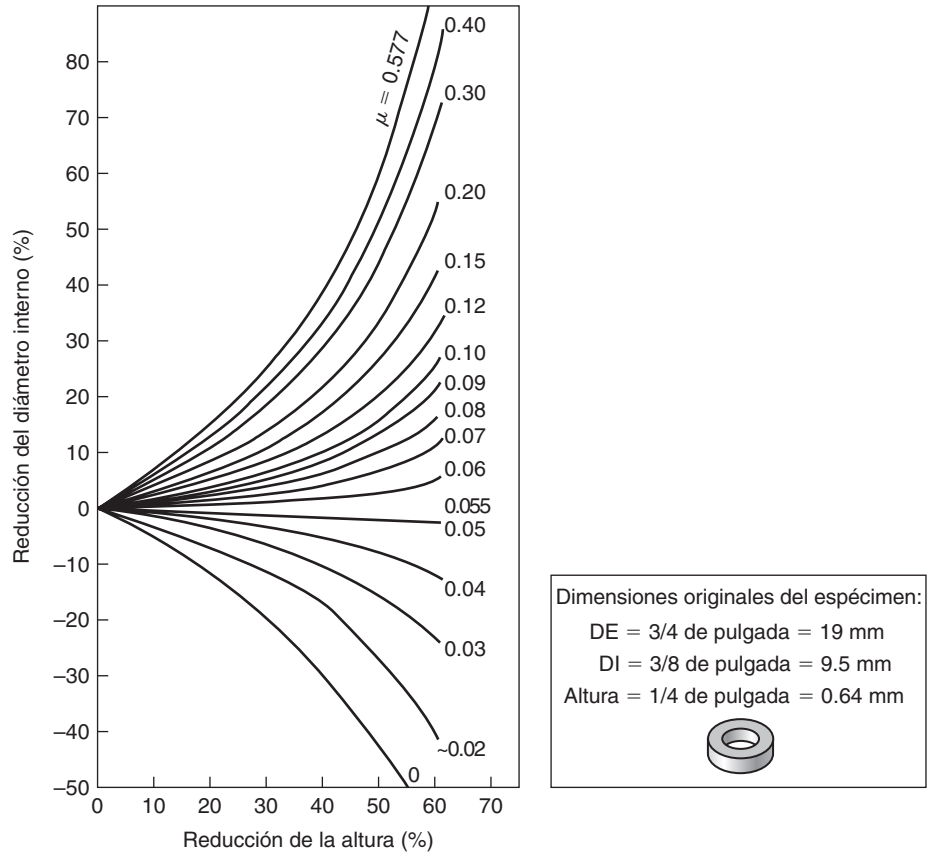


FIGURA 33.7 Gráfica para determinar el coeficiente de fricción de una prueba de compresión de anillo. Se mide la reducción de la altura y el cambio del diámetro interno del anillo; después μ se lee directamente de esta gráfica. Por ejemplo, si se reduce 40% la altura del espécimen de anillo y su diámetro interno disminuye 10%, el coeficiente de fricción es 0.10.

33.5 Desgaste

El *desgaste* tiene gran importancia tecnológica y económica porque cambia las formas de las herramientas y matrices y, por consiguiente, afecta la vida y el tamaño del herramental, así como la calidad de las partes producidas. La trascendencia del desgaste es evidente en la cantidad de partes y componentes que se tienen que reemplazar o reparar de manera continua. Ejemplos de desgastes en los procesos de manufactura son las brocas sin filo que deben rectificarse nuevamente, las herramientas de corte desgastadas que se necesita indexar, los herramentales y matrices que tienen que repararse o reemplazarse, e infinidad de ejemplos más. Las *placas de desgaste* (que se someten a cargas grandes) son un componente básico en algunas máquinas de trabajo de los metales. Se espera que estas placas (también conocidas como *partes de desgaste*) se desgasten y puedan reemplazarse con facilidad.

Aunque en general el desgaste altera la topografía superficial de una parte y es posible que produzca daño superficial severo, también puede tener un efecto benéfico. El periodo de *asentamiento* de diversas máquinas y motores provoca este tipo de desgaste eliminando los picos de las asperezas (fig. 33.8). Por lo tanto, en condiciones controladas, el desgaste puede considerarse un tipo de proceso de alisamiento y pulido. A continuación se describen los tipos principales de desgaste encontrados en las operaciones de manufactura.

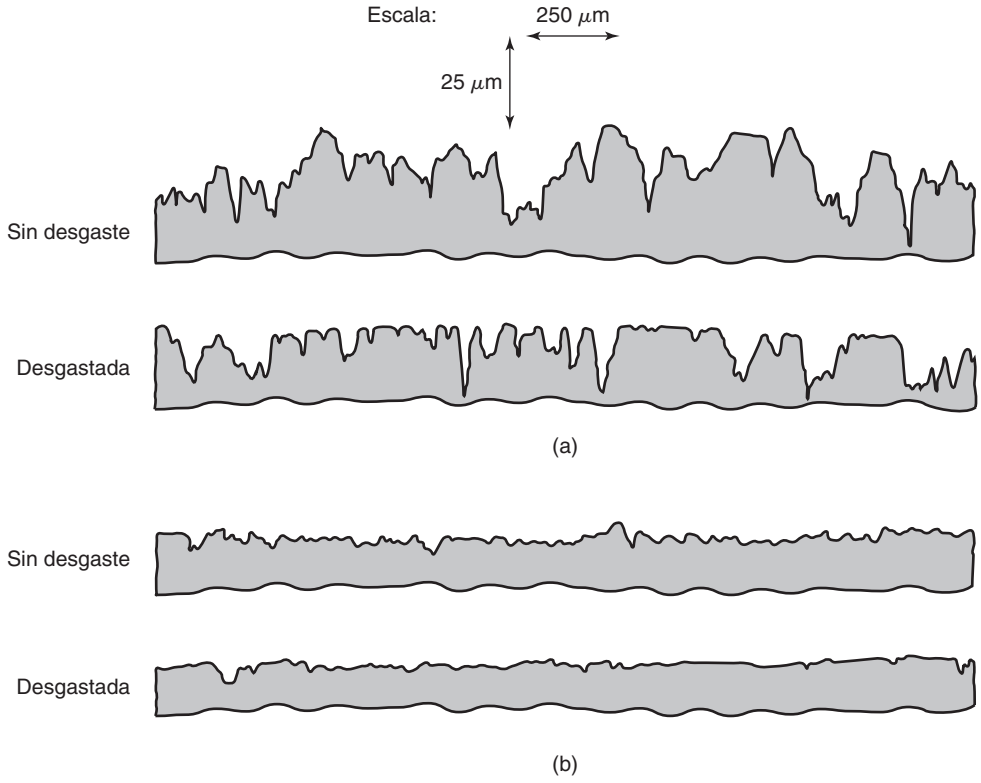


FIGURA 33.8 Cambios en los perfiles originales de una superficie: *(a)* tratada con cepillo de alambre, y *(b)* rectificada después del desgaste. *Fuente*: E. Wild y K. J. Mack.

Desgaste adhesivo. Si se aplica una fuerza tangencial al modelo mostrado en la figura 33.9, puede ocurrir cizallado *(a)* en la interfaz original, o *(b)* a lo largo de una trayectoria por abajo o por arriba de la interfaz, originando un *desgaste adhesivo*. Debido a factores como el endurecimiento por deformación en los puntos de contacto de las asperezas, difusión y solubilidad sólida mutua, con frecuencia las uniones adhesivas son más resistentes que los metales base. Por lo tanto, durante el deslizamiento, la fractura suele seguir una trayectoria en el componente más débil o más blando; se genera así un fragmento de desgaste. Aunque este fragmento queda fijo en el componente más duro (superficie superior en la fig. 33.9c), finalmente se desprende, al seguir frotándose en la interfaz, y se desarrolla como una **partícula de desgaste** suelta. Este proceso se conoce como desgaste adhesivo o desgaste por deslizamiento.

En los casos más severos, como los que tienen altas cargas y asperezas fuertemente unidas, el desgaste adhesivo se describe como rayado, difusión, desgarramiento, excoriación o agarrotamiento (**desgaste severo**). Las capas de óxido sobre las superficies tienen

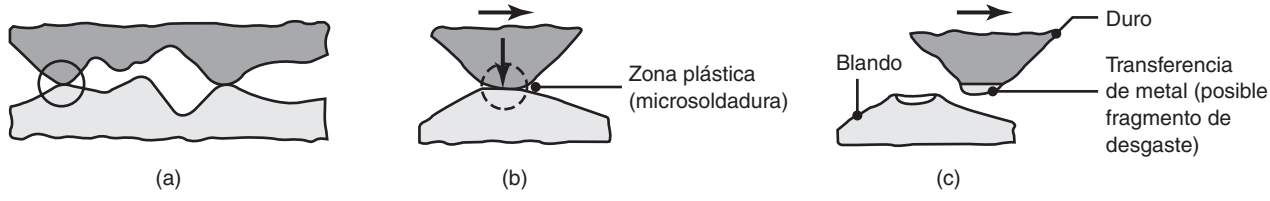


FIGURA 33.9 Esquema de *(a)* dos asperezas en contacto; *(b)* adhesión entre dos asperezas, y *(c)* formación de una partícula de desgaste.

una gran influencia en el desgaste adhesivo. Pueden actuar como una película de protección, lo que produce **desgaste moderado**, que consta de pequeñas partículas de desgaste.

Se puede reducir el desgaste adhesivo mediante los siguientes métodos:

a. Selección de materiales que no formen uniones adhesivas resistentes.

b. Uso de un material más duro, como uno del par.

c. Uso de materiales que se oxiden con mayor facilidad.

d. Aplicación de recubrimientos duros que sirvan para los métodos **a, b** y **c** anteriores. El recubrimiento de una superficie con material blando (como estaño, plata, plomo o cadmio) también es efectivo en la reducción del desgaste.

Desgaste abrasivo. Este tipo de desgaste es causado por una superficie dura, rugosa (o una superficie que contiene partículas duras, protuberantes), que se desliza sobre otra superficie. Como resultado, se producen *microvirutas* o *astillas*, dejando así muescas o raspaduras en la superficie más blanda (fig. 33.10). De hecho, procesos como el limado, rectificado, maquinado ultrasónico y maquinado por chorro abrasivo y chorro de agua actúan de esta manera. La diferencia es que, en estas operaciones, se controlan los parámetros del proceso a fin de producir las formas y superficies deseadas por medio del desgaste, mientras que, por lo general, el desgaste abrasivo no es intencional ni deseado.

Existen dos tipos básicos de desgaste abrasivo. En el *desgaste de dos cuerpos*, la acción abrasiva ocurre entre dos superficies de deslizamiento o una partícula dura, abrasiva, en contacto con un cuerpo sólido. Este tipo es la base del desgaste *erosivo*. En el *desgaste de tres cuerpos*, una partícula abrasiva se encuentra entre dos cuerpos sólidos deslizantes, como una partícula de desgaste transportada por un lubricante. Dicha situación muestra la importancia de filtrar los lubricantes en forma apropiada durante las operaciones de trabajo de los metales, para retirar cualquier contaminante.

Se ha descubierto que la *resistencia al desgaste abrasivo* de los metales puros y los cerámicos es directamente proporcional a su dureza. Por lo tanto, el desgaste abrasivo se puede disminuir aumentando la dureza de los materiales (en general, mediante tratamiento térmico) o reduciendo la carga normal. Los elastómeros y hules resisten también el desgaste abrasivo porque se deforman elásticamente y se recuperan cuando las partículas abrasivas cruzan sobre sus superficies. Los mejores ejemplos son los neumáticos para automóviles, que duran mucho tiempo aunque se utilicen sobre las superficies de las carreteras, que suelen ser rugosas y abrasivas. Ni siquiera los aceros endurecidos durarían tanto en dichas condiciones.

Desgaste corrosivo. También conocido como *oxidación* o *desgaste químico*, este tipo de desgaste es causado por reacciones químicas o electroquímicas entre las superficies y el ambiente. Los productos corrosivos finos sobre una superficie constituyen las partículas de desgaste. Cuando la capa corrosiva se destruye o retira mediante deslizamiento o abrasión, empieza a formarse otra y se repite el proceso de remoción y formación de capas corrosivas. Entre los medios corrosivos se encuentran el agua potable, el agua de mar,

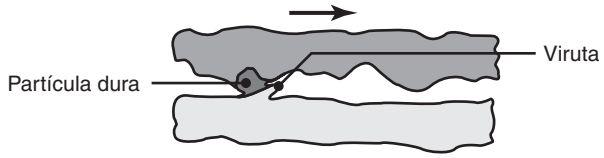


FIGURA 33.10 Esquema de desgaste abrasivo en el deslizamiento. Las raspaduras longitudinales en una superficie generalmente indican desgaste abrasivo.

el oxígeno, los ácidos y productos químicos, el ácido sulfhídrico y el dióxido sulfúrico atmosféricos. El desgaste corrosivo se puede reducir mediante:

- La selección de materiales que resistan el ataque ambiental.
- El control del ambiente.
- La reducción de las temperaturas de operación para disminuir la velocidad de la reacción química.

Desgaste por fatiga. El desgaste por fatiga (también llamado *fatiga superficial* o *desgaste por fracturas superficiales*) se produce cuando la superficie de un material se somete a cargas cíclicas; un ejemplo de esto es el contacto rotatorio en los rodamientos. En general, las partículas de desgaste se forman por *delaminación* o *picadura*. Otro tipo de desgaste por fatiga es la *fatiga térmica*. Los agrietamientos en la superficie se generan por los esfuerzos térmicos de los ciclos térmicos, como cuando una matriz fría entra en contacto repetidamente con piezas de trabajo calientes (agrietamiento por calor). Después estas grietas se unen y la superficie empieza a delaminarse, produciendo desgaste por fatiga.

Por lo general, este tipo de desgaste ocurre en matrices para trabajo en caliente o para fundición a presión. El desgaste por fatiga se puede reducir mediante:

- La reducción de los esfuerzos de contacto.
- La reducción de los ciclos térmicos.
- La mejora de la calidad de los materiales, retirando impurezas, inclusiones y muchas otras imperfecciones que pueden actuar como puntos locales de iniciación de grietas.

Otros tipos de desgaste. En las operaciones de manufactura se pueden ver muchos otros tipos de desgaste.

- La **erosión** se debe a las partículas abrasivas sueltas que desgastan una superficie.
- El **desgaste por vibración-corrosión** ocurre en interfaces que se someten a movimientos recíprocos muy pequeños.
- El **desgaste por impacto** es la remoción (mediante partículas que producen el impacto) de pequeñas cantidades de material de una superficie.

En muchos casos, el desgaste de los componentes es el resultado de la combinación de diferentes tipos de desgaste. Por ejemplo, en la figura 33.11 se observa que incluso en la

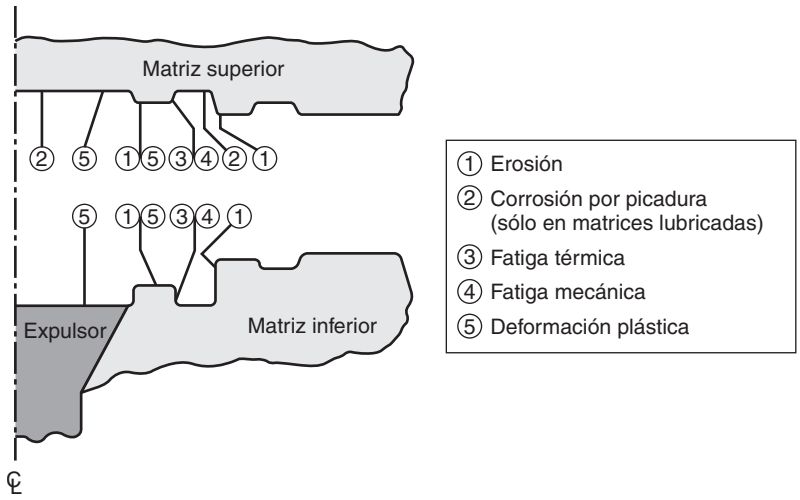


FIGURA 33.11 Tipos de desgaste observados en una matriz simple utilizada para forjado en caliente. *Fuente*: T. A. Dean.

misma matriz de forjado ocurren varios tipos de desgaste en diferentes lugares; en las herramientas de corte puede haber una situación similar, como se muestra en la figura 21.18.

Desgaste de plásticos y cerámicos. El desgaste de los plásticos es similar al de los metales. Su desgaste abrasivo depende en parte de la capacidad del polímero para deformarse y recuperarse elásticamente, como en los elastómeros. Los polímeros comunes con buena resistencia al desgaste son las poliamidas, nailon, policarbonato, polipropileno, acetales y polietileno de alta densidad, que se moldean o maquinan para fabricar engranes, poleas, ruedas dentadas y componentes mecánicos similares. Debido a que los plásticos se pueden elaborar con una amplia variedad de composiciones, también pueden mezclarse con lubricantes internos como PTFE (Teflón), silicio, grafito, disulfuro de molibdeno y partículas de hule que se intercalan en el interior de la matriz de polímero.

Desgaste de los plásticos reforzados. La resistencia al desgaste de los plásticos reforzados depende del tipo, la cantidad y la dirección del refuerzo en la matriz de polímero. Las fibras de carbono, vidrio y aramida mejoran la resistencia al desgaste. Éste ocurre cuando las fibras se extraen de la matriz (*extracción de fibras*). El desgaste es superior cuando la dirección de deslizamiento es paralela a las fibras, ya que en este caso se pueden extraer más fácilmente. Las fibras largas aumentan la resistencia al desgaste de los compósitos, porque son más difíciles de extraer y evitan que las grietas en la matriz se propaguen a la superficie con facilidad.

Desgaste de los cerámicos. Cuando se deslizan cerámicos contra metales, el desgaste se origina por *(a)* la deformación plástica en pequeña escala y la fractura de las superficies frágiles; *(b)* reacciones químicas superficiales; *(c)* surcado, y *(d)* fatiga. Los metales se pueden transferir a las superficies cerámicas tipo óxido, formando óxidos metálicos. Por lo tanto, el deslizamiento ocurre en realidad entre el metal y la superficie de óxido metálico.

33.6 Lubricación

Existen evidencias de que la lubricación de las superficies para reducir la fricción y el desgaste se remonta a unos cuatro milenios atrás, para lubricar diversos componentes en movimiento lineal y giratorio. Por ejemplo, las ruedas de los carros se lubricaban con sebo de reses en el año 1400 a.C. También se utilizaban diversos aceites para lubricación en procesos de trabajo de los metales (ver tabla I.2), que empezaron hacia el año 600 d.C.

En los procesos de manufactura (como ya se consideró en varios capítulos anteriores), las superficies de herramentales, matrices y piezas de trabajo se someten a *(a)* fuerzas y presiones de contacto, que van de valores muy bajos a múltiplos del esfuerzo de fluencia del material de la pieza de trabajo; *(b)* velocidades relativas (de muy bajas a muy altas), y *(c)* temperaturas, que van de la temperatura ambiente a la temperatura de fusión. Además de seleccionar los materiales apropiados y controlar los parámetros del proceso para reducir la fricción y el desgaste, se aplican **lubricantes** ampliamente (o, de manera más general, **fluidos de trabajo de los metales**).

Regímenes de lubricación. Existen cuatro regímenes de lubricación que por lo general son de interés en las operaciones de manufactura (fig. 33.12):

1. En la **lubricación de película gruesa,** las superficies se separan por completo mediante una película de lubricante; la viscosidad de éste es un factor importante. Dichas películas se pueden desarrollar en algunas regiones de la pieza de trabajo, en operaciones de alta velocidad, y también por lubricantes de alta viscosidad, que se quedan atrapados en las interfaces de la matriz y la pieza. Una película gruesa de lubricante produce una apariencia superficial burda, granular, en la pieza de trabajo después de las operaciones de formado, en la que el grado de rugosidad depende del tamaño del grano. En operaciones como el acuñado y forjado de precisión,

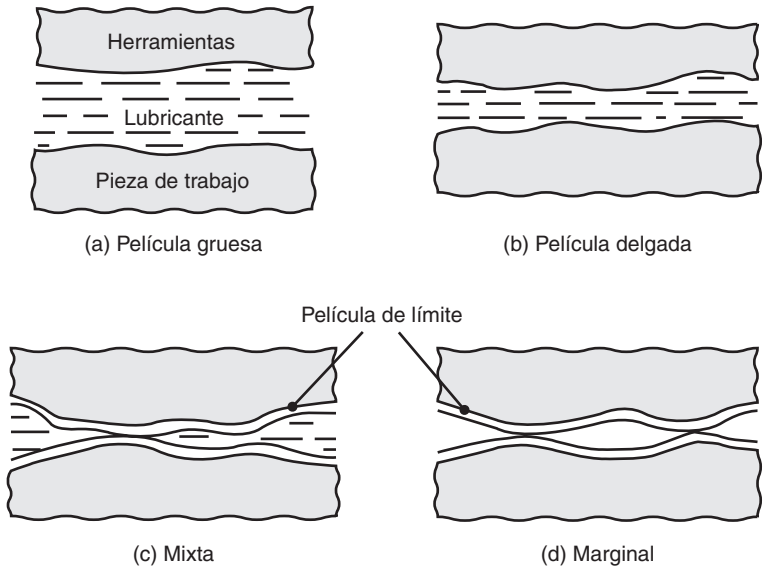


FIGURA 33.12 Tipos de lubricación que ocurren generalmente en operaciones de trabajo de los metales. *Fuente*: W. R. D. Wilson.

son indeseables los lubricantes atrapados porque evitan la generación precisa de las formas.

2. Al aumentar la carga entre la matriz y la pieza de trabajo, o al disminuir la velocidad y viscosidad del fluido para trabajo de los metales, la capa de lubricante se vuelve más delgada (**lubricación de película delgada**). Esta condición incrementa la fricción en las interfaces de deslizamiento y produce un leve desgaste.
3. En la **lubricación mixta**, una parte significativa de la carga se soporta por el contacto físico (asperezas) de las dos superficies. El resto lo efectúa la película de fluido atrapada en bolsas, como los valles entre las asperezas.
4. En la **lubricación marginal**, soportan la carga las superficies en contacto cubiertas con una *película marginal* de lubricante (fig. 33.12d). Ésta es una capa delgada de lubricante (molecular) que es atraída físicamente hacia las superficies metálicas, evitando así el contacto directo metal con metal de los dos cuerpos y reduciendo el desgaste. Por lo general, los lubricantes marginales son aceites naturales, grasas, ácidos grasos, ésteres o jabones. Sin embargo, las películas marginales se pueden *romper* como resultado de *(a)* la desorpción causada por altas temperaturas en las interfaces de deslizamiento, o *(b)* por rozamiento durante el deslizamiento. A falta de esta película de protección, las superficies metálicas de deslizamiento se pueden desgastar y rayar severamente.

Otras consideraciones. Los valles en la rugosidad superficial de los cuerpos en contacto pueden servir como depósitos locales o bolsas de lubricantes, soportando así una parte sustancial de la carga. La pieza de trabajo (no la matriz) debe tener la superficie más rugosa; de lo contrario, la superficie más rugosa y dura de la matriz (que actúa como una lima) puede dañar la superficie de la pieza. La rugosidad superficial recomendada en la mayoría de las matrices es de casi 0.4 μm (15 μpulg). La *geometría* total de los cuerpos en interacción es otro factor que debe tomarse en consideración para garantizar una lubricación apropiada. El movimiento de la pieza de trabajo en la zona de deformación (como ocurre durante el estirado, extrusión y laminado de alambres) debe permitir que se lleve un suministro de lubricante a la interfaz de la matriz y la pieza. Con la selección apropiada de los parámetros del proceso, se puede transportar y mantener una película relativamente gruesa de lubricante.

33.7 Fluidos para el trabajo de los metales y su selección

Las funciones de un *fluido para trabajo de los metales* son las siguientes:

- **Reducir la fricción**, disminuyendo así los requerimientos de fuerza y energía, y elevación de la temperatura.
- **Reducir el desgaste,** disminuyendo así el agarrotamiento y los rozamientos.
- **Mejorar el flujo del material,** en los herramentales, matrices y moldes.
- Actuar como **barrera térmica** entre la pieza de trabajo y las superficies del herramental y matrices, evitando así el enfriamiento de la pieza en procesos de trabajo en caliente.
- Actuar como **agente de desprendimiento**, una sustancia que ayuda a la remoción o expulsión de las partes de matrices y moldes.

Existen diversos tipos de fluidos para trabajo de los metales que satisfacen estos requisitos y tienen diversas químicas, propiedades y características.

33.7.1 Aceites

Los *aceites* mantienen películas de alta resistencia en la superficie de un metal, como se puede observar al limpiar una superficie aceitosa. Aunque son muy efectivos en la reducción de la fricción y el desgaste, tienen baja conductividad térmica y bajo calor específico. En consecuencia, no conducen de manera efectiva el calor generado por la fricción y la deformación plástica. Además, es difícil y costoso remover aceites de las superficies de los componentes que se van a pintar o soldar y es difícil desecharlos.

Las fuentes de los aceites pueden ser de naturaleza **mineral** (*petróleo* o *hidrocarburo*), **animal** o **vegetal**. Los aceites pueden estar *compuestos* de aditivos o de otros aceites. Las composiciones se utilizan para cambiar propiedades, como la viscosidad y temperatura, tensión superficial, resistencia al calor y capa límite. Los aceites minerales (con o sin aditivos) usados sin diluir se llaman **aceites puros.** Los aceites pueden contaminarse por los lubricantes empleados para las guías y diversos componentes de las máquinas herramienta y la maquinaria para trabajo de los metales. Estos aceites tienen características diferentes a las de los utilizados para el propio proceso y, por lo tanto, pueden tener efectos adversos. Cuando se encuentran en el propio fluido para trabajo de los metales, se les conoce como **aceite perdido**.

33.7.2 Emulsiones

Una *emulsión* es una mezcla de dos líquidos inmiscibles (por lo general agua y aceite en diversas proporciones) junto con aditivos. Los *emulsores* son sustancias que evitan que se unan las gotas dispersas en una mezcla (de ahí el término *inmiscible*). Con apariencia lechosa, a las emulsiones se les conoce como **aceites solubles en agua**, o **refrigerantes con base agua,** y son de dos tipos: directos e indirectos. En una *emulsión directa*, se dispersa aceite mineral en agua en la forma de gotas muy pequeñas. En una *emulsión indirecta*, las gotas de agua se dispersan en el aceite. Las emulsiones directas son fluidos importantes para el trabajo de los metales, porque la presencia del agua les proporciona alta capacidad de enfriamiento. Son particularmente efectivos en el maquinado de alta velocidad, donde el aumento de temperatura tiene efectos perjudiciales sobre la vida de la herramienta, la integridad de la superficie de las piezas de trabajo y la precisión dimensional de las partes.

33.7.3 Soluciones sintéticas y semisintéticas

Las *soluciones sintéticas* son fluidos químicos que contienen productos químicos inorgánicos y otros productos químicos disueltos en agua; no incluyen aceite mineral. Se agregan diversos agentes químicos a una solución en particular para proporcionar diferentes

propiedades. Las soluciones *semisintéticas* son básicamente soluciones sintéticas a las que se les agregan pequeñas cantidades de aceites emulsionables.

33.7.4 Jabones, grasas y ceras

Por lo general, los *jabones* son productos de la reacción de sales de sodio o potasio con ácidos grasos. Los jabones alcalinos son solubles en agua, pero otros jabones metálicos suelen ser insolubles. Los jabones son *lubricantes marginales* eficaces y pueden formar capas gruesas de película en las interfaces de matriz y pieza de trabajo, en particular cuando se aplican en recubrimientos de conversión para aplicaciones de trabajo de los metales en frío.

Las *grasas* son lubricantes sólidos o semisólidos y por lo general consisten en jabones, aceite mineral y diversos aditivos. Son altamente viscosos y se adhieren bien a las superficies metálicas. Aunque se utilizan mucho en maquinaria, las grasas son de uso limitado en los procesos de manufactura.

Las *ceras* pueden ser de origen animal o de plantas (*parafina*). En comparación con las grasas, son menos "grasosas" y más frágiles. Las ceras tienen un uso limitado en las operaciones de trabajo de los metales, excepto como lubricantes para cobre y (como parafina clorada) como lubricantes para aceros inoxidables y aleaciones de alta temperatura.

33.7.5 Aditivos

Por lo general, los fluidos para el trabajo de los metales se mezclan con diversos aditivos, de la siguiente manera:

- Inhibidores de oxidación.
- Agentes antioxidantes.
- Inhibidores de espuma.
- Agentes humectantes.
- Agentes controladores de olores.
- Antisépticos.

El *azufre, cloro* y *fósforo* son aditivos importantes para los aceites. Conocidos como **aditivos de presión extrema** (EP, por sus siglas en inglés) y utilizados solos o en combinación, reaccionan químicamente con superficies metálicas y forman películas superficiales adherentes de sulfuros o cloruros metálicos. Estas películas tienen baja resistencia al corte y buenas propiedades antisoldadura y, por lo tanto, pueden reducir de manera efectiva la fricción y el desgaste. Por otro lado, pueden atacar con preferencia la matriz de cobalto en los herramentales y matrices de carburo de tungsteno (*lixiviado selectivo*), provocando cambios en la rugosidad e integridad superficial de estas herramientas.

33.7.6 Lubricantes sólidos

Debido a sus propiedades y características únicas, diversos materiales sólidos se utilizan como lubricantes en las operaciones de manufactura. A continuación se describen cuatro de los *lubricantes sólidos* más usados.

Grafito. En la sección 8.6 se describen las propiedades generales del grafito. Éste es débil en cortante a lo largo de sus planos basales (ver fig. 1.4), por lo que tiene un coeficiente de fricción bajo en dicha dirección. Puede ser un lubricante sólido efectivo, en particular a temperaturas elevadas. Sin embargo, la fricción es baja sólo en presencia de aire o humedad. En una atmósfera de vacío o gas inerte, la fricción es muy alta; de hecho, el grafito puede ser abrasivo en estas situaciones. Se puede aplicar frotándolo en las superficies o haciéndolo parte de una *suspensión coloidal* (dispersión de pequeñas partículas) en un portador líquido como agua, aceite o un alcohol.

Disulfuro de molibdeno. Éste es un lubricante sólido laminar muy utilizado; de alguna manera es semejante en apariencia al grafito. Sin embargo, a diferencia de éste, tiene un alto coeficiente de fricción en un medio ambiente. Por lo común, los aceites se emplean como portadores de disulfuro de molibdeno (MoS_2) y como lubricante a temperatura ambiente. Se puede frotar sobre las superficies de una pieza de trabajo.

Películas metálicas y poliméricas. Debido a su baja resistencia, las capas delgadas de metales blandos y recubrimientos de polímero también se utilizan como lubricantes sólidos. Metales apropiados son el plomo, indio, cadmio, estaño, plata, polímeros como PTFE (Teflón), polietileno y metracrilatos. Sin embargo, estos recubrimientos tienen aplicaciones limitadas debido a su falta de resistencia a altos esfuerzos de contacto y a temperaturas elevadas.

También se usan metales blandos para recubrir metales de alta resistencia, como aceros, aceros inoxidables y aleaciones de alta temperatura. Por ejemplo, el cobre o estaño se deposita químicamente en la superficie de un metal antes de procesarlo. Si el óxido de un metal en particular tiene baja fricción y es suficientemente delgado, la capa de óxido puede servir como lubricante sólido, en especial a temperaturas elevadas.

Vidrios. Aunque es un material sólido, el vidrio se vuelve viscoso a temperaturas elevadas y, por lo tanto, puede servir como lubricante líquido. La viscosidad está en función de la temperatura (pero no de la presión) y depende del tipo de vidrio. La conductividad térmica pobre también hace que el vidrio sea atractivo, ya que actúa como barrera térmica entre las piezas de trabajo calientes y las matrices relativamente frías. Por lo general, la lubricación con vidrio se utiliza en aplicaciones como extrusión y forjado en caliente.

Recubrimientos de conversión. Los lubricantes no siempre se adhieren en forma apropiada a la superficie de la pieza de trabajo, en particular bajo altos esfuerzos normales y cortantes. Esta propiedad tiene los mayores efectos en forjado, extrusión y estirado de alambre de aceros, aceros inoxidables y aleaciones de alta temperatura. Para estas aplicaciones, primero se transforman las superficies de la pieza de trabajo mediante una reacción química con ácidos (de ahí el término de *conversión*). Esta reacción deja una superficie rugosa y esponjosa, que actúa como portadora del lubricante. Luego del tratamiento se remueve cualquier exceso de ácido de la superficie mediante bórax o cal. Después se aplica un lubricante líquido (como jabón) a la superficie. La película de lubricante se adhiere a la superficie y no puede rasparse fácilmente. Con frecuencia se usan recubrimientos de conversión de *fosfato de zinc* en aceros al carbono y de baja aleación, además de que se emplean recubrimientos de *oxalato* para aceros inoxidables y aleaciones de alta temperatura.

Fulerenos o bolas de Bucky. Como se señaló en la sección 8.6, éstas son moléculas de carbono con forma de balones de futbol. Cuando se colocan entre superficies deslizantes, se comportan como diminutos rodamientos de bolas. Actúan bien como lubricantes sólidos y son muy efectivas en aplicaciones aeroespaciales como rodamientos.

33.7.7 Selección de fluidos para el trabajo de los metales

La selección de un fluido para trabajo de los metales para la aplicación y el material en particular de una pieza de trabajo implica considerar diversos factores:

1. Proceso de manufactura en particular.
2. Material de la pieza de trabajo.
3. Material del herramental o la matriz.
4. Parámetros de procesamiento.
5. Compatibilidad del fluido con los materiales del herramental, la matriz y la pieza de trabajo.
6. Preparación requerida de la superficie.

7. Método de aplicación de los fluidos.
8. Remoción del fluido y limpieza de la pieza de trabajo después de su procesamiento.
9. Contaminación del fluido por otros lubricantes, como los usados para maquinaria.
10. Almacenamiento y mantenimiento de los fluidos.
11. Tratamiento del lubricante de desecho.
12. Consideraciones biológicas y ambientales.
13. Costos comprendidos en todos los aspectos indicados en esta lista.

Cuando se selecciona un aceite como lubricante, es necesario investigar sus características de viscosidad, temperatura y presión. La viscosidad baja puede tener un efecto muy perjudicial, ya que provocaría alta fricción y desgaste. También debe tenerse en cuenta la función específica del fluido para trabajo de los metales (ya sea que se trate fundamentalmente de un *lubricante* o un *refrigerante*). Los fluidos con base de agua son refrigerantes muy efectivos, pero como lubricantes no son tan eficaces como el aceite. Se estima que los fluidos con base de agua se utilizan en un porcentaje de 80% a 90% de todas las aplicaciones de maquinado.

Los fluidos para el trabajo de los metales:

- No deben dejar ningún residuo dañino que pueda interferir en las operaciones de la maquinaria.
- No deben manchar ni corroer la pieza de trabajo o el equipo.
- Debe verificarse periódicamente el deterioro causado por el crecimiento bacterial, la acumulación de óxidos, virutas, desechos del desgaste, degradación general y ruptura debido a la temperatura y el tiempo. La presencia de partículas de desgaste es muy importante, porque causa daños al sistema; en consecuencia, la inspección y el filtrado adecuados son fundamentales.

Después de concluir las operaciones de manufactura, por lo general las superficies de la pieza de trabajo tienen residuos de lubricante; éstos se pueden remover antes de su procesamiento posterior, como soldadura o pintura. Los lubricantes con base de aceite son más difíciles y costosos de retirar que los fluidos con base de agua. En la sección 34.16 se describen diversas soluciones y técnicas de limpieza para este propósito.

Consideraciones biológicas y ambientales. Las consideraciones biológicas y ambientales son factores importantes en la selección de fluidos para el trabajo de los metales. Pueden presentarse peligros potenciales al entrar en contacto o inhalar algunos de estos fluidos, como inflamación de la piel (*dermatitis*) y exposición de largo plazo a *carcinógenos*. La disposición inapropiada de los fluidos para el trabajo de los metales también puede provocar efectos adversos en el ambiente. Para evitar o restringir el crecimiento de microorganismos como bacterias, levaduras, mohos, algas y virus, se agregan químicos (*biocidas*) a los fluidos para trabajo de los metales.

En términos ambientales, se han logrado muchos avances en el desarrollo de fluidos seguros y en la tecnología y el equipo para un tratamiento, reciclaje y desecho adecuados. En Estados Unidos, instituciones como la Occupational Safety and Health Administration (OSHA), el National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) y la Environmental Protection Agency (EPA) promueven leyes y normas relacionadas con la manufactura, el transporte, el uso y la disposición de los fluidos para trabajo de los metales.

RESUMEN

- Las superficies y sus propiedades son tan importantes como las propiedades volumétricas de los materiales. Una superficie no sólo tiene una forma, rugosidad y apariencia particulares, sino que también posee propiedades que difieren significativamente de las del resto del volumen del material.

- Las superficies están expuestas al ambiente y, por lo tanto, se someten al ataque ambiental. También pueden entrar en contacto con herramentales y matrices (durante el procesamiento) o con otros componentes (durante su vida útil).
- Las propiedades geométricas y materiales de las superficies pueden afectar su fricción, desgaste, fatiga, corrosión y conductividad eléctrica y térmica de manera significativa.
- La medición y descripción de los rasgos superficiales (incluyendo sus características) son aspectos importantes en la manufactura. La medición más común de la rugosidad superficial es el valor de la media aritmética. El instrumento que se utiliza comúnmente para medir dicha rugosidad es el rugosímetro.
- La fricción y el desgaste se encuentran entre los factores más significativos en el procesamiento de materiales. Se ha logrado un gran avance en la comprensión de estos fenómenos y en la identificación de los factores que los rigen.
- Otros factores importantes son la afinidad y solubilidad sólida de los dos materiales en contacto, la naturaleza de las películas superficiales, la presencia de contaminantes y los parámetros del proceso, como carga, velocidad y temperatura.
- Existe una amplia variedad de fluidos para trabajo de los metales utilizados en aplicaciones específicas, incluyendo aceites, emulsiones, soluciones sintéticas y lubricantes sólidos.
- La selección y el uso de lubricantes requieren considerar con cuidado muchos factores relativos a los materiales de la pieza de trabajo y la matriz y el proceso específico de manufactura.
- Los fluidos para trabajo de los metales tienen diversas características de lubricación y enfriamiento. Las consideraciones biológicas y ambientales también son factores importantes en su selección.

TÉRMINOS CLAVE

Acabado superficial
Aceites
Aceites compuestos
Aceites solubles en agua
Adhesión
Aditivos
Aditivos de presión extrema
Altura máxima de rugosidad
Asentamiento
Asperezas
Autolubricación
Capa de óxido
Ceras
Coeficiente de fricción
Defectos superficiales
Desgaste abrasivo
Desgaste adhesivo
Desgaste por fatiga
Desgaste por impacto
Desgaste por vibración-corrosión
Desgaste severo
Direccionalidad o sesgo
Emulsión
Estructura superficial
Fluidos para el trabajo de los metales
Fuerza de fricción
Grasas
Imperfección
Integridad superficial
Jabones
Lixiviado selectivo
Lubricación
Lubricación de película delgada
Lubricación de película gruesa
Lubricación marginal
Lubricación mixta
Lubricante
Lubricantes sólidos
Microsoldaduras
Ondulación
Partes de desgaste
Picadura
Prueba de compresión de anillo
Raíz media cuadrática
Refrigerante
Rugosidad superficial
Rugosímetro de superficies
Textura superficial
Tribología
Valor medio aritmético
Vibraciones ultrasónicas

BIBLIOGRAFÍA

Arnell, R. D., Davies, P. B., Halling, J. y Whomes, T. L., *Tribology: Principles and Design Applications*, Springer, 1991.

ASM Handbook, Vol. 5: *Surface Engineering*, ASM International, 1994.

ASM Handbook, Vol. 18: *Friction, Lubrication, and Wear Technology*, ASM International, 1992.

Bayer, R. G., *Mechanical Wear Prediction and Prevention*, Marcel Dekker, 1994.

Bhushan, B., *Principles and Applications of Tribology*, Wiley, 1999.

_____ (ed.), *Handbook of Micro/Nanotribology*, 2a. ed., CRC Press, 1998.

_____, *Modern Tribology Handbook*, CRC Press, 2001.

Blau, P. J., *Friction Science and Technology*, Marcel Dekker, 1995.

Booser, E. R. (ed.), *Tribology Data Handbook*, CRC Press, 1998.

Budinski, K. G., *Surface Engineering for Wear Resistance*, Prentice Hall, 1988.

Burakowski, T. y Wiershon, T., *Surface Engineering of Metals: Principles, Equipment, Technologies*, CRC Press, 1998.

Byers, J. P. (ed.), *Metalworking Fluids*, Marcel Dekker, 1994.

Chattopadhyay, R., *Surface Wear: Analysis, Treatment, and Prevention*, ASM International, 2001.

Glasser, W. A., *Materials for Tribology*, Elsevier, 1992.

Hutchins, I. M., *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, CRC Press, 1992.

Lansdown, A. R. y Price, A. L., *Materials to Resist Wear: A Guide to Their Selection and Use*, Pergamon Press, 1986.

Ludema, K. C., *Friction, Wear, Lubrication: A Textbook in Tribology*, CRC Press, 1996.

Miller, R. W., *Lubricants and Their Applications*, McGraw-Hill, 1993.

Nachtman, E. S. y Kalpakjian, S., *Lubricants and Lubrication in Metalworking Operations*, Marcel Dekker, 1985.

Neele, M. J. (ed.), *The Tribology Handbook*, 2a. ed., Butterworth-Heinemann, 1995.

Peterson, M. R. y Winer, W. O. (eds.), *Wear Control Handbook*, American Society of Mechanical Engineers, 1980.

Rabinowicz, E., *Friction and Wear of Materials*, 2a. ed., Wiley, 1995.

Schey, J. A., *Tribology in Metalworking—Friction, Lubrication and Wear*, ASM International, 1983.

Seireg, A. A., *Friction and Lubrication in Mechanical Design*, Marcel Dekker, 1998.

Stachowiak, G. W. y Batchelor, A. W., *Engineering Tribology*, Butterworth-Heinemann, 2001.

Williams, J. A., *Engineering Tribology*, Oxford University Press, 1995.

PREGUNTAS DE REPASO

33.1 ¿Qué significa textura superficial? ¿E integridad superficial?

33.2 Liste y explique los tipos de defectos encontrados en las superficies.

33.3 Explique los términos *(a)* rugosidad, y *(b)* ondulación.

33.4 ¿Cuáles son las causas de la direccionalidad en las superficies?

33.5 ¿Por qué los resultados de un rugosímetro no son una imagen verdadera de la superficie real?

33.6 ¿Cuál es la importancia del aumento de la temperatura que se produce como resultado de la fricción?

33.7 Describa las características de la prueba de compresión de anillo. ¿Requiere medición de fuerzas?

33.8 Liste los tipos de desgaste que por lo general se observan en la práctica de ingeniería.

33.9 ¿Cómo se puede reducir el desgaste adhesivo? ¿Y el desgaste abrasivo?

33.10 ¿Qué funciones debe realizar un lubricante en el proceso de manufactura?

33.11 Describa los factores comprendidos en la selección de lubricantes.

PROBLEMAS CUALITATIVOS

33.12 Proporcione diversos ejemplos que muestren la importancia de la fricción en los procesos de manufactura.

33.13 ¿Cuál es la importancia de que la dureza de los óxidos metálicos sea generalmente mayor que la de los metales base?

33.14 ¿Qué factores se consideran en la especificación de la direccionalidad de una superficie para una parte?

33.15 Explique por qué los valores idénticos de rugosidad superficial no necesariamente representan el mismo tipo de superficie.

33.16 ¿Cómo afecta el desgaste de moldes, herramentales y matrices una operación de manufactura?

33.17 Comente la rugosidad superficial de diversas partes y componentes con los que esté familiarizado.

33.18 ¿Cuál es la importancia de que la trayectoria del estilete y el perfil real de la superficie no sean necesariamente los mismos?

33.19 Proporcione dos ejemplos de cada categoría en la que la ondulación superficial sería *(a)* deseable, y *(b)* indeseable.

33.20 Igual que en el problema 33.19, pero para la rugosidad superficial.

33.21 Para cada una de las direccionalidades superficiales mostradas en la figura 33.2b, proporcione un ejemplo de un proceso de manufactura que produzca dicha direccionalidad.

33.22 Proporcione diversas razones por las que un espécimen originalmente redondo en una prueba de compresión de anillo pueda volverse oval después de recalcarlo.

33.23 Explique cómo un calzador de zapatos (metálico o de plástico) facilita el proceso de colocación de los zapatos.

33.24 Describa qué ocurre en el proceso de asentamiento.

33.25 ¿Por qué la resistencia al desgaste abrasivo de un material está en función de su dureza?

33.26 Liste las partes y componentes en los productos de consumo e industriales que tienen que reemplazarse debido al desgaste.

33.27 Liste las operaciones de manufactura en las que sea deseable una fricción alta y en las que es deseable una fricción baja.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

33.28 En la figura 33.1 se muestran diversas capas en la estructura superficial de los metales. Consulte la bibliografía al final de este capítulo y obtenga información sobre los espesores de cada una de estas capas. Comente sus observaciones.

33.29 Consulte el perfil mostrado en la figura 33.3 y coloque valores numéricos razonables para las distancias verticales del eje. Calcule los valores R_a y R_q. Después, dé otra serie de valores para el mismo perfil general y calcule las mismas dos cantidades. Comente sus observaciones.

33.30 Consiga diferentes partes fabricadas con diversos materiales, inspeccione sus superficies en un microscopio óptico a diferentes aumentos, y conjeture con bases razonables sobre el proceso de manufactura o de acabado que se utilizó para producir cada una de estas partes. Explique sus razonamientos.

33.31 Consulte la figura 33.6b y mida los diámetros externo e interno (en dirección horizontal de la fotografía) de los cuatro especímenes mostrados. Recordando que en la deformación plástica el volumen de los anillos permanece constante, calcule *(a)* la reducción de altura, y *(b)* el coeficiente de fricción de cada uno de los tres especímenes comprimidos.

33.32 Utilizando la figura 33.7, trace una gráfica del coeficiente de fricción contra el cambio de diámetro interno para una reducción constante de 40% de la altura.

33.33 Suponga que en el ejemplo 33.1 el coeficiente de fricción es 0.15. Si todos los demás parámetros permanecen iguales, ¿cuál es el nuevo diámetro interno del espécimen?

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

33.34 ¿Sería deseable integrar instrumentos de medición de rugosidad superficial en las máquinas herramienta descritas en las partes III y IV? ¿Cómo lo haría, considerando el ambiente fabril donde se usarían? Haga algunos dibujos preliminares.

33.35 En la sección 33.2 se describen los defectos superficiales principales. ¿Cómo determinaría si estos defectos son un factor significativo en una aplicación en particular?

33.36 ¿Por qué los requisitos de diseño de la rugosidad superficial en aplicaciones de ingeniería son tan amplios? Explique con ejemplos específicos.

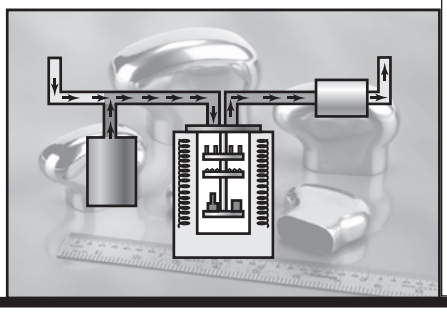
33.37 Describa las diferencias tribológicas entre los elementos ordinarios de las máquinas (como engranes y rodamientos) y los procesos para el trabajo de los metales. Considere factores como carga, velocidad y temperatura.

33.38 Explique por qué los tipos de desgaste en la figura 33.11 ocurren en ubicaciones específicas en la matriz de forjado.

33.39 El desgaste puede tener efectos perjudiciales en las operaciones de manufactura. ¿Puede imaginar situaciones en las que el desgaste pueda ser benéfico? Dé ejemplos.

33.40 Indudablemente, ha reemplazado partes en diversos aparatos eléctricos y automóviles porque se desgastaron. Describa la metodología que seguiríamos en la determinación del tipo o tipos de desgaste al que se han sometido estos componentes.

Tratamientos, recubrimientos y limpieza de las superficies



CAPÍTULO 34

En los capítulos anteriores se describieron los métodos de producción de formas deseadas a partir de una amplia variedad de materiales. Aunque la selección del material y del proceso es extremadamente importante, con frecuencia las propiedades superficiales de un componente determinan su desempeño, además de que por distintas razones técnicas y de estética se pueden realizar diversas operaciones de acabado superficial después de manufacturar una parte. En particular, se describen los procesos para:

- Mejorar la apariencia y textura superficial de las partes.
- Mejorar la resistencia a la corrosión, a los productos químicos y al ambiente.
- Aumentar la dureza, la resistencia al agua y la vida a la fatiga y disminuir la fricción.
- Métodos utilizados para limpiar las superficies de partes manufacturadas.

34.1 Introducción 1059
34.2 Tratamientos superficiales mecánicos 1060
34.3 Deposición y revestimiento mecánico 1062
34.4 Endurecimiento superficial y recubrimiento duro 1062
34.5 Rociado térmico 1063
34.6 Deposición de vapor 1065
34.7 Implantación de iones y recubrimiento por difusión 1068
34.8 Tratamientos láser 1068
34.9 Electrodeposición, deposición sin electricidad y electroformado 1069
34.10 Recubrimientos de conversión 1073
34.11 Inmersión en caliente 1074
34.12 Esmaltado de porcelana; recubrimientos cerámicos y orgánicos 1075
34.13 Recubrimiento de diamante y carbono similar al diamante 1076
34.14 Texturizado superficial 1077
34.15 Pintura 1077
34.16 Limpieza de superficies 1078

EJEMPLOS:

34.1 Reparación de una flecha de turbina motriz mediante rociado térmico 1065
34.2 Aplicaciones comunes actuales y potenciales de la ingeniería superficial láser 1069
34.3 Recubrimientos cerámicos para aplicaciones de alta temperatura 1076

34.1 Introducción

Después de manufacturar una parte, tal vez sea necesario procesar adicionalmente algunas de sus superficies para asegurar ciertas propiedades y características. Quizá deban efectuarse **tratamientos superficiales** para:

- *Mejorar la resistencia al desgaste, la erosión y a la penetración* (guías para máquinas herramienta, superficies de desgaste de maquinaria y flechas, rodillos, levas y engranes).
- *Controlar la fricción* (superficies deslizantes de herramentales, matrices, rodamientos y guías de máquinas).
- *Reducir la adhesión* (contactos eléctricos).
- *Mejorar la lubricación* (modificación de la superficie para retener los lubricantes).
- *Mejorar la resistencia a la corrosión y oxidación* (láminas metálicas para carrocerías automotrices, componentes de turbinas de gas, empaque de alimentos y dispositivos médicos).
- *Mejorar la resistencia a la fatiga* (rodamientos y flechas con filetes).
- *Reconstruir las superficies* (herramentales, matrices y componentes desgastados de máquinas).
- *Modificar texturas superficiales* (apariencia, precisión dimensional y características de fricción).
- *Proporcionar rasgos decorativos* (color y textura).

Se utilizan numerosas técnicas para proporcionar estas características a diversos tipos de materiales metálicos, no metálicos y cerámicos con base en mecanismos que comprenden: *(a)* deformación plástica de la superficie de la pieza de trabajo; *(b)* reacciones químicas; *(c)* medios térmicos; *(d)* deposición; *(e)* implantación, y *(f)* recubrimientos orgánicos y pinturas. Iniciamos con técnicas de endurecimiento superficial y continuamos con descripciones de diferentes tipos de recubrimientos que se aplican a las superficies usando diversos medios. Algunas de estas técnicas también se emplean en la manufactura de dispositivos semiconductores, como se describe en el capítulo 28.

Después se describen las técnicas que se utilizan para proporcionar textura a las superficies de la pieza de trabajo y tipos de recubrimientos orgánicos para diversos propósitos. El capítulo finaliza con métodos empleados en la limpieza de superficies manufacturadas antes de ensamblar los componentes en un producto final, listo para servicio. También se incluyen consideraciones ambientales relativas a los fluidos usados y el material de desecho de diversos procesos de tratamiento superficial, pues son factores que deben tomarse en cuenta.

34.2 Tratamientos superficiales mecánicos

Se utilizan diversas técnicas para mejorar mecánicamente las propiedades superficiales de los componentes manufacturados. A continuación se describen las más comunes.

Granallado. En el granallado, la superficie de la pieza de trabajo recibe impactos repetidos de una gran cantidad de granallas (bolas pequeñas) de acero fundido, vidrio o cerámico, que producen penetraciones traslapadas en ella. Esta acción causa deformación plástica de la superficie a profundidades de hasta 1.25 mm (0.05 pulgada) utilizando tamaños de granalla que van de 0.125 mm a 5 mm (0.005 a 0.2 pulgadas) de diámetro. Debido a que la deformación plástica no es uniforme a lo largo del espesor de la parte, el granallado origina esfuerzos residuales compresivos sobre la superficie, mejorando así la vida a la fatiga del componente al retardar el inicio de grietas por fatiga. A menos que los parámetros del proceso se controlen en forma adecuada, la deformación plástica de la superficie puede ser tan severa que podría dañarla. Es posible reducir el grado de deformación mediante *granallado por gravedad*, que comprende tamaños más grandes de granalla, aunque con menos impactos sobre la superficie de la pieza de trabajo.

El granallado se utiliza ampliamente sobre flechas, engranes, resortes, equipo de perforación de pozos petroleros y partes de motores de propulsión (como los álabes para turbinas y compresores). Sin embargo, si estas partes se someten a altas temperaturas, el esfuerzo residual empieza a relajarse (relajación térmica) y sus efectos benéficos disminuyen en gran medida. Un ejemplo son los álabes de las turbinas de gas a sus temperaturas de operación.

Granallado con láser. En este proceso, también conocido como *granallado de impacto con láser* y desarrollado por primera vez a mediados de la década de 1960 (aunque se comercializó recientemente), la superficie de la pieza de trabajo se somete a impactos planares (por pulsos) de láser de alta potencia. Este proceso de tratamiento superficial produce capas de esfuerzos residuales a compresión que por lo común son de 1 mm (0.04 pulgada) de profundidad con menos de 1% de trabajo en frío de la superficie. El granallado con láser se ha aplicado de manera exitosa y confiable en aspas de ventiladores de motores de propulsión y en materiales como titanio, aleaciones de níquel y aceros, a fin de mejorar la resistencia a la fatiga y cierta resistencia a la corrosión. Las intensidades del láser necesarias para este proceso son de 100 a 300 J/cm^2 y tienen una duración de pulso de unos 30 nanosegundos. En la actualidad, la limitación básica de este proceso para aplicaciones industriales es el elevado costo del láser de alta potencia (hasta 1 kW), que debe operar a niveles de energía de 100 J/pulso.

Granallado a chorro de agua. En este proceso, relativamente reciente, un chorro de agua a presiones tan altas como 400 MPa (60,000 psi) choca en la superficie de la pieza de trabajo, induciendo esfuerzos residuales a compresión y endurecimiento superficial y subsuperficial al mismo nivel que el granallado. El proceso de granallado a chorro de agua se ha utilizado con éxito en aceros y aleaciones de aluminio. El control de las variables del proceso (presión y velocidad del chorro, diseño de la boquilla y su distancia a la superficie) es importante para evitar exceso de rugosidad y daño a la superficie.

Granallado ultrasónico. Este proceso utiliza una herramienta manual con base en un transductor piezoeléctrico. Operando a una frecuencia de 22 kHz, puede tener varias cabezas para diferentes aplicaciones.

Bruñido con rodillo. En este proceso, también conocido como *laminado superficial*, la superficie del componente se trabaja en frío con un rodillo, o juego de rodillos, duro y altamente pulido. Este proceso se utiliza en varias superficies planas, cilíndricas o cónicas (fig. 34.1). El bruñido con rodillo mejora el acabado superficial eliminando raspaduras, marcas de herramientas y picaduras, e induce benéficos esfuerzos residuales superficiales a compresión. Por consiguiente, se mejora la resistencia a la corrosión, ya que no se pueden atrapar los productos y residuos corrosivos. En una variación de este proceso, llamado *bruñido de baja plasticidad*, el rodillo avanza sólo una vez sobre la superficie, induciendo esfuerzos residuales y mínima deformación plástica sobre ella.

También se bruñen superficies cilíndricas internas mediante un proceso similar, conocido como **boleado** o **bruñido con bolas**. En este proceso se empuja una bola lisa (ligeramente más grande que el diámetro del orificio) a lo largo del orificio.

El bruñido con rodillo se utiliza para mejorar las propiedades mecánicas de las superficies y su acabado. Puede emplearse solo o en combinación con otros procesos de acabado, como rectificado, honeado y lapeado. El equipo se puede montar en diversas máquinas herramienta de CNC para mejorar la productividad y consistencia del desempeño. Todos los tipos de metales (blandos o duros) se pueden someter a bruñido con rodillo. Es común usar este proceso en componentes de sistemas hidráulicos, sellos, válvulas, husillos y filetes en flechas.

Endurecimiento por explosión. En el endurecimiento por explosión, las superficies se someten a altas presiones transitorias mediante la colocación y detonación de la capa de una lámina explosiva directamente sobre la superficie de la pieza de trabajo. Las presiones de contacto que se desarrollan como resultado pueden ser tan altas como

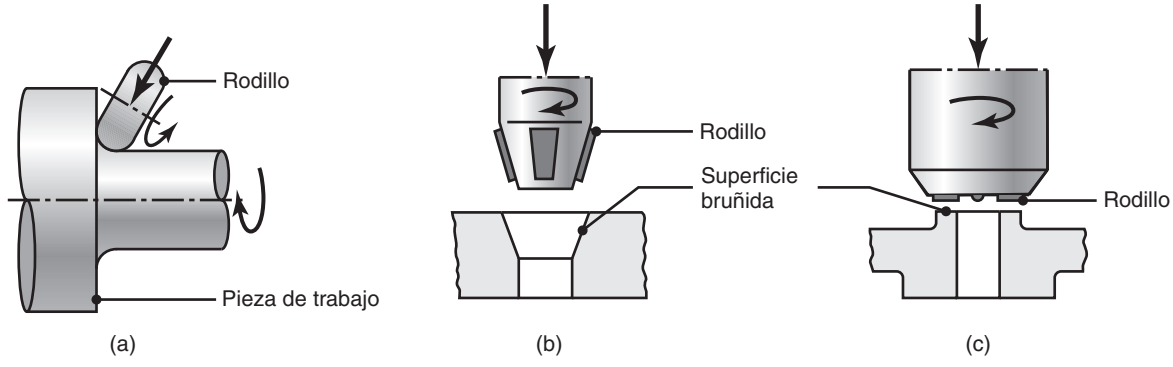


FIGURA 34.1 Herramientas de bruñido y bruñido con rodillo: *(a)* del filete de una flecha escalonada para inducir esfuerzos residuales superficiales a compresión para mejorar la vida de fatiga; *(b)* superficie cónica, y *(c)* superficie plana.

35 GPa (5×10^6 psi) y durar alrededor de 2 a 3 μs. Utilizando este método se pueden obtener aumentos importantes de dureza superficial con muy poco cambio (menos de 5%) en la forma del componente. Por ejemplo, las superficies de las vías del tren pueden endurecerse con este método.

34.3 Deposición y revestimiento mecánico

Deposición mecánica. En la deposición mecánica (también llamada *recubrimiento mecánico, deposición por impacto* o *deposición con martillo*) se compactan partículas metálicas finas sobre las superficies de la pieza de trabajo con perlas de vidrio, cerámico o porcelana que se impelen por medios giratorios (como por tamboreo). Este proceso, que básicamente es de partículas soldadas en frío, suele utilizarse en partes de acero endurecido para automóviles con espesor de deposición generalmente menor a 25 μm (0.001 pulgada).

Revestimiento mecánico. En este proceso, también conocido como *unión por chapeado*, los metales se unen con una capa delgada de metal anticorrosivo mediante la aplicación de presión utilizando rodillos u otros medios. Una aplicación típica es el revestimiento mecánico de aluminio (*Alclad*), en el que una capa anticorrosiva de aleación de aluminio (por lo común, en forma de lámina o tubular) recubre un cuerpo de aleación de aluminio (núcleo). La capa de revestimiento es anódica al núcleo y, generalmente, tiene un espesor menor a 10% del espesor total.

Ejemplos de revestimiento mecánico son el revestimiento mecánico de aluminio 2024 con aluminio 1230 y revestimiento de aluminio 3003, 6061 y 7178 con aluminio 7072. Otras aplicaciones son revestimientos de aceros con acero inoxidable o aleaciones de níquel. El material de revestimiento mecánico también puede aplicarse utilizando matrices (como el revestimiento mecánico de alambre de acero con cobre) o explosivos. Se usa asimismo el revestimiento mecánico de capas múltiples en aplicaciones especiales.

El **revestimiento con láser** consiste en la fusión de un material diferente sobre el sustrato. Se ha aplicado exitosamente a metales y cerámicos, en especial para mejorar la fricción y el comportamiento al desgaste de los componentes.

34.4 Endurecimiento superficial y recubrimiento duro

Las superficies se pueden endurecer por medios térmicos para mejorar sus propiedades de fricción y desgaste, así como su resistencia a la penetración, erosión, abrasión y corrosión. En seguida se describen los métodos más comunes.

Endurecimiento superficial. En la sección 4.10 se describieron los métodos tradicionales de endurecimiento superficial (*carburación, carbonitruración, cianuración, nitruración, endurecimiento por flama* y *endurecimiento por inducción*) y se resumieron en la tabla 4.1. Además de las fuentes comunes de calor (gas y electricidad), se puede utilizar un haz de electrones o un rayo láser como fuente de calor en el endurecimiento superficial de metales y cerámicos. Dicho endurecimiento, así como algunos de los otros procesos de tratamiento superficial descritos en este capítulo, induce esfuerzos residuales sobre las superficies. La formación de martensita durante el endurecimiento superficial causa esfuerzos residuales a compresión sobre las superficies. Tales esfuerzos son convenientes, debido a que mejoran la vida a la fatiga de los componentes y retrasan la iniciación de grietas por fatiga.

Recubrimiento duro. En este proceso, una capa relativamente delgada, un filo o una punta de metal duro resistente al desgaste se deposita sobre la superficie de la pieza de trabajo, utilizando las técnicas de soldadura por fusión descritas en el capítulo 30. Se pueden depositar diversas capas (conocidas como *revestimiento por soldadura*) para

reparar partes desgastadas. El recubrimiento duro mejora la resistencia al desgaste de los materiales, por lo que éstos se emplean en la manufactura de herramentales, matrices y diversos componentes industriales. Las superficies de las partes gastadas también se pueden endurecer para prolongar su uso.

Endurecimiento por chispa. Se pueden depositar recubrimientos duros de carburos de tungsteno, cromo o molibdeno utilizando un arco eléctrico, en un proceso conocido como *endurecimiento por chispa*, *endurecimiento por chispa eléctrica* o *deposición por electrochispa*. Por lo general, la capa depositada tiene 250 μm de espesor. En el endurecimiento por chispa se pueden usar aleaciones de revestimiento duro como electrodos, varillas, alambres o polvo. Estas aleaciones se aplican en asientos para válvulas, herramientas de perforación de pozos petroleros y matrices para el trabajo de los metales en caliente.

34.5 Rociado térmico

El rociado térmico es una serie de procesos importantes en los que recubrimientos de diversos metales, aleaciones, carburos, cerámicos y polímeros se aplican a superficies metálicas mediante una pistola de rociado con una corriente de flama de oxiacetileno, arco eléctrico o arco de plasma. Las primeras aplicaciones de rociado térmico (en la década de 1910) comprendían metales (de ahí que también se le haya llamado **metalización**) y estos procesos están en desarrollo continuo. Primero, se limpian las superficies por rociar a fin de eliminar el aceite y la suciedad, y se desbastan para mejorar la resistencia de la unión, como por chorro de granos (ver sección 26.8). El material de recubrimiento puede tener la forma de alambre, varilla o polvo y cuando las gotas o partículas impactan la pieza de trabajo, se solidifican y unen a la superficie.

Dependiendo del proceso, las velocidades de las partículas van desde bajas hasta 150 a 1000 m/s, aunque pueden ser más altas para aplicaciones especiales. Las temperaturas se encuentran en el intervalo de 3000 °C a 8000 °C (5500 °F a 14,000 °F). El recubrimiento es duro y resistente al desgaste con una estructura en capas del material depositado. Sin embargo, puede tener una porosidad hasta de 20% debido al aire atrapado y a las partículas de óxido causadas por las altas temperaturas comprendidas. La resistencia de la unión depende del proceso específico y las técnicas empleadas, es principalmente de naturaleza mecánica (de ahí la importancia del desbaste de la superficie antes del rociado), pero puede ser metalúrgica en algunos casos. Por lo general, la resistencia de la unión va de 7 a 80 MPa (1 a 12 ksi), dependiendo del proceso específico utilizado.

El rociado térmico se aplica en componentes de motores aéreos (como en la reconstrucción de partes desgastadas), estructuras, tanques de almacenamiento, carros tanque, boquillas para motores de cohetes y componentes que requieren resistencia al desgaste y la corrosión. En un automóvil, el rociado térmico suele aplicarse a los siguientes componentes: cigüeñales, válvulas, boquillas de inyección de combustible, anillos de pistones y monobloques de motores. El proceso también se utiliza en las industrias del gas y petroquímica, para reparar partes desgastadas y restaurar la precisión dimensional en partes que no se han maquinado o formado apropiadamente.

La fuente de energía en los procesos de rociado térmico es de dos tipos: de combustión y eléctrica.

Rociado de combustión

- **Rociado térmico de alambre** (fig. 34.2): la flama de oxiacetileno funde el alambre y lo deposita en la superficie. Su unión es de resistencia media y el proceso es relativamente económico.
- **Rociado térmico de metalurgia de polvos** (fig. 34.2b): similar al rociado de alambre de flama, pero utiliza metalurgia de polvos en lugar de alambre.
- **Cañón detonante:** ocurren explosiones controladas y repetidas utilizando una mezcla de oxiacetileno. El cañón detonante tiene un rendimiento similar al del plasma.

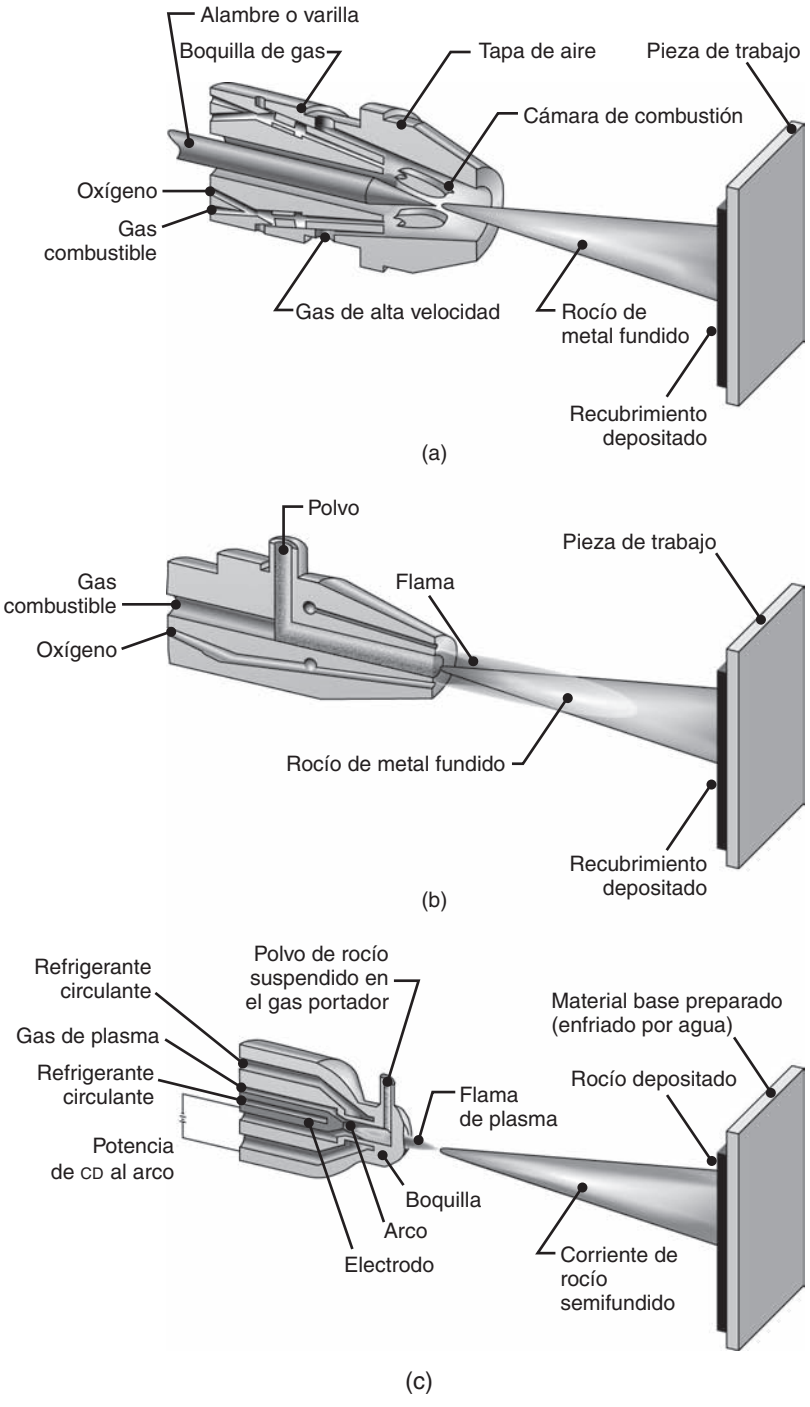


FIGURA 34.2 Esquemas de operaciones de rociado térmico: (a) rociado térmico de alambre; (b) rociado térmico de metalurgia de polvos, y (c) rociado de plasma.

- **Rociado de gas de oxiacetileno de alta velocidad** (HVOF, por sus siglas en inglés): produce un alto rendimiento, similar al cañón detonante, pero es menos costoso.

Rociado eléctrico

Arco de cable bifilar: Se forma un arco entre dos electrodos de alambre consumibles. La unión resultante tiene buena resistencia y el proceso es el menos costoso.

Plasma: Ya sea convencional, de alta energía o de vacío (fig. 34.2c), el plasma produce temperaturas del orden de 8300 °C (15,000 °F) y buena resistencia de la unión con muy bajo contenido de óxido. El **rociado de plasma de baja presión** (LPPS, por sus siglas en inglés) y el **rociado de plasma por vacío** producen recubrimientos con alta resistencia de unión y muy bajos niveles de porosidad y óxidos superficiales.

Rociado en frío. Éste es un proceso más reciente en el que las partículas a rociar están a una temperatura inferior y no se funden. Por lo tanto, la oxidación es mínima. El chorro de rociado es angosto, de alta concentración y tiene velocidades de impacto muy elevadas.

EJEMPLO 34.1 Reparación de una flecha de turbina motriz mediante rociado térmico

La flecha del engrane helicoidal de una turbina motriz de gas GE T-38 tenía dos regiones desgastadas en sus superficies nitruradas. La profundidad por endurecimiento superficial era de 0.3 mm (0.012 pulgada). Aunque los engranes helicoidales estaban en buenas condiciones, se consideraba que la parte era inservible porque no había un método de reparación aprobado. Primero las regiones desgastadas se maquinaron reduciendo su tamaño, se sometieron a chorro de granos y se recubrieron con carburo de tungsteno (12% de contenido de cobalto; ver sección 22.5) mediante la técnica de rociado térmico de oxiacetileno de alta velocidad (HVOF). Después, la parte se sometió a maquinado de acabado a las dimensiones de la flecha original. El costo total de reparación fue una fracción del costo proyectado por reemplazo de la parte.

Fuente: Cortesía de Plasma Technology, Inc.

34.6 Deposición de vapor

La *deposición de vapor* es un proceso en el que el sustrato (superficie de la pieza de trabajo) se somete a reacciones químicas mediante gases que contienen compuestos químicos del material a depositar. Por lo general, el espesor del recubrimiento es de unas cuantas μm, mucho menor que los espesores producidos mediante las técnicas descritas en las secciones 34.2 y 34.3. Los materiales depositados pueden consistir en metales, aleaciones, carburos, nitruros, boruros, cerámicos u óxidos. El control de la composición, el espesor y la porosidad del recubrimiento son importantes. El sustrato puede ser metal, plástico, vidrio o papel. La deposición de vapor se aplica en el recubrimiento de herramientas de corte, brocas, rimas, fresas, punzones, matrices y superficies de desgaste.

Existen dos procesos principales de deposición de vapor: deposición física de vapor y deposición química de vapor.

34.6.1 Deposición física de vapor

Los tres tipos básicos de procesos de deposición física de vapor (PVD, por sus siglas en inglés) son: (1) deposición de vacío o evaporación de arco; (2) chisporroteo o pulverización catódica[N. del R.T], y (3) deposición iónica. Estos procesos se realizan en alto vacío y a temperaturas que van de 200 a 500 °C (400 a 900 °F). En la deposición física de vapor, las partículas a depositar se transportan físicamente a la pieza de trabajo en lugar de hacerlo mediante reacciones químicas (como en la deposición química de vapor).

N. del R.T El efecto de la tecnología es el de pulverizar la superficie de un cátodo por el bombardeo de iones bajo la acción de un campo eléctrico-magnético. Aunque una variante es la pulverización de materiales no conductores mediante RF.

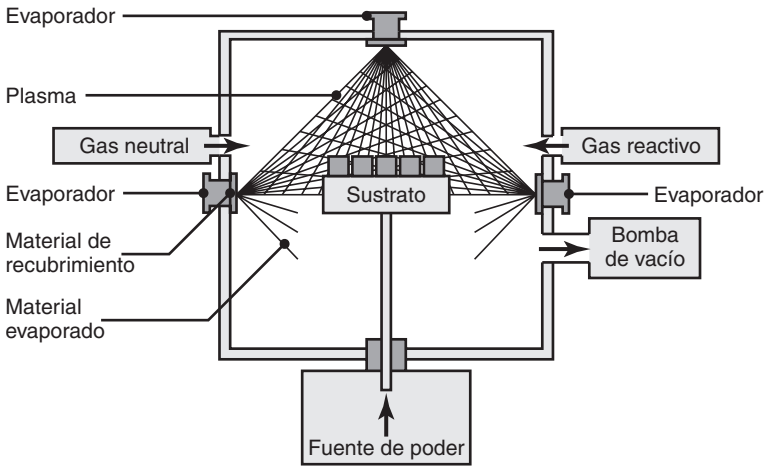


FIGURA 34.3 *(a)* Esquema del proceso de deposición física de vapor. Obsérvese que existen tres evaporadores de arco y las partes a recubrir se colocan en una charola en el interior de la cámara.

Deposición de vacío. En la deposición de vacío (o evaporación), el metal se evapora a una temperatura alta en vacío y se deposita en el sustrato (que por lo general se encuentra a temperatura ambiente o un poco más alta para mejorar la unión). Se pueden depositar recubrimientos de espesor uniforme, incluso sobre formas complejas. En la **deposición de arco** (PV/ARC, por sus siglas en inglés), el material de recubrimiento (cátodo) se evapora mediante varios evaporadores de arco (fig. 34.3) utilizando arcos eléctricos altamente localizados. Los arcos producen un plasma altamente reactivo, que consiste en vapor ionizado del material de recubrimiento. El vapor se condensa sobre el sustrato (ánodo) y lo recubre. Las aplicaciones de este proceso son funcionales (recubrimientos resistentes a la corrosión para aplicaciones de alta temperatura, electrónica y óptica) y decorativas (equipo, aparatos domésticos y joyería). La **deposición de láser por pulsos** es un proceso afín más reciente en el que la fuente de energía es un láser por pulsos.

Chisporroteo o pulverización catódica. En el chisporroteo, un campo eléctrico ioniza un gas inerte (por lo general, argón). Los iones positivos bombardean el material de recubrimiento (cátodo) y producen chisporroteo (expulsión) de sus átomos. Éstos se condensan después sobre la pieza de trabajo, que se calienta para mejorar la unión (fig. 34.4).

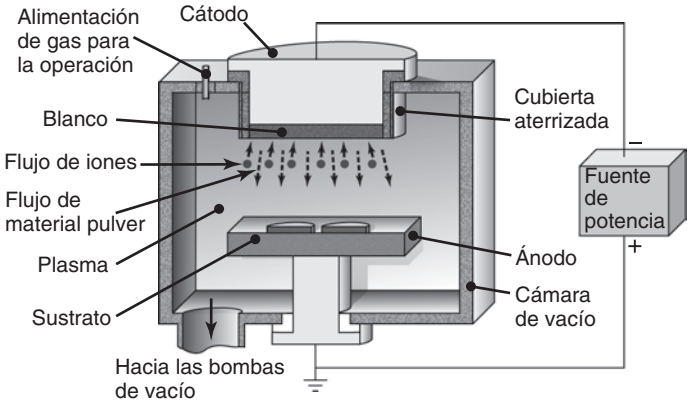


FIGURA 34.4 Esquema del proceso de chisporroteo o pulverización catódica.

En el **chisporroteo reactivo**, el gas inerte se reemplaza con gas reactivo (como oxígeno) en cuyo caso los átomos se oxidan y los óxidos se depositan. Los carburos y nitruros también se depositan mediante chisporroteo reactivo. Es posible depositar asimismo recubrimientos muy delgados de polímeros sobre los sustratos metálicos y poliméricos con un gas reactivo, provocando polimerización del plasma. El chisporroteo de **radiofrecuencia** (**RF**) se utiliza para materiales no conductivos, como aisladores eléctricos y dispositivos semiconductores.

Deposición iónica. La deposición iónica es un término genérico que describe diversos procesos combinados de chisporroteo y evaporación al vacío. Un campo eléctrico provoca una descarga de destello, generando un plasma (fig. 34.5). Los átomos vaporizados en este proceso se ionizan sólo parcialmente. La **deposición reforzada (asistida) por haces iónicos** tiene la capacidad de producir películas delgadas como recubrimiento para aplicaciones de semiconductores, tribológicas y ópticas. Las partes voluminosas se pueden recubrir en grandes cámaras, utilizando fuentes de potencia de alta corriente de 15 kW y voltajes de 100,000 en CD. La **deposición dual de haces iónicos** es una técnica de recubrimiento híbrido que combina deposición física de vapor con bombardeo simultáneo de haces de iones. Esta técnica da como resultado buena adhesión a los metales, cerámicos y polímeros. Los rodamientos e instrumentos dentales de cerámicos son ejemplos de sus aplicaciones.

34.6.2 Deposición química de vapor

La deposición química de vapor (CVD, por sus siglas en inglés) es un proceso *termoquímico* (fig. 34.6). En una aplicación común, como el recubrimiento de herramientas de corte con nitruro de titanio (TiN), las herramientas se colocan en una charola de grafito y se calientan de 950 °C a 1050 °C (1740 °F a 1920 °F) a presión atmosférica en una atmósfera inerte. Después se introducen tetracloruro de titanio (un vapor), hidrógeno y nitrógeno en la cámara. Las reacciones químicas forman nitruro de titanio sobre las superficies de las herramientas. Para obtener un recubrimiento de carburo de titanio, se sustituye metano por los otros gases.

Por lo general, los recubrimientos depositados son más gruesos que los obtenidos utilizando PVD. Un ciclo común de CVD es largo, y consiste en *(a)* tres horas de calentamiento; *(b)* cuatro horas de recubrimiento, y *(c)* de seis a ocho horas de enfriamiento a temperatura ambiente. El espesor del recubrimiento depende de las velocidades de flujo de los gases empleados, el tiempo y la temperatura.

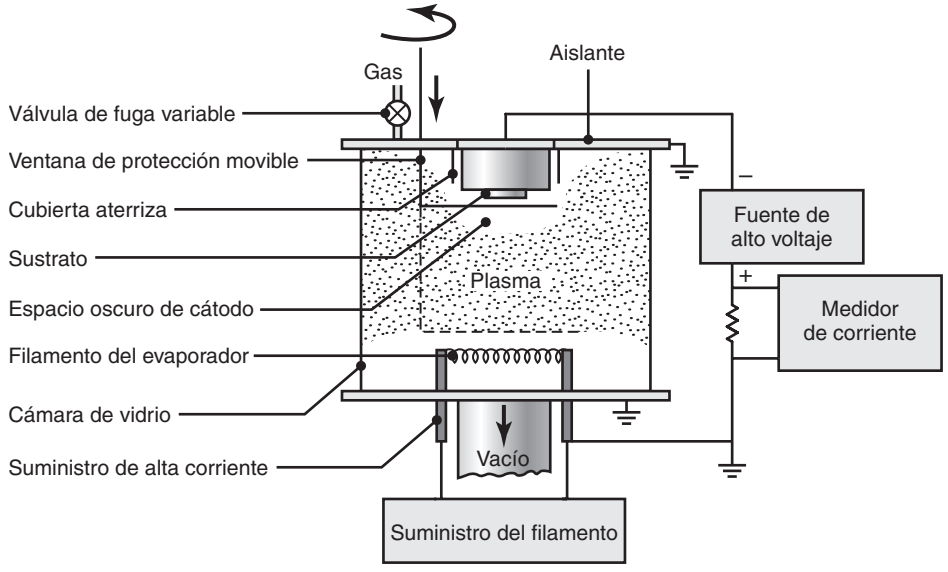


FIGURA 34.5 Esquema de un aparato de deposición iónica.

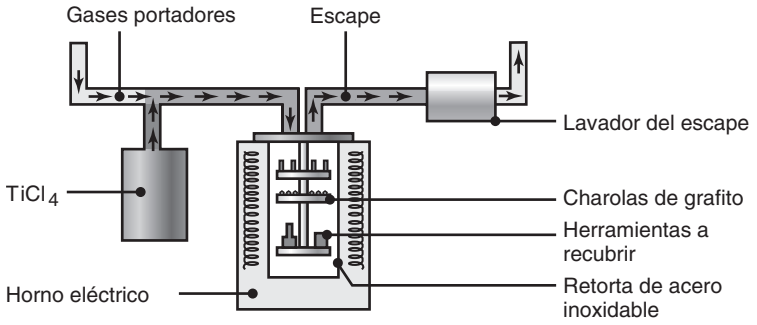


FIGURA 34.6 Esquema del proceso de deposición química de vapor. Obsérvese que las partes y herramientas a recubrir se colocan en charolas en el interior de la cámara.

En CVD, no tienen restricciones los tipos de materiales permisibles para los recubrimientos y la pieza de trabajo. Es posible emplear casi cualquier material como recubrimiento o como sustrato, aunque la resistencia de la unión puede variar. El proceso de CVD también se utiliza para fabricar recubrimientos de diamante sin usar aglutinantes, a diferencia de las películas de diamante policristalino que utilizan de 1% a 10% de materiales de aglutinantes. Un desarrollo más reciente en la deposición química de vapor es el **CVD de temperatura media** (MTCVD, por sus siglas en inglés). Esta técnica produce una resistencia superior a la propagación de grietas que los recubrimientos de CVD.

34.7 Implantación de iones y recubrimiento por difusión

En la **implantación de iones**, los iones (átomos cargados) se introducen en la superficie del material de la pieza de trabajo. Los iones se aceleran en vacío de manera que penetran el sustrato a una profundidad de unas cuantas μm. La implantación de iones (que no debe confundirse con la deposición iónica) modifica las propiedades superficiales aumentando la dureza superficial y mejorando la resistencia a la fricción, al desgaste y a la corrosión. Este proceso se puede controlar de manera precisa y la superficie puede enmascararse para evitar la implantación de iones en lugares no deseados.

La implantación de iones es efectiva particularmente en materiales como aluminio, titanio, aceros inoxidables, aceros para herramentales y matrices, carburos y recubrimientos de cromo. Por lo general, este proceso se utiliza en herramientas de corte y formado, matrices y moldes, y en prótesis metálicas, como caderas y rodillas artificiales. Cuando se emplea en aplicaciones específicas, como semiconductores (sección 28.3), este proceso se conoce como **dopaje**, que significa alear con pequeñas cantidades de diversos elementos.

Recubrimiento por difusión. Éste es un proceso en el que un elemento de aleación se difunde en la superficie del sustrato (por lo general, aceros), alterando sus propiedades superficiales. Los elementos de aleación se pueden suministrar en los estados sólido, líquido o gaseoso. Este proceso ha adquirido diferentes nombres (dependiendo del elemento difundido), como se vio en la tabla 4.1, que incluía procesos de difusión como *carburación, nitruración y borurización.*

34.8 Tratamientos láser

Como ya se describió en diversos capítulos de este libro, el láser tiene aplicaciones cada vez más amplias en los procesos de manufactura (maquinado láser, formado, unión,



FIGURA 34.7 Resumen de procesos láser de ingeniería de superficies. *Fuente*: N. B. Dahotre.

producción rápida de prototipos y metrología) e ingeniería de superficies (granallado con láser, aleación, tratamientos superficiales y texturizado). En la actualidad existen láseres poderosos, eficientes, confiables y menos costosos para varios tratamientos superficiales de costos efectivos, como se indica en la figura 34.7.

EJEMPLO 34.2 Aplicaciones comunes actuales y potenciales de la ingeniería superficial láser

En este ejemplo se proporcionan diversas aplicaciones de láser en la práctica de ingeniería. Los láseres más utilizados son Nd:YAG y CO_2; por lo general se usan láseres excímeros para texturizado superficial (ver también tabla 27.2).

Endurecimiento superficial localizado—Hierros fundidos: revestimientos de cilindros de motores a diesel, ensambles de direcciones automotrices y árboles de leva. Aceros al carbono: engranes y partes electromecánicas.
Aleación superficial—Aceros aleados: componentes de rodamientos. Aceros inoxidables: válvulas de motores a diesel e insertos para asientos. Aceros para herramentales y matrices: matrices para formado y fundición a presión.
Deposición—Aceros aleados: válvulas automotrices y asientos de válvulas. Superaleaciones: álabes para turbinas.
Recubrimiento cerámico—Aleaciones de aluminio-silicio: cilindros para motores automovilísticos.
Texturizado superficial—Metales, plásticos, cerámicos y madera: todo tipo de productos.

34.9 Electrodeposición, deposición sin electricidad y electroformado

La deposición, como sucede con otros procesos de recubrimiento, proporciona propiedades de resistencia al desgaste y a la corrosión, alta conductividad eléctrica y mejor apariencia y reflectividad, así como propiedades similares deseables.

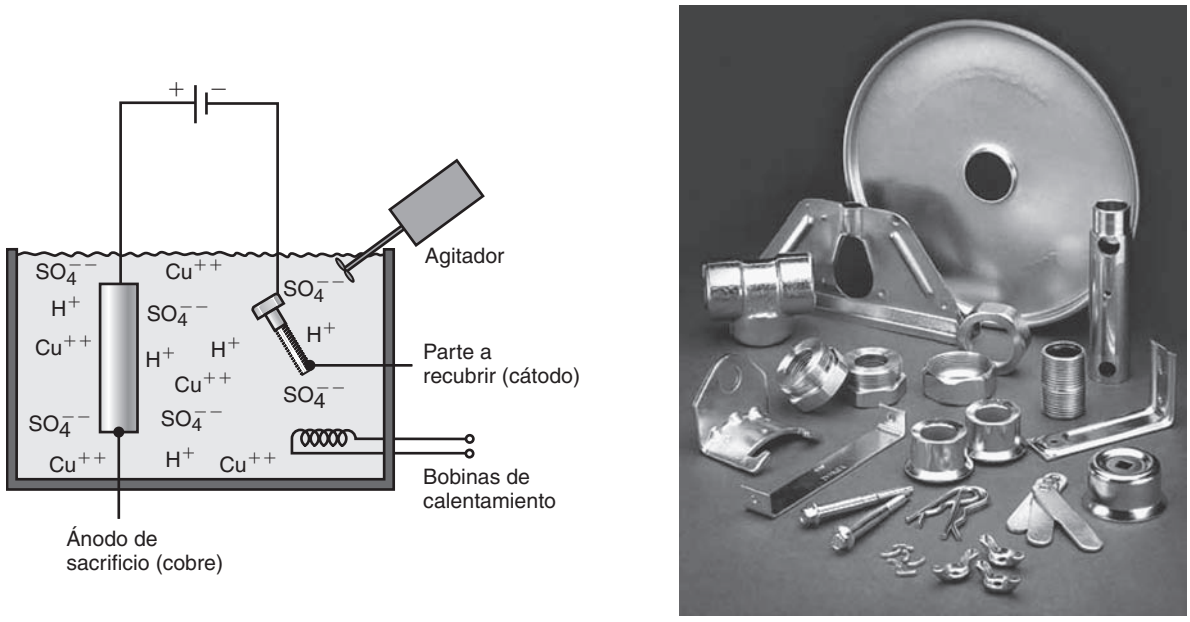


FIGURA 34.8 *(a)* Esquema del proceso de electrodeposición. *(b)* Ejemplos de partes electrodepositadas. *Fuente*: Cortesía de BFG Electroplating.

Electrodeposición. En la electrodeposición, la pieza de trabajo (cátodo) se deposita con un metal diferente (ánodo), que se transfiere mediante una solución electrolítica base agua (fig. 34.8). Aunque el proceso de deposición comprende muchas reacciones, el proceso consiste básicamente en la siguiente secuencia:

1. Los iones metálicos del ánodo se descargan utilizando la energía potencial de la fuente externa de electricidad.
2. Los iones metálicos se disuelven en la solución.
3. Se depositan en el cátodo.

El volumen del metal depositado se puede calcular con base en la expresión:

$$\text{Volumen del metal depositado} = cIt \tag{34.1}$$

donde I es la corriente en amperios, t el tiempo y c una constante que depende del metal de la placa, el electrolito y la eficiencia del sistema y, por lo regular, se encuentra en el intervalo de 0.03 a 0.1 mm^3/amp–s. Obsérvese que, para el mismo volumen de material depositado, cuanto más grande sea la superficie de la pieza de trabajo depositada, más delgada será la capa. Por lo común, el tiempo requerido para la electrodeposición es largo, porque la velocidad de deposición suele ser del orden de 75 μm/hora. En general, las capas delgadas depositadas son del orden de 1 μm (40 μpulg) y las capas gruesas pueden ser hasta de 500 μm.

Las soluciones de deposición son ácidos fuertes o soluciones de cianuro. Al utilizar el metal de la solución para depositar, es necesario reponerlo periódicamente, lo que se logra mediante dos métodos principales: en ocasiones se agregan sales de metales adicionales a la solución, o se usa un *ánodo de sacrificio* del metal a recubrir dentro del tanque de electrodeposición, que se disuelve a la misma velocidad con que se deposita el metal.

Existen tres formas principales de electrodeposición:

1. En la **deposición en bastidor**, las partes a depositar se colocan en un bastidor, que después se transporta a través de una serie de tanques de proceso.
2. En la **deposición en barril**, pequeñas partes se colocan en el interior de un barril permeable, que a su vez se introduce en un tanque o tanques de proceso. Esta forma de electrodeposición se realiza por lo común con partes pequeñas, como tornillos, tuercas, engranes, accesorios, etc. El fluido electrolítico puede atravesar el barril y aportar el metal para la deposición; el contacto eléctrico se provee a través del barril y el contacto con otras partes.
3. En el **procesamiento con cepillo**, el fluido electrolítico se bombea a través de un cepillo manual con cerdas metálicas. En este caso la pieza de trabajo puede ser muy grande, por lo que el proceso resulta apropiado para reparación o deposición en campo y puede utilizarse para aplicar recubrimientos sobre equipos grandes sin desensamblarlos.

Se puede lograr una electrodeposición simple en un solo baño o tanque de proceso, pero es más común utilizar una secuencia de operaciones en una línea de deposición. Por ejemplo, los siguientes tanques de proceso pueden ser parte de una operación de electrodeposición:

- Se utilizan tanques de limpieza química y desengrasado para eliminar contaminantes superficiales y mejorar la adhesión superficial del recubrimiento de deposición.
- Las piezas de trabajo se pueden exponer a un fuerte baño de ácido (solución de decapado) para reducir o eliminar el espesor del recubrimiento de óxido en la pieza de trabajo.
- Se puede aplicar un recubrimiento base. Esto comprendería el mismo metal o uno diferente al de la superficie final. Por ejemplo, si el recubrimiento metálico deseado no se adhiere bien al sustrato, puede aplicarse un recubrimiento intermedio. Además, si se desean películas gruesas, es posible utilizar un tanque de deposición a fin de desarrollar con rapidez una película y usar un tanque posterior con aditivos abrillantadores en la solución electrolítica para desarrollar el último acabado superficial.
- Un tanque en el que se realiza la electrodeposición final.
- Se utilizan tanques de enjuague a lo largo de la secuencia.

Los tanques de enjuague son necesarios por muchas razones. Parte de la deposición se efectúa utilizando sales de cianuro para entregar los iones metálicos requeridos. Si se arrastra cualquier residuo de ácido (como de un tanque de decapado) al tanque de solución de cianuro, se exhala gas venenoso de cianuro de hidrógeno. Éste es un aspecto de seguridad importante y los controles ambientales son fundamentales en las instalaciones de deposición. Además, los restos de la solución de deposición contienen algunos iones metálicos y a menudo es deseable recuperarlos capturándolos en un tanque de enjuague.

La velocidad de deposición de la película depende de la densidad de la corriente local y no es necesariamente uniforme en una parte. Las piezas de trabajo con formas complejas pueden requerir una geometría alterada debido a que los espesores de deposición son variables, como se muestra en la figura 34.9.

Los metales comunes de deposición son cromo, níquel (protección contra la corrosión), cadmio, cobre (resistencia a la corrosión y conductividad eléctrica), estaño y zinc (protección contra la corrosión, en particular para láminas de acero). El **cromado** se realiza depositando primero el metal con cobre, después con níquel y por último con cromo. El **cromado duro** se efectúa directamente sobre el metal base y produce una dureza superficial de hasta 70 HRC (ver fig. 2.14) y un espesor de casi 0.05 mm (0.002 pulgada) o más. Este método se utiliza para mejorar la resistencia al desgaste y la corrosión de herramientas, vástagos de válvulas, flechas hidráulicas y revestimientos para cilindros de motores a diesel y para aeronaves. También se emplea para reconstruir partes desgastadas.

Algunos ejemplos de electrodeposición incluyen el cobrizado de alambre de aluminio y tarjetas de fenólicos para circuitos impresos, el cromado de herramientas manuales, el estañado de conexiones eléctricas de cobre (para facilitar la soldadura), el galvanizado de lámina metálica (ver también la sección 34.11), y la deposición en componentes como las

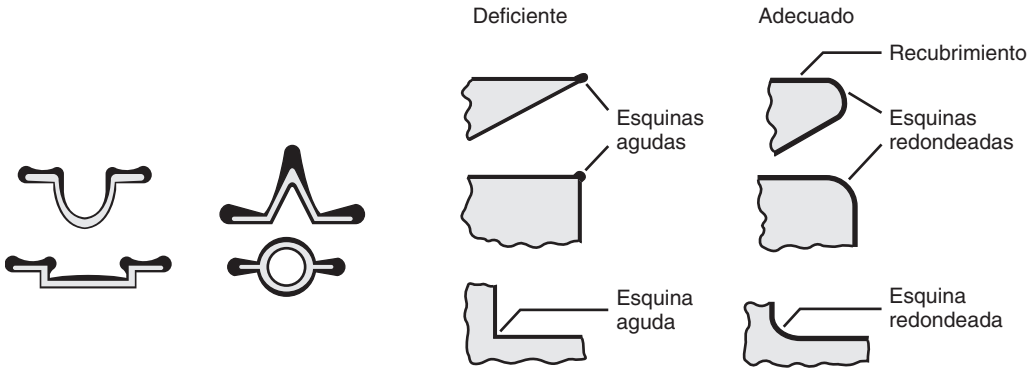


FIGURA 34.9 *(a)* Esquema de recubrimientos no uniformes (exagerados) en partes electrodepositadas. *(b)* Lineamientos de diseño para electrodeposición. Obsérvese que deben evitarse las esquinas agudas externas e internas para obtener un espesor uniforme en la deposición.

matrices para el trabajo de los metales que requieren resistencia al desgaste y excoriación (soldadura en frío de pequeñas piezas de la superficie de la pieza de trabajo). Metales como el oro, la plata y el platino son materiales de electrodeposición importantes en la industria electrónica y en la joyería.

Los plásticos (como el ABS, polipropileno, polisulfonato, policarbonato, poliéster y nailon) también pueden ser substratos para electrodepósito. Debido a que no son eléctricamente conductivos, los plásticos deben predepositarse utilizando un proceso como la deposición de níquel sin electricidad. Las partes por recubrir pueden ser simples o complejas sin que su tamaño sea una limitación.

Deposición sin electricidad. Este proceso se efectúa mediante una reacción y sin el uso de una fuente externa de electricidad. La aplicación más común utiliza níquel como material de deposición, aunque también emplea cobre. En la deposición de níquel sin electricidad, el cloruro de níquel (como sal metálica) se reduce (usando hipofosfito de sodio como agente reductor) a metal de níquel, que después se deposita en la pieza de trabajo. La dureza de la deposición del níquel se ubica entre 425 y 575 HV y posteriormente se puede tratar con calor para alcanzar 1000 HV. El recubrimiento tiene excelente resistencia al desgaste y la corrosión.

Es posible recubrir con éxito cavidades, oquedades y las superficies internas de tubos. También se puede utilizar la deposición sin electricidad con materiales no conductivos, como plásticos y cerámicos. Este proceso es más costoso que la electrodeposición. Sin embargo, a diferencia de esta última, el espesor del recubrimiento de la deposición sin electricidad siempre es uniforme.

Electroformado. Una variación de la electrodeposición, el electroformado, es en realidad un proceso de fabricación metálica. El metal se electrodeposita en un *mandril* (también llamado *molde* o *matriz*), que después se retira; por lo tanto, el propio recubrimiento se convierte en el producto (fig. 34.10). Se pueden fabricar tanto formas simples como complejas por electroformado, con espesores de pared tan pequeños como 0.025 mm (0.001 pulgada). Las partes pueden pesar desde algunos gramos hasta 270 kg (600 libras). Es posible aumentar las capacidades de producción mediante el uso de múltiples mandriles.

Los mandriles se fabrican con varios materiales: metálicos (zinc o aluminio) o no metálicos (que se pueden hacer eléctricamente conductivos con los recubrimientos apropiados). Los mandriles deben tener la capacidad de retirarse físicamente sin dañar la parte electroformada. También se pueden fabricar con aleaciones de baja fusión, cera o plásticos, que pueden fundirse o disolverse con los productos químicos apropiados.

El proceso de electroformado es particularmente adecuado para bajas cantidades de producción o para partes complejas (como moldes, matrices, guías de onda, boquillas y fuelles) fabricadas con níquel, cobre, oro y plata. También es apropiado para aplicaciones aeroespaciales, de electrónica y de electróptica.

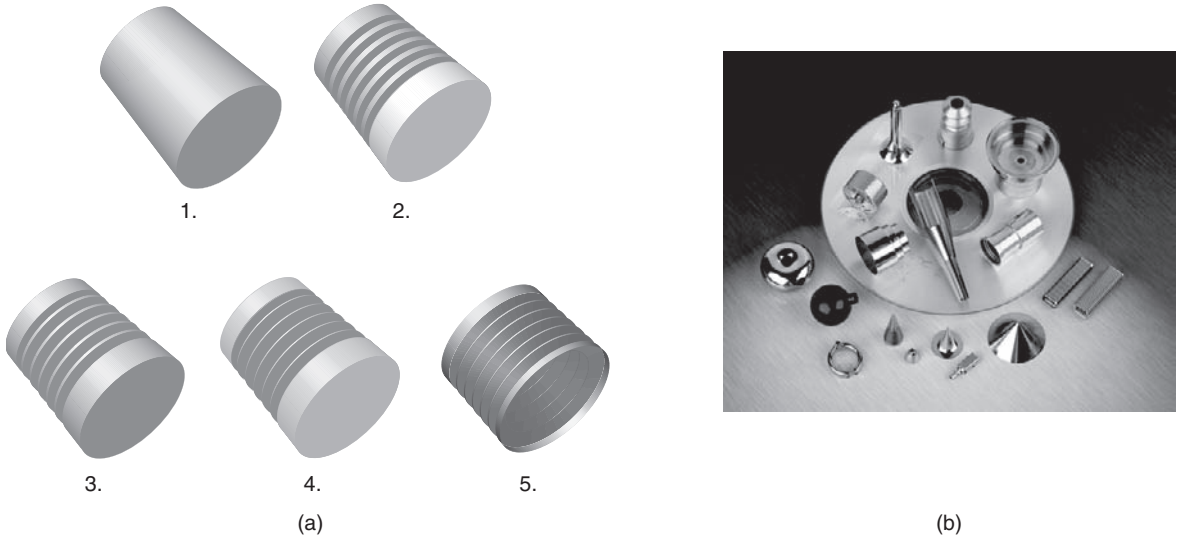


FIGURA 34.10 *(a)* Secuencia común en electroformado. (1) Se selecciona un mandril con el tamaño nominal correcto. (2) Se maquina la geometría deseada en el mandril (en este caso un fuelle). (3) Se electrodeposita el metal deseado en el mandril. (4) El material depositado se recorta, si es necesario. (5) El mandril se disuelve mediante maquinado químico. *(b)* Colección de partes electroformadas. *Fuente*: Cortesía de Servometer® Cedar Grove, NJ.

34.10 Recubrimientos de conversión

El recubrimiento de conversión (también llamado *pinturas base de reacción química*) es el proceso de producción de un recubrimiento que se forma sobre superficies metálicas como resultado de reacciones químicas o electroquímicas. El recubrimiento de conversión puede aplicarse a diversos metales (en particular acero, aluminio y zinc). Los óxidos que se forman naturalmente sobre sus superficies son una forma de este tipo de recubrimiento.

Para producir estos recubrimientos se utilizan *fosfatos, cromatos* y *oxalatos*. Su función es proteger contra la corrosión, pintura previa y acabado decorativo. Una aplicación importante es el recubrimiento de conversión de piezas de trabajo para que sirvan como portadoras de lubricantes en operaciones de formado en frío, en particular recubrimientos de fosfato de zinc y oxalato (ver la sección 33.7.6). Los dos métodos comunes de recubrimiento son la *inmersión* y el *rociado*. El equipo requerido depende del método de aplicación, el tipo de producto y las consideraciones de calidad.

Anodizado. Es un proceso de oxidación (*oxidación anódica*) en el que las superficies de la pieza de trabajo se convierten en una capa dura y porosa de óxido que proporciona resistencia a la corrosión y un acabado decorativo. Dicha pieza es el ánodo en una celda electrolítica inmersa en un baño de ácido, que produce una adsorción de oxígeno del baño. Se pueden utilizar tintes orgánicos de varios colores (por lo general negro, rojo, bronce, dorado o gris) para producir películas superficiales estables y durables. La anodización se aplica en muebles y utensilios de aluminio, formas arquitectónicas, molduras automotrices, marcos para pinturas, llaves y artículos deportivos. Las superficies anodizadas también sirven como una buena base para pintar, en particular sobre aluminio, que de lo contrario sería difícil de pintar.

Coloración. Como su nombre indica, la coloración comprende procesos que alteran el color de metales, aleaciones y cerámicos. Este cambio se produce mediante la conversión de superficies (por procesos químicos, electroquímicos o térmicos) en compuestos químicos como los óxidos, cromatos y fosfatos. Un ejemplo es el *ennegrecimiento de fundición* del

hierro y los aceros, un proceso que utiliza soluciones de sosa cáustica caliente para producir reacciones químicas que forman una película de óxido lustrosa, negra en las superficies.

34.11 Inmersión en caliente

En la inmersión en caliente, la pieza de trabajo (por lo general acero o hierro) se sumerge en un baño de metal fundido, como *(a)* zinc, para lámina de acero galvanizado y accesorios de plomería; *(b)* estaño, para hojalata y latas de estaño para contenedores de alimentos; *(c)* aluminio (aluminización), y *(d) terne*, una aleación de plomo con 10% a 20% de estaño. Los recubrimientos por inmersión en caliente de partes discretas proporcionan resistencia a la corrosión de largo plazo a tubos galvanizados, accesorios de plomería y muchos otros productos.

En la figura 34.11 se muestra una línea continua típica de *inmersión en caliente galvanizada* para lámina de acero. Primero, la hoja laminada se limpia electrolíticamente y se restriega con un cepillo. Después la lámina se recuece en un horno continuo con atmósfera y temperatura controladas y se sumerge en zinc fundido a unos 450 °C (840 °F). El espesor del recubrimiento de zinc se controla mediante la acción de limpieza de una corriente de aire o vapor, conocida como *cuchilla de aire* (similar al secado por aire en los lavados de automóviles). Es importante el drenado correcto para retirar el exceso de materiales de recubrimiento.

El espesor del recubrimiento suele darse en términos de peso por unidad de área superficial del recubrimiento de la lámina, por lo común de 150 a 900 g/m^2 (0.5 a 3 oz/pies^2. La vida útil depende del espesor del recubrimiento de zinc y del ambiente al que se expone. En las carrocerías automotrices se utilizan ampliamente diversas **láminas de acero precubiertas**. El drenado correcto para retirar el exceso de materiales de recubrimiento es un factor que debe considerarse.

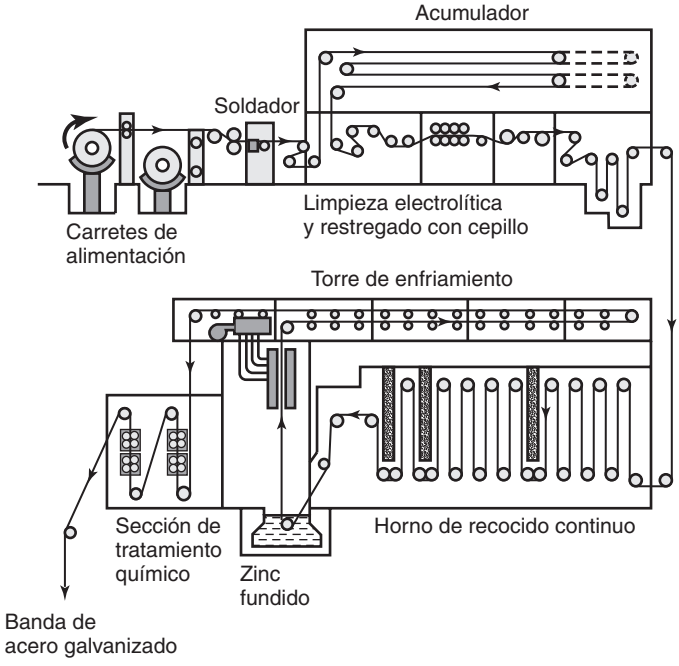


FIGURA 34.11 Línea de flujo para galvanizado continuo por inmersión en caliente de lámina metálica. El soldador (parte superior izquierda) se utiliza para soldar los extremos de los rollos a fin de mantener flujo continuo de material. *Fuente*: Cortesía del American Iron and Steel Institute.

34.12 Esmaltado de porcelana; recubrimientos cerámicos y orgánicos

Los metales pueden recubrirse con varios recubrimientos de vidrio (vítreos) para adquirir resistencia a la corrosión y eléctrica y para recibir protección a temperaturas elevadas. Estos recubrimientos suelen clasificarse como **esmaltes de porcelana** e incluir esmaltes y cerámicos. La raíz de la palabra "porcelana" es *porcellana*, que en italiano significa "concha marina". Nótese que la palabra *esmalte* también se utiliza como término para pinturas brillantes, ya que indica un recubrimiento liso y duro.

Esmaltes. Los esmaltes de porcelana son recubrimientos inorgánicos vidriados que consisten en diversos óxidos metálicos que están disponibles en diferentes colores y transparencias. El *esmaltado* (que en la Edad Media era un arte totalmente desarrollado) comprende la fusión del material de recubrimiento con el sustrato cuando se calientan de 425 °C a 1000 °C (800 °F a 1800 °F), a fin de licuar los óxidos. El recubrimiento se puede aplicar por inmersión, rociado o electrodeposición y los espesores suelen ir de 0.05 mm a 0.6 mm (0.002 a 0.025 pulgada). Es posible controlar la viscosidad del material utilizando aglutinantes, de manera que el recubrimiento se adhiera a las superficies verticales durante la aplicación. Dependiendo de su composición, los esmaltes tienen resistencias variables a álcalis, ácidos, detergentes, limpiadores y agua.

El esmaltado de porcelana se aplica en aparatos electrodomésticos, accesorios de plomería, equipo de procesamiento químico, señalamientos, utensilios de cocina y joyería. También se utilizan esmaltes de porcelana como recubrimientos de protección en componentes para motores de propulsión. Por lo común, los metales recubiertos son aceros, hierro fundido y aluminio. Se emplean vidrios como recubrimiento (para obtener resistencia química), donde el espesor del vidrio es mucho mayor que el del esmalte. El **vidriado** es la aplicación de recubrimientos de vidrio en utensilios de cerámica para darles acabados decorativos y hacerlos impermeables a la humedad.

Recubrimientos cerámicos. Materiales como los polvos de metales duros, óxido de aluminio y óxido de zirconio se aplican al sustrato a temperatura ambiente utilizando aglutinantes. Estos recubrimientos actúan como barreras térmicas y se han aplicado (por lo general, mediante técnicas de rociado térmico) a matrices de extrusión en caliente, álabes para turbinas, componentes de motores a diesel y boquillas para motores de cohetes con el fin de prolongar la vida de estos componentes. También se usan en aplicaciones de resistencia eléctrica para soportar la formación repetida de arcos. Los arcos de plasma se emplean en los casos en que las temperaturas pueden alcanzar 15,000 °C (27,000 °F), mucho mayores que las obtenidas por flamas.

Recubrimientos orgánicos. Las superficies metálicas pueden recubrirse o precubrirse con varios recubrimientos, películas y laminados orgánicos para mejorar la apariencia y resistencia a la corrosión. Los recubrimientos se aplican al rollo de materia prima en líneas continuas que por lo general tienen un espesor de 0.0025 mm a 0.2 mm (0.0001 a 0.008 pulgada). Dichos recubrimientos cuentan con una amplia gama de propiedades: flexibilidad, durabilidad, dureza, resistencia a la abrasión y a químicos, color, textura y brillo. Posteriormente se da forma a la lámina de metal recubierta para obtener diversos productos, como gabinetes de televisores, cubiertas de aparatos eléctricos, revestimientos de madera, estantería, gabinetes de protección en construcciones residenciales y mobiliario metálico.

Aplicaciones más críticas comprenden, por ejemplo, la protección de aeronaves navales, que están sujetas a humedad elevada, lluvia, agua marina, contaminantes (como los de las chimeneas de los barcos), combustible para aviación, fluidos para deshielo y ácidos de baterías, además del impacto de partículas como polvo, grava, piedras y sales para deshielo. En estructuras de aluminio, los recubrimientos orgánicos consisten generalmente en una capa de fondo de epóxico y una capa final de poliuretano con una vida útil de cuatro a seis años. El desempeño de la capa de fondo es un factor importante en la durabilidad del recubrimiento.

EJEMPLO 34.3 Recubrimientos cerámicos para aplicaciones de alta temperatura

Pueden proporcionarse ciertas características a los productos (como resistencia al desgaste y aislamiento térmico y eléctrico, sobre todo a temperaturas elevadas) mediante recubrimientos cerámicos, en lugar de hacerlo con los propios metales o materiales base. La selección de materiales con estas propiedades puede ser costosa y quizá no satisfagan los requisitos de resistencia estructural en alguna aplicación particular.

Por ejemplo, un componente resistente al desgaste no tiene que fabricarse por completo con un material resistente al desgaste, ya que las propiedades de una sola capa delgada de su superficie son pertinentes para su uso. En consecuencia, los recubrimientos tienen aplicaciones importantes. En la tabla 34.1 se muestran diversos recubrimientos cerámicos y sus aplicaciones comunes a temperaturas elevadas. Estos recubrimientos se pueden aplicar en forma simple o en capas, como se hace en las herramientas de corte con recubrimiento de capas múltiples (ver fig. 22.8).

TABLA 34.1

Propiedad	Tipo de cerámica	Aplicación
Resistencia al desgaste	Óxido de cromo, óxido de aluminio, titania de aluminio	Bombas, flechas de turbinas, sellos, bielas de compresores para la industria petrolera; barriles extrusores de plásticos; matrices de extrusión.
Aislamiento térmico	Óxido de zirconio (itrios (itrios estabilizados dos), óxido de zirconio (calcios estabilizados), zirconato de magnesio	Aspas de ventiladores, alabes de compresores y sellos para turbinas de gas; válvulas, pistones y cabezas de combustion para motores de automóviles.
Aislamiento eléctrico	Aluminato de magnesio, óxido de aluminio	Bobinas de inducción, soportes fijos para soldadura fuerte, aplicaciones eléctricas generales.

34.13 Recubrimiento de diamante y carbono similar al diamante

En la sección 8.7 se describen las propiedades del *diamante* aplicables a la ingeniería de manufactura. Se han realizado avances importantes en el recubrimiento con diamante de metales, vidrio, cerámicos y plásticos, utilizando técnicas como la deposición química de vapor (CVD), deposición de vapor asistida por plasma y deposición reforzada con haz de iones.

Ejemplos de productos con recubrimiento de diamante son las ventanas a prueba de raspaduras (como las utilizadas en aeronaves y sensores en los misiles para protección contra tormentas de arena), anteojos para el sol, herramientas de corte (como insertos, brocas y fresas), superficies de desgaste de micrómetros y calibradores, bisturís quirúrgicos, navajas, localizadores y sensores de calor electrónicos e infrarrojos, diodos emisores de luz, altavoces con recubrimiento de diamante para sistemas de estéreos, álabes para turbinas y boquillas de inyección de combustible.

Se han desarrollado técnicas para producir **películas independientes de diamante** del orden de 1 mm (0.04 pulgada) de espesor y hasta de 125 mm (5 pulgadas) de diámetro. Éstas incluyen película lisa de diamante transparente a la luz, a diferencia de la gris y opaca que se producía inicialmente. Esta película se corta con láser a las formas deseadas y se suelda sobre herramientas de corte (por ejemplo).

El desarrollo de estas técnicas, en combinación con las importantes propiedades del diamante (dureza, resistencia al desgaste, alta conductividad térmica y transparencia a la luz ultravioleta y a frecuencias de microondas) han permitido la producción de varias partes y componentes aeroespaciales y electrónicos.

También se desarrollan estudios relacionados con el crecimiento de películas de diamante sobre sustratos de cobre cristalino mediante la implantación de iones de carbono. Una aplicación importante es la fabricación de chips para computadoras (ver capítulo 28). El diamante puede doparse para formar extremos tipo *p* y tipo *n* en semiconductores a fin de fabricar transistores; su alta conductividad térmica permite un empaque más cerrado de chips que el que sería posible con chips de silicio o arseniuro de galio, aumentando en forma significativa la velocidad de las computadoras.

Carbono similar al diamante. Los recubrimientos de carbono similar al diamante (DLC, por sus siglas en inglés), de algunos nanómetros de espesor, se producen mediante un proceso de deposición de baja temperatura, asistida por haz de iones. Su estructura está entre la del diamante y la del grafito. Menos costoso que las películas de diamante pero con propiedades similares (como baja fricción, alta dureza e inactividad química, además de una superficie lisa), el DLC se aplica en herramentales y matrices, engranes, componentes para motores, rodamientos, sistemas microelectromecánicos y sondas de microescala. Como recubrimiento en herramientas de corte, su dureza es de unos 5000 HV (en comparación con el doble para el diamante).

34.14 Texturizado superficial

Como se ha observado en los capítulos anteriores, cada proceso de manufactura (como la fundición, forjado, metalurgia de polvos, moldeo por inyección, maquinado, rectificado, pulido, maquinado por descarga eléctrica, chorro de granos y cepillado con alambre) produce cierta textura y apariencia superficial. Es obvio que algunos de ellos pueden utilizarse para modificar la superficie producida mediante un proceso previo; por ejemplo, el rectificado de la superficie de una parte fundida. Sin embargo, es posible modificar adicionalmente las superficies manufacturadas con operaciones secundarias por razones técnicas, funcionales, ópticas o estéticas.

Conocidos como *texturizado superficial,* generalmente estos procesos adicionales consisten en las siguientes técnicas:

- **Ataque:** utilizando productos químicos o técnicas de chisporroteo.
- **Arcos eléctricos.**
- **Láseres:** utilizando láseres excímeros con haces por pulsos; se aplican en moldes para fundición de molde permanente, rodillos para molinos de temple; cabezas de palos de golf y discos duros para computadoras
- **Oxígeno atómico:** reaccionan con superficies para producir una textura superficial fina, en forma de cono.

Los posibles efectos adversos de estos procesos en las propiedades de los materiales y el desempeño de las partes texturizadas son aspectos importantes.

34.15 Pintura

Debido a sus propiedades decorativas y funcionales (como la protección ambiental, bajo costo, fácil aplicación y variedad de colores disponibles), la **pintura** se ha utilizado ampliamente como recubrimiento superficial. Sus aplicaciones en la ingeniería van desde aparatos eléctricos y máquinas herramienta hasta carrocerías automotrices y fuselajes de aeronaves. Por lo general, las pinturas se clasifican como:

- **Esmaltes:** producen un recubrimiento liso y seco, con una apariencia brillante y semibrillante.
- **Lacas:** forman una película por la evaporación de un solvente.
- **Pinturas de base agua:** se aplican fácilmente, pero tienen una superficie porosa y absorben agua, siendo más difícil su limpieza que en los primeros dos tipos.

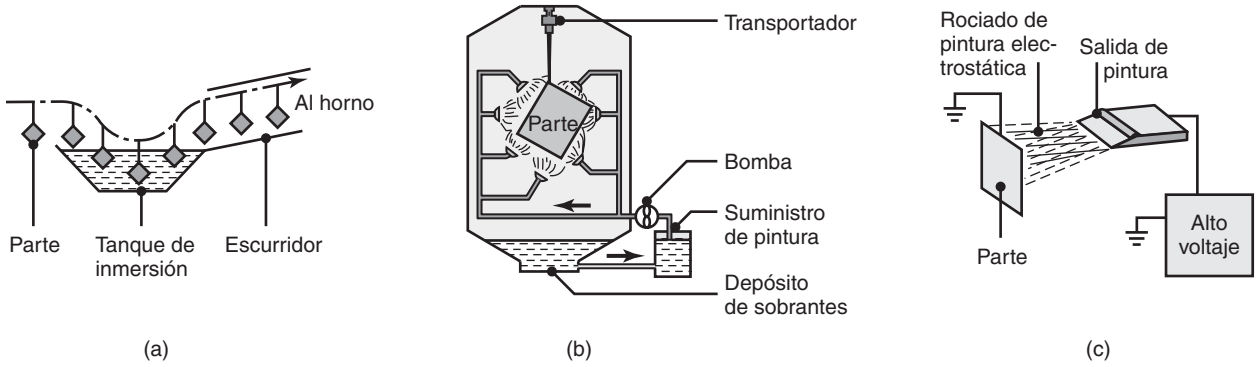


FIGURA 34.12 Métodos de aplicación de pintura: *(a)* recubrimiento por inmersión; *(b)* recubrimiento por rociado, y *(c)* rociado electrostático (utilizado en particular para carrocerías automotrices).

Existen pinturas con buena resistencia a la abrasión, temperaturas extremas y desteñimiento; son fáciles de aplicar y secan con rapidez. La selección de una pintura en particular depende de requisitos específicos, como la resistencia a acciones mecánicas (abrasión, deterioro, impactos y flexión) o químicas (ácidos, solventes, detergentes, álcalis, combustibles, manchado y ataque ambiental general).

Los métodos comunes de aplicación de pintura son la inmersión, con brocha, con rodillo y rociado (fig. 34.12). En el **electrorrecubrimiento** o **rociado electrostático**, se cargan *electrostáticamente* las partículas de pintura y son atraídas hacia las superficies a pintar, produciendo un recubrimiento de adherencia uniforme. A diferencia del rociado convencional, en el que se puede perder hasta 70% de la pintura, en el rociado electrostático la pérdida puede ser tan pequeña como 10%. Sin embargo, las oquedades y esquinas profundas serían difíciles de recubrir mediante este método. Es común el uso de *controles robóticos* para guiar las boquillas de rociado.

34.16 Limpieza de superficies

Ya se ha enfatizado la importancia de las superficies en la manufactura y los efectos de las capas depositadas o adsorbidas de diversos elementos y contaminantes en las características superficiales. Una superficie limpia puede tener efectos benéficos y perjudiciales. Aunque una superficie que no está limpia puede reducir la tendencia a la adhesión y a la excoriación, la limpieza suele ser fundamental para una aplicación más efectiva de recubrimientos, pintura, unión con adhesivos, soldadura, soldadura fuerte y soldadura blanda, así como para el funcionamiento confiable de partes manufacturadas en maquinaria, operaciones de ensamble y contenedores de alimentos y bebidas.

La **limpieza** comprende la remoción de contaminantes sólidos, semisólidos o líquidos de una superficie y es una parte importante de las operaciones de manufactura y la economía de producción. La palabra *limpio,* o el grado de limpieza de una superficie, es difícil de definir. Dos pruebas simples y comunes son las siguientes:

1. Limpiar con un trapo limpio la superficie de, digamos, un plato y observar los residuos en el trapo.
2. Observar si el agua recubre continuamente la superficie del plato (*prueba de discontinuidad de la capa de agua*). Si el líquido se reúne en gotas individuales, la superficie no está limpia. (Puedes probar este fenómeno mojando platos limpios en diferentes grados).

El tipo de proceso de limpieza requerido depende del tipo de *residuos de fluidos para el trabajo de metales* y los *contaminantes* a retirar. Por ejemplo, es más fácil y menos costoso retirar los fluidos con base de agua que los fluidos con base de aceite. Los contaminantes (también conocidos como *mugre*) pueden consistir en herrumbre, cascarillas,

virutas (y otros desechos metálicos y no metálicos), fluidos para el trabajo de los metales, lubricantes sólidos, pigmentos, compuestos de pulido y lapeado y elementos ambientales en general.

Básicamente, existen tres tipos de métodos de limpieza, como se describe a continuación.

Limpieza mecánica. Esta operación consiste en perturbar físicamente los contaminantes, a menudo con cepillos de alambre o fibras, chorro abrasivo (chorros), tamboreo o chorros de vapor. Muchos de estos procesos son muy efectivos para remover herrumbre, cascarilla y otros contaminantes sólidos. La **limpieza ultrasónica** también entra en esta categoría.

Limpieza electrolítica. En este proceso, a la parte que se va a limpiar se le aplica una solución acuosa (frecuentemente alcalina) que produce burbujas de hidrógeno u oxígeno (dependiendo de la polaridad), las cuales se liberan en la superficie de la parte. Las burbujas son abrasivas y ayudan a retirar los contaminantes.

Limpieza química. Por lo general, la limpieza química comprende la remoción de aceite y grasa de las superficies. La operación consiste en uno o más de los siguientes procesos:

- **Solución:** la mugre se disuelve en la solución de limpieza.
- **Saponificación:** reacción química que convierte los aceites animales y vegetales en un jabón soluble en agua.
- **Emulsificación:** la solución de limpieza reacciona con los depósitos de mugre o lubricante y forma una emulsión; después la mugre y el emulsificador quedan suspendidos en la emulsión.
- **Dispersión:** la concentración de mugre en la superficie disminuye mediante elementos activos superficiales en la solución de limpieza.
- **Agregación:** se remueven lubricantes de la superficie mediante varios agentes en el limpiado y se reúnen como partículas de mugre grandes.

Fluidos de limpieza. los fluidos de limpieza comunes utilizados junto con procesos electroquímicos para una limpieza más efectiva son los siguientes:

- **Soluciones alcalinas:** una combinación compleja de químicos solubles en agua. Son los menos costosos y más utilizados en las operaciones de manufactura. Se pueden limpiar partes pequeñas en los tambores o barriles giratorios. La mayoría de las partes se limpian en transportadores continuos rociándolos con la solución y enjuagándolos con agua.
- **Emulsiones:** normalmente consisten de keroseno y aceites solubles en agua y en diversos tipos de emulsificantes.
- **Solventes:** por lo común solventes de petróleo, hidrocarburos clorados y alcoholes minerales. Suelen utilizarse para líneas cortas. Los incendios y la toxicidad son riesgos importantes.
- **Vapores calientes:** pueden utilizarse solventes clorados para remover aceite, grasa y cera. El solvente se hierve en un contenedor y después se condensa. Este proceso de vapor en caliente es sencillo y las partes limpias quedan secas.
- **Ácidos, sales y mezclas orgánicas compuestas**: éstas son efectivas en la limpieza de partes cubiertas con pasta pesada o depósitos aceitosos y óxido.

Lineamientos de diseño para limpieza. Tal vez sea difícil limpiar partes con formas complejas. Algunos lineamientos de diseño son los siguientes:

- Evitar orificios profundos, ciegos.

- Fabricar diversos componentes pequeños en vez de uno grande, que puede ser difícil de limpiar.
- Proveer orificios de drenaje apropiados en las partes a limpiar.

El *tratamiento* y *desecho* de los fluidos de limpieza, así como los diversos fluidos y materiales de desecho de los procesos descritos en este capítulo, se encuentran entre los factores más importantes para lograr operaciones de manufactura seguras en el aspecto ambiental. Ver también la sección 1.6.

RESUMEN

- Los tratamientos superficiales son un aspecto importante de todos los procesos de manufactura. Se utilizan para proporcionar propiedades físicas y mecánicas específicas, como apariencia y resistencia a la corrosión, fricción, desgaste y fatiga. Existen diversas técnicas para modificar las superficies.
- Entre los procesos utilizados están el trabajo de metales y tratamiento de las superficies, como tratamiento de calor, deposición y galvanizado, además de recubrimientos superficiales adicionales, como esmaltes, materiales no metálicos y pinturas.
- Las superficies limpias pueden ser importantes en el posterior procesamiento y uso del producto (por ejemplo, recubrimiento, pintura y soldadura). La limpieza puede tener un impacto económico esencial en las operaciones de manufactura. Es posible utilizar diversos métodos mecánicos y químicos.

TÉRMINOS CLAVE

Anodización
Boleado
Bruñido con rodillo
Carbono similar al diamante
Chisporroteo o deposición catódica
Coloración
Deposición de vapor
Deposición física de vapor
Deposición iónica
Deposición mecánica
Deposición química de vapor
Deposición sin electricidad
Electrodeposición
Electroformado
Endurecimiento por explosión
Endurecimiento superficial
Ennegrecimiento de fundición
Esmalte
Esmalte de porcelana
Evaporación al vacío
Fluidos de limpieza
Granallado
Granallado con chorro de agua
Granallado con láser
Implantación de iones
Inmersión en caliente
Limpieza química
Metalización
Película independiente de diamante
Pintura
Prueba de discontinuidad de la capa de agua
Recubrimiento de conversión
Recubrimiento de cromo duro
Recubrimiento de diamante
Recubrimiento por difusión
Revestimiento
Revestimiento duro
Rociado
Rociado térmico
Texturizado superficial
Vidriado

BIBLIOGRAFÍA

ASM Handbook, Vol. 5, *Surface Engineering*, ASM International, 1994.

Bhushan, B. y Gupta, B. K., *Handbook of Tribology*: *Materials, Coatings, and Surface Treatments*, McGraw-Hill, 1991.

Budinski, K. G., *Surface Engineering for Wear Resistance*, Prentice Hall, 1988.

Burakowski, T. y Wierschon, T., *Surface Engineering of Metals: Principles, Equipment, Technologies*, CRC Press, 1998.

Davis, J. R. (ed.), *Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance*, IOM Communications y ASM International, 2001.
_____ (ed.), *Handbook of Thermal Spray Technology*, Thermal Spray Society y ASM International, 2004.
_____ (ed.), *Surface Hardening of Steels*, ASM International, 2002.
Dennis, J. K. y Such, T. E., *Nickel and Chromium Plating*, 3a. ed., ASM International, 1993.
Edwards, J., *Coating and Surface Treatment Systems for Metals: A Comprehensive Guide to Selection*, ASM International, 1997.
Handbook of Surface Treatments and Coatings, ASME Press, 2003.
Hocking, M. G., Vasanastre, V. y Sidky, P. S., *Metallic and Ceramic Coatings*, Addison-Wesley, 1989.
Holmberg, K. y Matthews, A., *Coating Tribology*: *Properties, Techniques, and Applications*, Elsevier, 1994.
Inagaki, N., *Plasma Surface Modification and Plasma Polymerization*, Technomic, 1996.
Kawai, S. (ed.), *Anodizing and Coloring of Aluminum Alloys*, Metal Finishing Information Services and ASM International, 2002.
Liberto, N., *User's Guide to Powder Coating*, 4a. ed., Society of Manufacturing Engineers, 2003.
Lambourne, R. y Strivens, T. A., *Paint and Surface Coatings: Theory and Practice*, 2a. ed., Woodhead, 1999.
Lindsay, J. H. (ed.), *Coatings and Coating Processes for Metals*, ASM International, 1998.
Park, J., *Chemical Vapor Deposition*, ASM International, 2001.
Peterson, M. B. y Winer, W. O. (eds.), *Wear Control Handbook*, American Society of Mechanical Engineers, 1980.
Prelas, M. A., Popovichi, G. y Bigelow, L. K. (eds.), *Handbook of Industrial Diamonds and Diamond Films*, Marcel Dekker, 1998.
Rausch, W., *The Phosphating of Metals*, 2a. ed., ASM International, 1990.
Rudzki, G. J., *Surface Finishing Systems: Metal and Non-Metal Finishing Handbook Guide*, Finishing Publications Ltd., 1983.
Schey, J. A., *Tribology in Metalworking—Friction, Lubrication and Wear*, ASM International, 1983.
Stern, K. H. (ed.), *Metallurgical and Ceramic Protective Coatings*, Chapman & Hall, 1997.
Sudarshan, T. S. (ed.), *Surface Modification Technologies*, ASM International, 1998.
Tamarin, Y., *Protective Coatings for Turbine Blades*, ASM International, 2002.
Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4a. ed., Vol. 3, *Materials, Finishing and Coating*, Society of Manufacturing Engineers, 1985.
Utech, B., *A guide to High Performance Coating*, Society of Manufacturing Engineers, 2002.
Van Ooij, W. J., Bierwagen, G. P., Skerry, B. S. y Mills, D., *Corrosion Control of Metals by Organic Coatings*, CRC Press, 1999.

PREGUNTAS DE REPASO

34.1 Explique por qué pueden necesitarse los tratamientos superficiales para los productos manufacturados.
34.2 ¿Cuáles son las ventajas del bruñido con rodillo?
34.3 Explique la diferencia entre endurecimiento superficial y revestimiento duro.
34.4 Describa los principios de las deposiciones física y química de vapor. ¿Qué aplicaciones tienen?
34.5 ¿Cuál es el principio del electroformado? ¿Cuáles son sus ventajas?
34.6 Explique la diferencia entre electrodeposición y deposición sin electricidad.
34.7 ¿Cómo se realiza la inmersión en caliente?
34.8 ¿Qué es una cuchilla de aire? ¿Cómo funciona?
34.9 ¿Qué pruebas existen para determinar la limpieza de las superficies?
34.10 Describa los sistemas comunes de pintura utilizados en la actualidad en la industria.
34.11 ¿Qué es un recubrimiento de conversión? ¿Por qué se llama así?
34.12 ¿Cuáles son las similitudes y diferencias entre la electrodeposición y la anodización?
34.13 Describa la diferencia entre el rociado térmico y el rociado de plasma.
34.14 ¿Qué es el revestimiento y por qué se realiza?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

34.15 Describa cómo los procesos de bruñido con rodillo inducen esfuerzos residuales compresivos en las superficies de las partes.
34.16 Explique por qué querría recubrir partes con cerámicos.
34.17 Proporcione ejemplos de diseños de partes que sean apropiados para galvanizado por inmersión en caliente.
34.18 Repita el problema 34.17, pero para limpieza.
34.19 Dé algunas aplicaciones de tratamiento superficial mecánico.

34.20 En la práctica, se ha observado que una capa delgada de cromado (como en las defensas de los automóviles de modelos más antiguos) es mejor que una capa gruesa. Explique por qué, considerando el efecto del espesor en la tendencia al agrietamiento.
34.21 Se sabe bien que los recubrimientos se pueden retirar o eliminar totalmente durante la vida útil de los componentes, en particular a temperaturas elevadas. Describa los factores comprendidos en la resistencia de los recubrimientos y su durabilidad.
34.22 Por lo general, el bruñido con rodillo se aplica a partes de acero. ¿Por qué se hace así?
34.23 Liste los procesos de recubrimiento descritos en este capítulo y clasifíquelos como "gruesos" o "delgados".
34.24 ¿Cuál de los procesos descritos en este capítulo se utiliza sólo para partes pequeñas? ¿Por qué se hace esto?
34.25 Comúnmente, los globos metálicos brillantes se hacen con patrones festivos impresos que se producen imprimiendo pantallas que después se depositan en los globos. ¿Cómo se pueden depositar recubrimientos metálicos en una lámina de hule?
34.26 ¿Por qué es importante galvanizar las láminas metálicas para carrocerías automotrices?
34.27 Explique los principios comprendidos en diversas técnicas para aplicar pinturas.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

34.28 Tomando un ejemplo simple, como las partes mostradas en la figura 34.1, estime la fuerza requerida para bruñir con rodillo. (Ver secciones 2.6 y 14.4).

34.29 Estime el espesor de la deposición en la electrodeposición de una esfera de metal sólido de 50 mm utilizando una corriente de 10 A y un tiempo de deposición de 2 horas. Suponga que $c = 0.08$ en la ecuación 34.1.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

34.30 ¿Qué tratamientos superficiales son funcionales y cuáles son decorativos? ¿Existe alguno que sirva para ambas funciones? Explique su respuesta.
34.31 Un implante artificial tiene un área superficial porosa en la que se espera que el hueso se sujete y desarrolle en el implante. Haga recomendaciones para producir una superficie porosa y después revise la bibliografía para determinar los procesos reales utilizados.

34.32 Si alguien está interesado en obtener una superficie texturizada en una pieza metálica recubierta, ¿primero se debe aplicar el recubrimiento o la textura?

34.33 Se sabe que puede obtenerse un acabado superficial similar a un espejo mediante la deposición de piezas de trabajo rectificadas (es decir, el acabado superficial mejora después del recubrimiento). Explique cómo ocurre esto.

34.34 Resuma las razones por las que los temas descritos en este capítulo son importantes en los procesos y las operaciones de manufactura.

34.35 Dado que se evaporan, los solventes y las soluciones de limpieza similares tienen efectos ambientales adversos. Diga lo que piensa sobre las modificaciones que podrían realizarse para presentar soluciones de limpieza ambientalmente más amigables.

34.36 Cuando se va a colocar un espécimen eléctricamente aislante en un microscopio electrónico de barrido para análisis, primero se recubre el espécimen con una capa de oro delgada. ¿Cómo produciría esta capa de oro?

34.37 Una operación de bruñido con rodillo se realiza en el hombro de una flecha para aumentar la vida a la fatiga. El acabado superficial resultante es pobre, por lo que se hace una propuesta para maquinar la capa superficial y mejorar la vida a la fatiga. ¿Esto es aconsejable? Explique su respuesta.

34.38 Puede simular el proceso de chorro de granalla utilizando un martillo de bola (en el que una de las cabezas es redonda). Utilizando dicho martillo, realice diversas muescas en la superficie de una pieza de lámina de aluminio de (*a*) 2 mm, y (*b*) 10 mm de espesor, respectivamente, colocada sobre una superficie plana dura. Observará que ambas piezas desarrollan curvaturas, pero una se volverá cóncava y la otra convexa. Describa sus observaciones y explique por qué pasa esto. (*Sugerencia*: Ver fig. 2.13).

34.39 Consiga varias partes metálicas (como pernos, tuercas, varillas y láminas metálicas) y realice la prueba de discontinuidad de la capa de agua en ellos. Después limpie las superficies utilizando diversos fluidos de limpieza y repita la prueba. Describa sus observaciones.

34.40 Inspeccione diversos productos alrededor de su casa (como aparatos eléctricos, utensilios de plata, jarrones y cajas metálicas, utensilios de cocina y herramientas manuales grandes y pequeñas) y comente el tipo de recubrimientos que pueden tener. Además, comente los productos que no parecen tener recubrimiento, indicando las posibles razones para ello.

34.41 Realice un estudio en la bibliografía técnica y elabore un breve informe sobre las consideraciones ambientales relacionadas con la aplicación de los procesos descritos en este capítulo.

PARTE

VIII

Aspectos comunes de la manufactura

En los capítulos precedentes se han descrito las técnicas utilizadas para modificar las superficies de los componentes y productos a fin de obtener algunas propiedades deseables, y se han discutido las ventajas y limitaciones de cada técnica. Aunque se presentaron las exactitudes dimensionales obtenidas en los procesos individuales de manufactura, aún no se ha explicado cómo se *miden* e *inspeccionan* las partes antes de ensamblarlas.

Las dimensiones y otros rasgos superficiales de las partes se miden para asegurar que se manufacturaron de manera consistente y dentro del intervalo especificado de tolerancias dimensionales. La gran mayoría de las partes manufacturadas son componentes del subensamble de un producto, y deben montarse y ensamblarse en forma apropiada con objeto de que el producto realice la función para la que está destinado durante su vida útil. Por ejemplo: *(a)* un pistón debe montarse en el interior de un cilindro dentro de las tolerancias especificadas; *(b)* el álabe de una turbina debe montarse apropiadamente en su ranura sobre el disco de la turbina, y (c) las guías de una máquina herramienta deben producirse con cierta exactitud a fin de que las partes fabricadas en la máquina sean exactas dentro de las especificaciones deseadas.

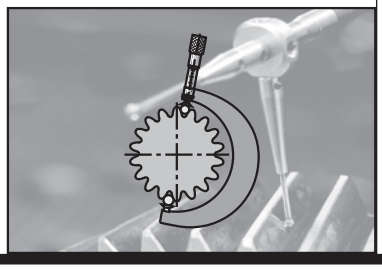
La medición de las dimensiones y los rasgos correspondientes de las partes es un aspecto integral de la **manufactura de partes intercambiables**, el concepto básico de la estandarización y la producción en masa. Por ejemplo, si un rodamiento de bolas en una máquina está desgastado y se debe reemplazar, todo lo que tiene que hacerse es comprar uno similar con igual especificación o número de parte. Lo mismo se hace con los otros productos, que van de pernos y tuercas a engranes y motores eléctricos.

En los siguientes dos capítulos describiremos los principios correspondientes y los diversos instrumentos y máquinas modernas utilizadas para medir los rasgos dimensionales, como longitud, ángulo, planicidad y redondez. La prueba e inspección de las partes son aspectos importantes de las operaciones de manufactura, por lo que también se presentan los métodos usados en las pruebas destructivas y no destructivas de las partes.

Uno de los aspectos más importantes de la manufactura es la **calidad del producto**. Se explicará la importancia tecnológica y económica de *integrar la calidad dentro de un producto*, más que de inspeccionarlo después de su fabricación (como se ha hecho tradicionalmente). Debe quedar clara la importancia de este concepto en vista de la manufactura competitiva en una economía global.

Metrología e instrumentación en ingeniería

CAPÍTULO 35



En esta parte del libro se describe la importancia de medir las partes manufacturadas. Específicamente:

- Los métodos tradicionales de medición.
- Las máquinas modernas para medir rasgos geométricos de las partes.
- Las características de los instrumentos y las máquinas de medición y cómo seleccionarlos.
- La importancia de la medición automática.
- Los principios del dimensionamiento y las tolerancias.

35.1 Introducción 1085
35.2 Patrones de medición 1086
35.3 Características geométricas de las partes, mediciones analógicas y digitales 1087
35.4 Métodos e instrumentos tradicionales de medición 1089
35.5 Instrumentos y máquinas modernas de medición 1096
35.6 Medición automatizada 1100
35.7 Características generales y selección de instrumentos de medición 1101
35.8 Dimensionamiento y tolerancias geométricas 1101

EJEMPLOS:

35.1 Mediciones de longitud a través de la historia 1087
35.2 Máquina para medición de coordenadas para carrocerías automotrices 1099

35.1 Introducción

En este capítulo se presentan tanto los principios y métodos de medición como las características de los instrumentos utilizados en la manufactura. La **metrología en ingeniería** se define como la medición de dimensiones, entre ellas la longitud, espesor, diámetro, conicidad, ángulo, planicidad, perfil y otras. Considérese, por ejemplo, las guías de las máquinas herramienta (fig. 35.1); estos componentes deben tener dimensiones específicas, así como ángulos y planicidad para que la máquina funcione de manera apropiada y con la precisión dimensional deseada.

Tradicionalmente, las mediciones se han efectuado *después* de haber producido la parte, a lo que se conoce como **inspección posterior al proceso**. Aquí, el término "inspección" significa la verificación de las dimensiones de lo que se ha producido, o que se está produciendo, a fin de determinar si satisface las tolerancias dimensionales determinadas y otras especificaciones. Sin embargo, en la actualidad, las mediciones se efectúan mientras se está produciendo la parte en la máquina, a lo que se llama **inspección en proceso**, **en línea** o **en tiempo real**.

Un aspecto esencial de la metrología en los procesos de manufactura es la **tolerancia dimensional** (esto es, la variación permisible en las dimensiones de una parte). Las tolerancias son importantes debido a su impacto en el funcionamiento apropiado de un producto, en la intercambiabilidad de las partes y en los costos de manufactura. En general, cuanto menor es la tolerancia, mayores serán los costos de producción. Este capítulo termina con un análisis sobre los límites dimensionales y los ajustes utilizados en la práctica de la ingeniería.

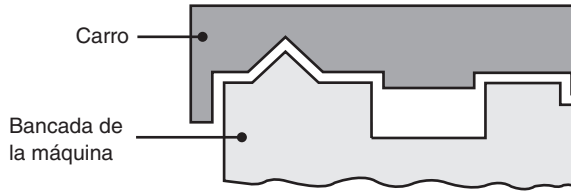


FIGURA 35.1 Sección transversal de una guía de máquina herramienta. La anchura, profundidad, ángulos y las otras dimensiones deben producirse y medirse con exactitud para que la máquina herramienta funcione como se espera.

35.2 Patrones de medición

Nuestra primera experiencia con la medición suele ser con una simple *regla* para medir distancias (dimensiones lineales). Las *reglas* se utilizan como patrón ante las dimensiones por medir. Tradicionalmente, en los países de habla inglesa se han usado las unidades de *pulgada* y *pie*, que en su origen se basaron en partes del cuerpo humano. En consecuencia, era común encontrar variaciones significativas en la longitud de un pie.

Sin embargo, en la mayor parte del mundo se utiliza el *metro* como patrón de longitud. Originalmente, el metro se definía como la diezmillonésima parte de la distancia entre el Polo Norte y el Ecuador. Después, la longitud original del metro se normalizó como la distancia entre dos marcas sobre una barra de platino-iridio guardada en condiciones controladas dentro de un edificio en las afueras de París. En 1960, el metro se definió de manera oficial como 1,650,763.73 longitudes de onda (en el vacío) de la luz naranja emitida por el criptón (un gas raro) excitado eléctricamente. La precisión de esta medida se estableció como una parte en 10^9. Ahora el metro es la unidad de longitud del Sistema Internacional de Unidades (SI) y es el patrón internacional. Las dimensiones SI más pequeñas se miden en nanómetros ($1\ \text{nm} = 10^{-9}\ \text{m}$).

En la metrología de ingeniería se utilizan numerosos instrumentos y dispositivos de medición, cada uno de los cuales tiene su propia aplicación, resolución, precisión y otras características. Dos términos que se usan comúnmente para describir el tipo y la calidad de un instrumento son:

1. **Resolución** es la menor diferencia en dimensiones que un instrumento de medición puede detectar o distinguir. Por ejemplo, una vara de madera tiene una resolución mucho menor que un micrómetro.
2. **Precisión** (algunas veces llamada erróneamente exactitud) es el grado en que el instrumento da mediciones repetitivas del mismo patrón. Por ejemplo, una regla de aluminio se dilata o contrae (dependiendo de las variaciones de temperatura en el ambiente en que se utiliza), o se sujeta con la mano; esto la somete a una temperatura mayor que el aire circundante lo que afecta la precisión.

En la metrología en ingeniería, las palabras **instrumento** y **calibrador** se utilizan con frecuencia como sinónimos. El control de la temperatura es muy importante, sobre todo para realizar mediciones con instrumentos de precisión. La temperatura normal de medición es 20 °C (68 °F) y todos los calibradores se calibran a esta temperatura. En aras de la exactitud, las mediciones deben efectuarse en ambientes controlados, manteniendo esta temperatura por lo común dentro de ±0.3°C (0.5°F).

EJEMPLO 35.1 Mediciones de longitud a través de la historia

Durante los últimos 6000 años se han desarrollado muchos patrones de medición. Un patrón común en Egipto, alrededor del año 4000 a.C., fue el Codo Real, equivalente a 0.4633 m. Un *codo* era igual a 1.5 pies (o dos anchos de la mano abierta, seis anchos de la mano cerrada o 24 gruesos del dedo). En el año 1101 d.C., el rey Enrique I declaró un nuevo patrón denominado *yarda* (0.9144 m), que era la distancia desde su nariz hasta la punta de su pulgar.

Durante la Edad Media, casi cada reino o ciudad establecía su propio patrón de longitud, algunos con nombres idénticos. En 1528, el físico francés J. Fernel propuso la distancia entre París y Amiens (una ciudad ubicada 120 km al norte de París) como referencia general de longitud. Durante el siglo XVII, algunos científicos aconsejaron que se utilizara la longitud de cierto péndulo como patrón. En 1661, el arquitecto británico Sir Christopher Wren sugirió que se usara un péndulo con un periodo de 1/2 segundo. El matemático danés C. Huygens propuso un péndulo que tuviera una longitud de un tercio del de Wren con un periodo de 1 segundo.

Para poner fin a la confusión sobre la medición de la longitud, en 1790 se empezó a desarrollar en Francia un patrón definitivo con el concepto de *métre* (de la palabra griega *metron*, que significa "medir"). Se fabricó un bloque de calibración con platino puro de un metro de largo, de sección transversal rectangular, y se colocó en los Archivos Nacionales de París en 1799. A lo largo de los años, se produjeron copias de este patrón para otros países.

Entre 1870 y 1872 se reunieron comités internacionales y decidieron sobre un patrón internacional para el metro. La nueva barra estaba hecha de 90% de platino y 10% de iridio, con forma transversal de "X" y dimensiones globales de 20 mm $\times$ 20 mm. En cada extremo de la barra se grabaron tres marcas. El metro patrón es la distancia entre las marcas centrales que se encuentran en cada extremo, medidas a 0 °C. En la actualidad, la medición extremadamente exacta se basa en la velocidad de la luz en el vacío, que se calcula multiplicando la longitud de onda del rayo infrarrojo normalizado de un láser por su frecuencia.

35.3 Características geométricas de las partes; mediciones analógicas y digitales

En esta sección se indican las cantidades y características geométricas que se miden normalmente en la práctica de la ingeniería y en los productos obtenidos de los procesos de manufactura descritos a lo largo de este libro.

- *Longitud*, incluyendo todas las dimensiones lineales de las partes.
- *Diámetro*, externo e interno, incluyendo partes con diferentes diámetros externos e internos (escalones) a lo largo de su longitud.
- *Redondez*, incluyendo falta de redondez, concentricidad y excentricidad.
- *Profundidad*, como la de orificios taladrados o mandrinados, y cavidades en matrices y moldes.
- *Rectitud*, como en flechas, barras y tubos.
- *Planicida*, como en las superficies maquinadas y rectificadas.
- *Paralelismo*, como ocurre entre dos flechas o guías de máquinas.
- *Perpendicularidad*, como la de una barra roscada inserta en una placa plana.

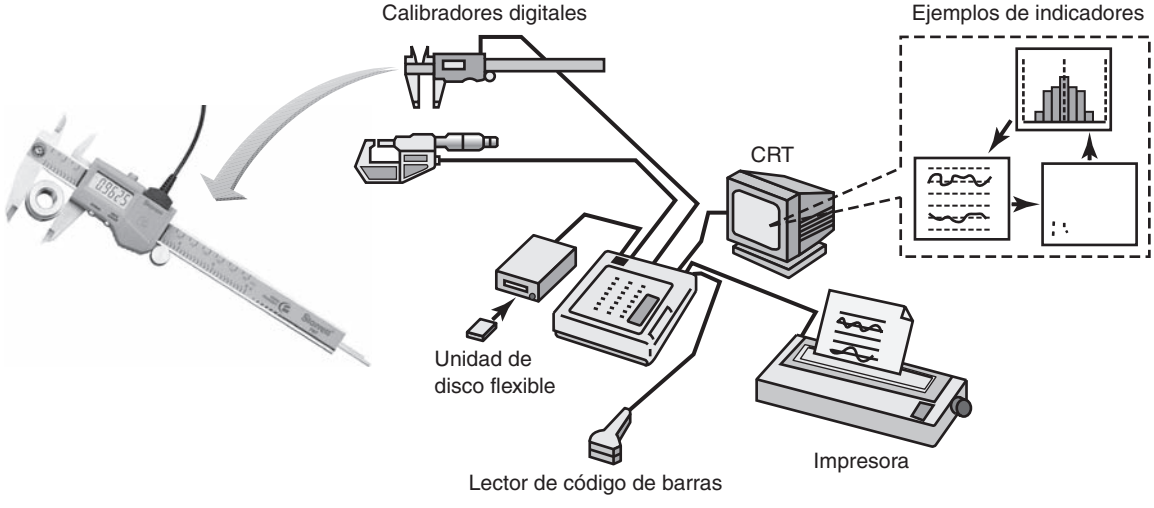
- *Ángulos*, incluyendo ángulos internos y externos.
- *Perfil*, como curvaturas en fundiciones, forjas y en carrocerías automotrices.

Existe una amplia variedad de instrumentos y máquinas para medir rápida y exactamente estas cantidades en partes estacionarias, o en partes que se encuentran en producción continua. Debido a las continuas e importantes tendencias a la automatización y el control computarizado de las operaciones de manufactura, en la actualidad el equipo moderno de medición es parte *integral* de las máquinas de producción. La implantación de la instrumentación digital y los desarrollos en la manufactura integrada con computadoras (descritas en la parte IX de este libro) ha llevado a la integración total de las tecnologías de medición con los sistemas de manufactura.

Es necesario reconocer las ventajas de los instrumentos digitales sobre los analógicos. Como se deduce de nuestra descripción del equipo tradicional de medición en la sección 35.4, la medición exacta en un instrumento análogo, como un calibrador vernier o un micrómetro (fig. 35.2a), se basa en la habilidad del operario para interpolar apropiadamente y leer las escalas graduadas. Por el contrario, un calibrador digital no requiere alguna habilidad particular, ya que las medidas se indican de manera directa (fig. 35.2b). Sin embargo, lo más importante es que el equipo digital se puede integrar con facilidad a



(a) (b)



(c)

FIGURA 35.2 *(a)* Micrómetro vernier (analógico). *(b)* Micrómetro digital con un intervalo de 0 a 1 pulgada (0 a 25 mm) y una resolución de 50 μpulg (1.25 μm). En general, es más fácil leer dimensiones en este instrumento que en los micrómetros analógicos. *(c)* Esquema que muestra la integración de los calibradores digitales con microprocesadores a fin de adquirir datos en tiempo real para control estadístico de proceso. *Fuente: (a)* Cortesía de L. C. Starret Co. *(b)* Cortesía de Mitutoyo Corp.

otro equipo (fig. 35.2c), incluyendo la maquinaria de producción y los sistemas de control estadístico de procesos (SPC, por sus siglas en inglés), descritos con detalle en el capítulo 36.

35.4 Métodos e instrumentos tradicionales de medición

En esta sección se describen las características de los métodos e instrumentos tradicionales de medición que se han utilizado por muchos años, y que aún se usan ampliamente en muchas partes del mundo. Sin embargo, estos instrumentos están siendo reemplazados con rapidez por instrumentos y máquinas de medición más eficientes y avanzados, como se indica en la sección 35.5.

35.4.1 Instrumentos con escala graduada

Estos instrumentos se utilizan para medir longitudes o ángulos. *Graduada* significa "marcada para indicar cierta cantidad".

Medición lineal (lectura directa)

- **Reglas:** el instrumento más sencillo y utilizado para realizar mediciones lineales es una regla de acero (*regla de mecánico*), barra o cinta con graduaciones fraccionarias o decimales. Las longitudes se miden en forma directa con una exactitud limitada a la división más cercana, normalmente 1 mm (0.040 pulgada).
- **Calibradores:** estos instrumentos se pueden utilizar para medir longitudes interiores o exteriores. También llamados *medidores de calibración* y *calibradores vernier* (llamados así en honor de P. Vernier, que vivió en el siglo XVII), tienen un elemento graduado y una mordaza deslizable. Los *calibradores digitales* se usan cada vez con mayor amplitud.
- **Micrómetros:** normalmente, estos instrumentos se utilizan para medir el espesor y las dimensiones interiores y exteriores de las partes. Los *micrómetros digitales* están equipados con indicadores digitales (fig. 35.2c) en unidades métricas o inglesas. También existen micrómetros para medir diámetros internos (*micrómetro de interiores*) y profundidades (*calibradores micrométricos de profundidades*, fig. 35.3). Las mandíbulas fijas de los micrómetros se pueden equipar con contactos cónicos o de bolas para medir oquedades, diámetros de barras roscadas y espesores de pared de tubos y láminas curvas.



FIGURA 35.3 Calibrador de profundidades con micrómetro digital. *Fuente:* Cortesía de Starrett Co.

Medición lineal (lectura indirecta). Por lo regular, estos instrumentos son *calibres* y *divisores* sin escala graduada. Se utilizan para transferir la dimensión medida a un instrumento de lectura directa, como una regla. Debido a la experiencia requerida para su uso y a su dependencia de las escalas graduadas, la exactitud de las herramientas de medición indirecta es limitada. Para la medición indirecta de orificios o cavidades se pueden utilizar *calibradores telescópicos*.

Medición de ángulos

- **Escuadra ajustable:** es un instrumento de lectura directa similar a un transportador común, excepto porque tiene un elemento móvil. Las dos hojas de la escuadra se ponen en contacto con la parte a medir y el ángulo se lee directamente sobre la escala vernier. Otro tipo común de escuadra ajustable es la *escuadra universal*, que es una regla de acero equipada con dispositivos para medir ángulos de 45° y 90°.
- **Regla de senos:** la medición mediante este método implica colocar la parte en una regla o placa inclinada (regla de senos) y ajustar el ángulo colocando bloques patrón sobre una placa o mesa plana. Una vez que se coloca la parte sobre la regla de senos, se utiliza un indicador de carátula para explorar la superficie superior de la parte. Se agregan o se quitan bloques patrón (ver sección 35.4.4), según sea necesario, hasta que la superficie superior quede paralela a la superficie de la placa. Después se calcula el ángulo de la parte utilizando relaciones trigonométricas.
- **Bloques o mesas planas:** estas placas se utilizan para colocar partes a medir y el instrumento de medición. En general se fabrican con hierro fundido o piedras naturales (como granito) y se usan ampliamente en la metrología de ingeniería. Las placas planas de granito tienen las propiedades (deseables) de ser resistentes a la corrosión y no magnéticas, además de que su dilatación térmica es baja, por lo que minimizan la distorsión térmica.

Medición comparativa de longitud. Los instrumentos utilizados para medir longitudes comparativas (también llamados de *tipo desviación*) amplifican y miden variaciones o desviaciones de la distancia entre dos o más superficies. Estos instrumentos comparan dimensiones (de ahí la palabra *comparativa*), de los cuales el ejemplo más común es el **indicador de carátula** (fig. 35.4). Éstos son dispositivos mecánicos sencillos que convierten desplazamientos lineales de un palpador a una cantidad de rotación en un indicador en una carátula circular. El indicador se ajusta a cero a cierta superficie de referencia y el instrumento o superficie por medir (ya sea externa o interna) se pone en contacto con el palpador. El movimiento del indicador se lee directamente en la carátula circular (positivo o negativo), con exactitudes hasta de 1 μm (40 μpulg). También existen indicadores de carátula con mecanismos de amplificación eléctricos y de fluidos, y con lecturas digitales.

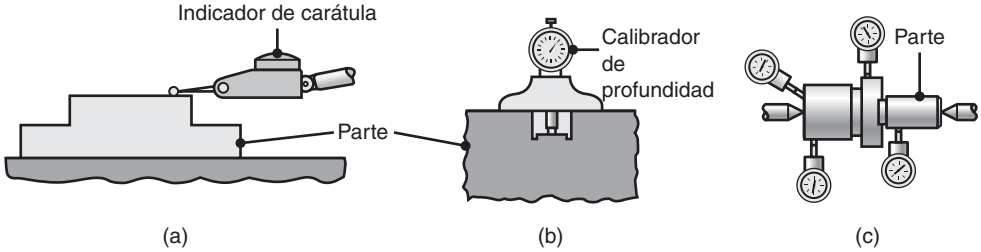


FIGURA 35.4 Tres usos de los indicadores de carátula: *(a)* redondez; *(b)* profundidad, y *(c)* calibración de múltiples dimensiones de una parte.

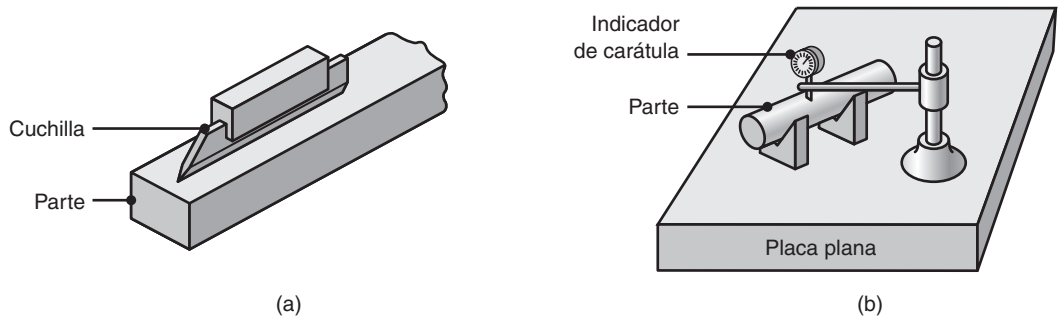


FIGURA 35.5 Medición manual de rectitud con *(a)* una regla recta, y *(b)* un indicador de carátula. *Fuente:* F. T. Farago.

35.4.2 Medición de características geométricas

Rectitud. Normalmente, la rectitud se puede verificar utilizando una regla recta o un indicador de carátula (fig. 35.5). Se utiliza un *autocolimador* (semejante a un telescopio con un rayo de luz que se refleja sobre el objeto) para medir con exactitud pequeñas desviaciones angulares sobre una superficie plana. En la actualidad es común usar *rayos láser* para alinear elementos individuales de máquinas para el ensamble de sus elementos.

Planicidad. La planicidad se puede medir por medios mecánicos utilizando una placa plana y un indicador de carátula. Para medir la perpendicularidad se puede usar ese método y también escuadras de acero de precisión.

Otro método para medir la planicidad es la **interferometría**, utilizando un *plano óptico*. Este dispositivo es un disco de vidrio o de cuarzo fundido con superficies planas paralelas, que se coloca sobre la superficie de la pieza de trabajo (fig. 35.6a). Cuando se dirige un rayo de luz *monocromática* (un rayo de luz con una sola longitud de onda) hacia la superficie en cierto ángulo, el plano óptico divide el rayo en dos haces, apareciendo como bandas claras y oscuras a simple vista (fig. 35.6b). El número de bandas que aparecen se relaciona con la distancia entre la superficie de la parte y la superficie del fondo del plano óptico (fig. 35.6c). En consecuencia, una superficie verdaderamente plana en una pieza de trabajo (esto es, una en la que el ángulo entre las dos superficies es cero) no divide el rayo de luz y las franjas no aparecen. Cuando las superficies no son planas, las franjas se curvan (fig. 35.6d). El método de la interferometría también se utiliza para observar las texturas y las rayaduras superficiales (fig. 35.6e).

Las **rejillas de difracción** consisten en dos vidrios ópticos planos de diferentes longitudes con líneas paralelas estrechamente espaciadas y grabadas sobre sus superficies. La rejilla del vidrio más corto se inclina ligeramente. El resultado es que se desarrollan *franjas de interferencia* cuando se ve sobre el vidrio más largo. La posición de estas franjas depende de la posición relativa entre los dos juegos de vidrios. Con equipo moderno y usando contadores electrónicos y sensores fotoeléctricos, se puede obtener una resolución de 2.5 μm (0.0001 pulgada) con rejillas que tienen 40 líneas/mm (1000 líneas/pulgada).

Redondez. Normalmente, esta característica se describe como una desviación de la verdadera redondez (que se manifiesta de manera matemática en el círculo). El término *fuera de redondez* (ovalamiento) es en realidad más descriptivo de la forma de la parte (fig. 35.7a) que la palabra *redondez*. La verdadera redondez es fundamental para el funcionamiento apropiado de flechas rotatorias, pistas para rodamientos, pistones, cilindros y bolas de acero para rodamientos.

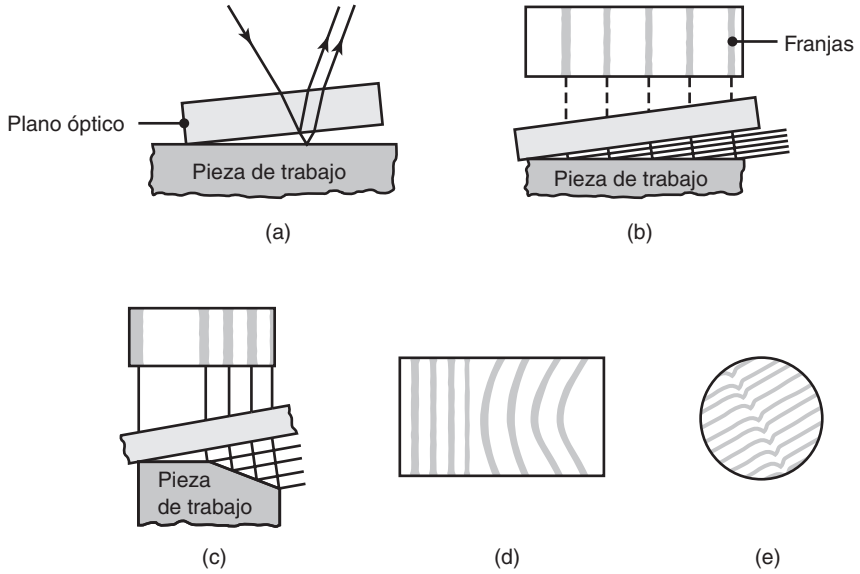


FIGURA 35.6 *(a)* Método de interferometría para medir la planicidad utilizando un plano óptico. *(b)* Franjas en una superficie plana, inclinada. Un plano óptico descansando sobre una superficie perfectamente plana de una pieza de trabajo no divide el rayo de luz, y no aparecen las franjas. *(c)* Franjas sobre la superficie con dos inclinaciones. *Nota*: cuanto mayor es la inclinación, más cerca estarán las franjas. *(d)* Los patrones de franjas curvadas indican curvaturas sobre la superficie de la pieza de trabajo. *(e)* Patrón de franjas que indican una rayadura en la superficie.

En general, los métodos para medir la redondez caen dentro de dos categorías.

1. La parte redonda se coloca sobre un bloque en V o entre centros (fig. 35.7b y c, respectivamente) y se gira mientras el palpador de un indicador de carátula está en contacto con la superficie de la parte. Después de una rotación completa de la pieza de trabajo, se anota la diferencia entre las lecturas máxima y mínima en el indicador. A esta diferencia se le llama **lectura total del indicador** (TIR, por sus siglas en inglés), o *movimiento completo del indicador*. Este método también puede utilizarse para medir la rectitud (perpendicularidad) de las caras de los extremos de las flechas maquinadas, como en la operación de refrentado mostrada en la figura 23.1e.

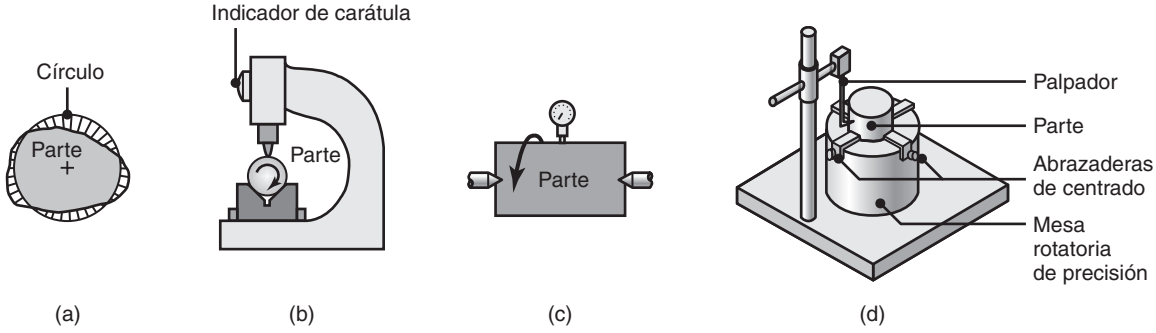


FIGURA 35.7 *(a)* Esquema de la falta de redondez (exagerada). Medición de redondez utilizando *(b)* un bloque en V y un indicador de carátula; *(c)* parte redonda soportada sobre centros y girada, y *(d)* trazado circular. *Fuente*: F. T. Farago.

2. En el *trazado circular*, la parte se coloca sobre una plataforma y se mide su redondez girando la plataforma (fig. 35.7d). O al contrario, se puede girar el palpador o sonda alrededor de una parte estacionaria para tomar la medida.

Perfil. El perfil se puede medir (*a*) comparando la superficie con una plantilla o calibrador de perfiles (como radios y filetes), y (*b*) utilizando varios indicadores de carátula o instrumentos similares. Sin embargo, el mejor método consiste en usar las máquinas de medición avanzada descritas en la sección 35.5.

Roscas de tornillos y dientes para engranes. Las roscas se pueden medir mediante calibradores de *roscas* de diversos diseños, que comparan las roscas producidas contra una rosca patrón. Algunos de los calibradores utilizados son *calibradores de tapón para roscas, calibradores de paso de roscas*, micrómetros con palpadores cónicos y *calibradores instantáneos* (ver sección 35.4.4) con yunques en forma de rosca. Los dientes de engranes se miden empleando (*a*) instrumentos similares a los indicadores de carátula; (*b*) calibradores (fig. 35.8a), y (*c*) micrómetros que utilizan pernos o bolas de diferentes diámetros (fig. 35.8b). Los métodos avanzados incluyen el uso de proyectores ópticos y maquinas de medición de coordenadas.

35.4.3 Proyectores ópticos de contornos

Estos instrumentos (también llamados comparadores ópticos) se desarrollaron inicialmente en la década de 1940 a fin de verificar la geometría de las herramientas de corte para maquinar roscas de tornillos, pero ahora se utilizan con el propósito de verificar todos los perfiles (fig. 35.9). La parte se monta en una mesa o entre centros, y la imagen se proyecta sobre una pantalla con una amplificación de 100× o mayor. Las mediciones lineales y angulares se realizan en forma directa sobre la pantalla, que se encuentra marcada con líneas y círculos de referencia. La pantalla se puede girar para permitir mediciones angulares.

35.4.4 Calibradores

En esta sección se describen diversos calibradores comunes que tienen formas sólidas sencillas y que no pueden clasificarse como instrumentos.

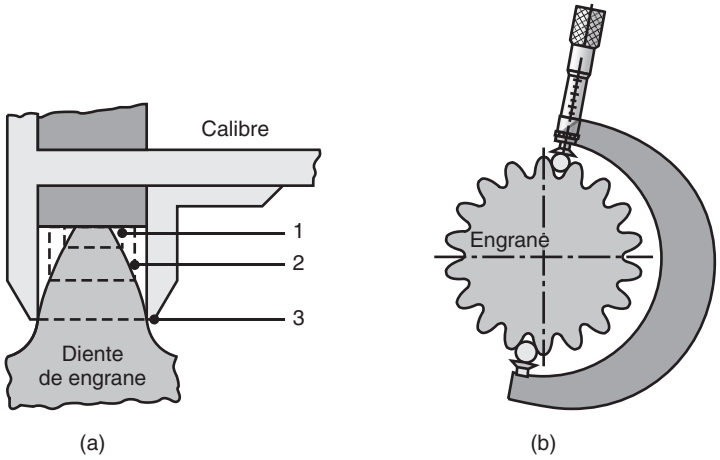


FIGURA 35.8 Modelo de banco de proyector de contornos de rayo horizontal con una pantalla de 16 pulgadas de diámetro con iluminación halógena de tungsteno de 150 W. *Fuente:* Cortesía de American Gear Manufacturers Association.

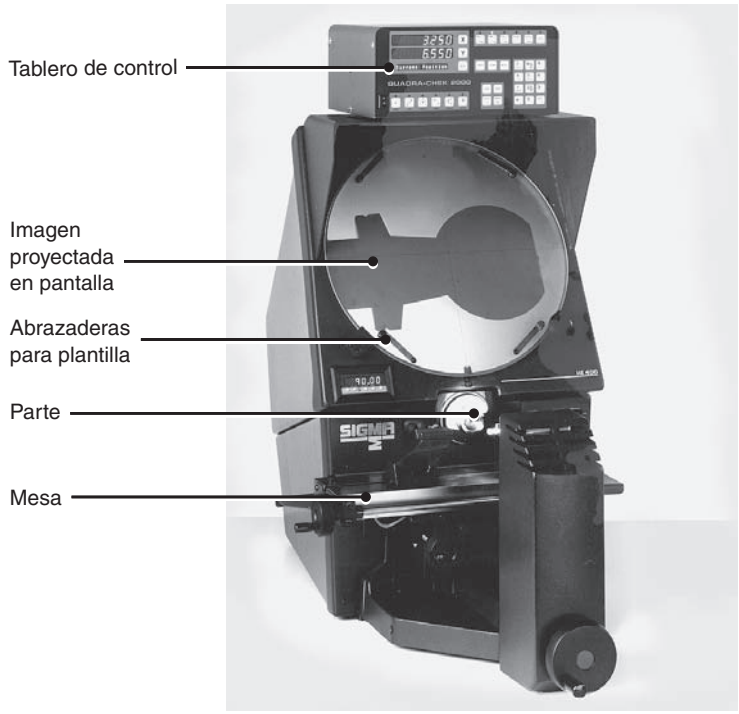


FIGURA 35.9 Modelo de banco de proyector de contornos de rayo horizontal con una pantalla de 16 pulgadas de diámetro con iluminación halógena de tungsteno de 150 W. *Fuente:* Cortesía de L. S. Starrett Company, Precision Optical Division.

Bloques patrón. Los bloques patrón son bloques individuales cuadrados, rectangulares o redondos de diversos tamaños. Su uso es general y se fabrican con aceros aleados tratados térmicamente y relevados de esfuerzos. Los mejores bloques patrón están hechos de cerámicos (con frecuencia zirconio) y carburo de cromo; a diferencia de los aceros, estos materiales no se oxidan, pero son frágiles y deben manejarse con cuidado. Los *bloques en ángulo* se fabrican de la misma manera y se utilizan para calibración angular. La planicidad de los bloques patrón se ubica dentro de un margen de 1.25 μm (50 μpulg). El control de la temperatura ambiente es importante cuando se usan patrones para mediciones de alta precisión.

Calibres fijos. Estos calibres son réplicas de las formas de las partes por medir. Aunque es fácil y económico utilizar los calibres fijos, éstos sólo indican si una parte es muy pequeña o muy grande cuando se compara con un patrón establecido.

- Los **calibres de tapón** se utilizan normalmente para orificios (fig. 35.10a y b). El *calibre PASA* es menor que el *calibre NO PASA* y se desliza dentro de cualquier orificio que tenga una dimensión menor que la del diámetro del calibrador. El *calibre NO PASA* no debe entrar en el orificio. Para dichas mediciones se requieren dos calibres, aunque ambos pueden estar en el mismo dispositivo, ya sea en los extremos opuestos o en dos escalones en un extremo (*calibre escalonado*). También existen calibres de tapón para medir conos internos (en los que se indican las desviaciones entre el calibre y la parte mediante la holgura del calibre), ranuras y roscas (en los que el calibre *PASA* debe atornillarse en el orificio roscado).
- **Calibres de anillo** (fig. 35.10c) se utilizan para medir flechas y partes redondas similares. Los calibres de anillos se usan para medir roscas externas. En estos calibradores,

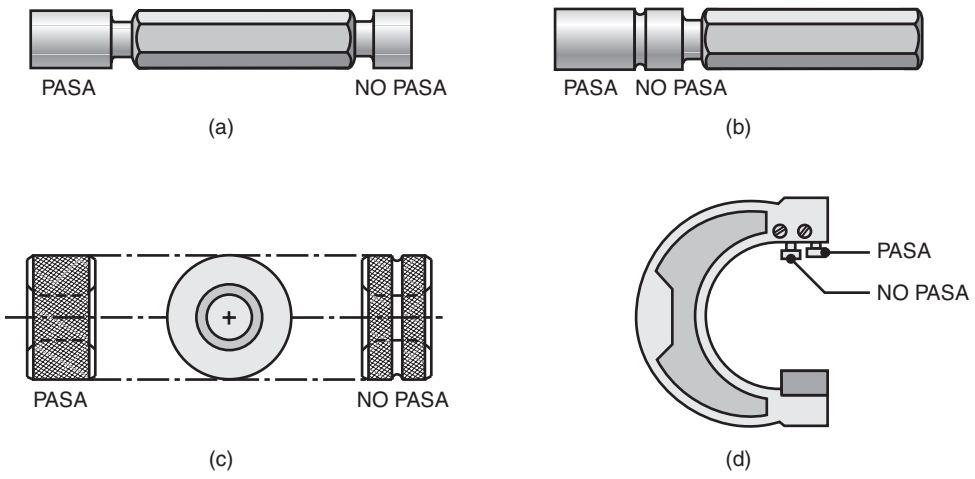


FIGURA 35.10 (a) Calibre de tapón para orificios con extremos opuestos *PASA, NO PASA*. (b) Calibre de tapón con *PASA* y *NO PASA* en un extremo. (c) Calibres de anillo planos para calibrar barras redondas. Obsérvese la diferencia en las superficies moleteadas para identificar los dos calibres. (d) Calibre instantáneo con yunques ajustables.

las características *PASA-NO PASA* se identifican por el tipo de moleteado en los diámetros exteriores de los anillos.

- **Calibres instantáneos** (fig. 35.10d): normalmente se utilizan para medir dimensiones externas. Se fabrican con superficies ajustables de calibración, para utilizarse con partes que tienen dimensiones diferentes. Una de las superficies de calibración se puede ajustar a una separación distinta de la otra, constituyendo así un *calibrador* unitario *PASA-NO PASA*.

Calibradores de aire. En la figura 35.11a se muestra la operación básica de un calibrador de aire (también llamado *calibrador neumático*). La cabeza de calibración (tapón de aire) tiene dos o más orificios, por lo general de 1.25 mm (0.05 pulgada) de diámetro, a través de la cual escapa aire presurizado (alimentado mediante una línea de presión constante). Cuanto más pequeña sea la separación entre el calibrador y el orificio, más difícil le resultará al aire escapar, y de ahí, mayor resultará la contrapresión. Ésta (que se detecta e indica por medio de un calibrador de presión) se calibra a fin de medir las variaciones dimensionales de los orificios.

El calibrador de aire se puede rotar durante el uso para indicar y medir cualquier falta de redondez del orificio. También es posible medir los diámetros exteriores de las partes (como pasadores y flechas) cuando el tapón de aire tiene la forma de un anillo deslizado sobre la parte. En los casos en que no es adecuado utilizar un anillo, puede emplearse una cabeza de calibración con forma de horquilla (con los orificios de aire en las puntas, fig. 35.11b). Es posible preparar diversas formas de cabezas de aire para usarlas en aplicaciones especiales sobre partes con diferentes rasgos geométricos, como la cabeza cónica mostrada en la figura 35.11c.

Es fácil utilizar los calibradores de aire y su resolución puede ser hasta de 0.125 μm (5 μpulg). Si la rugosidad de la superficie de la parte es muy alta, las lecturas podrían no ser confiables. El suministro de aire comprimido debe ser limpio y seco para que funcione apropiadamente. No es necesario que la parte no tenga polvo, partículas metálicas o contaminantes similares, ya que el aire las expulsa soplándolas. Dado que no existe contacto y la presión del aire en un calibrador de aire es baja, tiene el beneficio de no distorsionar la parte medida, como podría ser el caso con calibradores mecánicos, lo que daría lecturas erróneas.

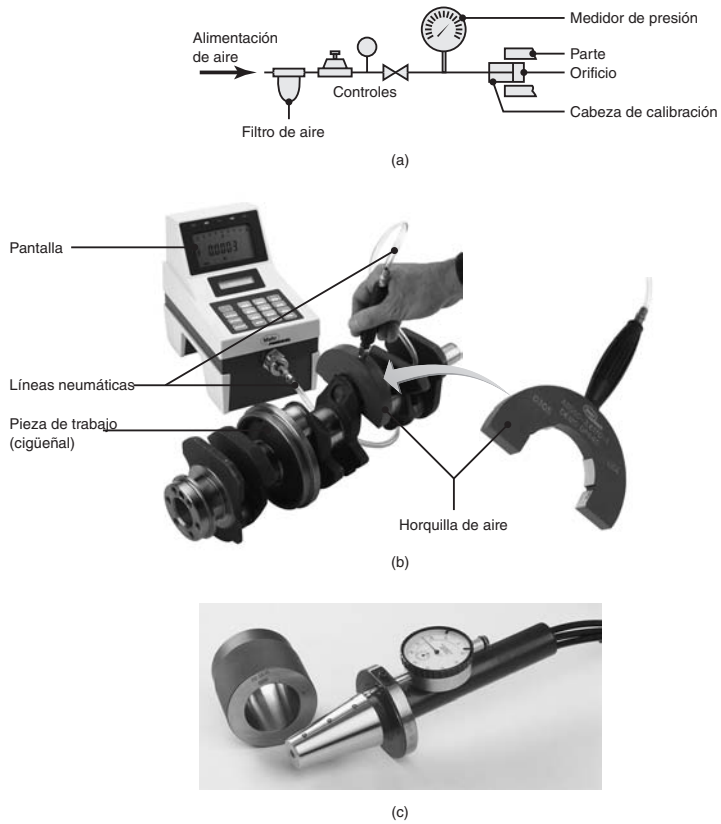


FIGURA 35.11 *(a)* Esquema del principio de un calibrador de aire. *(b)* Ilustración de un sistema de calibración de aire utilizado para medir la dimensión del apoyo principal en un cigüeñal. *(c)* Cabeza cónica para calibración de aire; obsérvese los pequeños orificios de aire en la superficie cónica. *Fuente*: *(b)* Cortesía de Mahr Federal, Inc. *(c)* Cortesía de Stotz Gaging Co.

35.5 Instrumentos y máquinas modernas de medición

Comenzamos con descripciones y características de instrumentos modernos de medición, ya que son mucho más precisos y confiables que los tradicionales, como los micrómetros, calibres, indicadores de carátula y transportadores.

Calibradores electrónicos. A diferencia de los sistemas mecánicos, los *calibradores electrónicos* detectan el movimiento del palpador de contacto mediante cambios en la resistencia eléctrica de un calibrador de deformación, inductancia o capacitancia. Después, las señales eléctricas se convierten y muestran de manera digital como dimensiones lineales con un indicador digital. En la figura 35.12 se presenta un calibrador electrónico manual para medir diámetros de cilindros. Cuando el mango se comprime ligeramente, la herramienta se puede insertar en el cilindro y se lee en forma directa el diámetro de éste. En la figura 35.13 se muestra un calibrador electrónico asistido por microprocesador para medir longitudes verticales.

Un calibrador electrónico utilizado comúnmente es el **transformador diferencial lineal variable** (LVDT, por sus siglas en inglés), que suele usarse para medir pequeños desplazamientos. Existen calibradores electrónicos con aristas recubiertas de diamante. El recubrimiento por deposición química de vapor (CVD) en estos calibradores tiene una resistencia al desgaste superior a la de las aristas de acero o de carburo de tungsteno; también resiste productos químicos.



FIGURA 35.12 Calibrador electrónico para medir diámetros de cilindros. La cabeza de medición está equipada con tres pasadores de acero con punta de carburo para obtener resistencia al desgaste. La pantalla de LED lee 29.158 mm. *Fuente:* Cortesía de TESA SA.

Aunque son más costosos que otros tipos de calibradores, los electrónicos tienen las ventajas de facilidad de operación, respuesta rápida, lectura digital, menor posibilidad de error humano, versatilidad, flexibilidad y la capacidad de integrarse a sistemas automáticos mediante microprocesadores y computadoras.

Micrómetros láser. En este instrumento, un rayo láser explora la pieza de trabajo (fig. 35.14) normalmente a una velocidad de 350 veces por segundo. Los micrómetros láser son capaces de resoluciones tan altas como 0.125 μm (5 μpulg). Son adecuados no sólo para las partes estacionarias, sino también para medición en línea de partes estacionarias, giratorias o vibratorias, así como de partes en la producción continua de alta velocidad.



FIGURA 35.13 Instrumento electrónico de medición de longitud vertical con una resolución de 1 μm (40 min). *Fuente:* Cortesía de TESA SA.

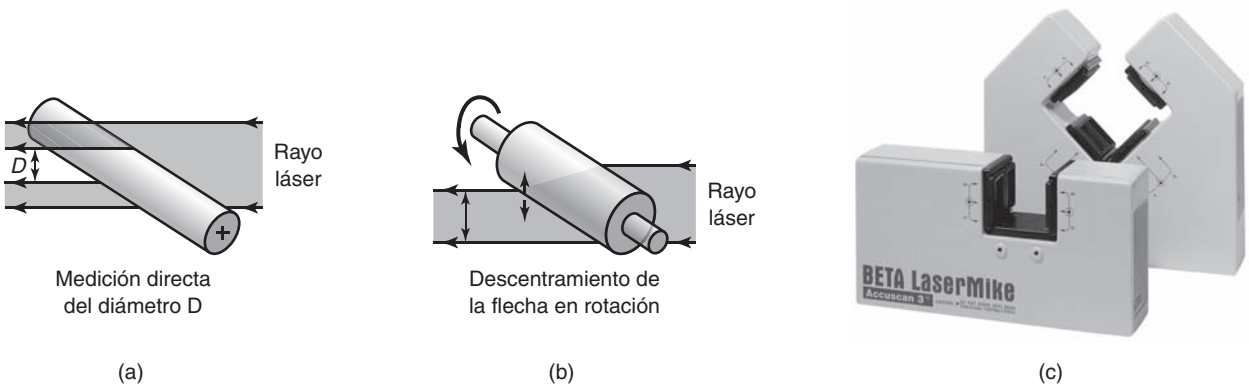


FIGURA 35.14 *(a)* y *(b)* Dos tipos de mediciones realizadas con un micrómetro de exploración láser. *(c)* Dos tipos de micrómetros láser. Obsérvese que el instrumento en el frente explora (barrido) la parte (colocada en la abertura) en una dimensión; el instrumento más grande explora la parte en dos dimensiones. *Fuente*: Cortesía de BETA LaserMike.

Debido a que no existe contacto físico, también pueden medir partes que se encuentran a temperaturas elevadas o que son demasiado flexibles para medirse por otros medios. Los rayos láser pueden ser de diversos tipos (como exploratorios, o de trama, para partes estacionarias), produciendo descripciones de **nubes de puntos** de las superficies de las partes. Para la medición en línea durante la producción, éstos son del tipo sombra, o con base en CCD.

Existen micrómetros láser con diversas capacidades y características. Los hay portátiles, para operación manual, o se pueden montar en (e integrar a) máquinas controladas por computadora y unidades de control estadístico de procesos.

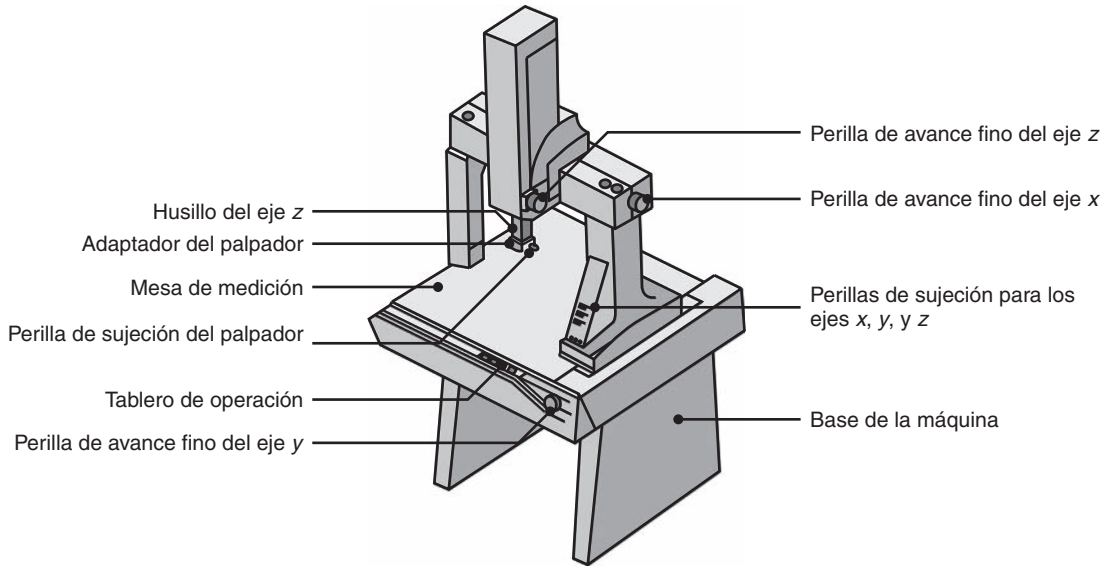
Interferometría láser. Esta técnica se utiliza para verificar y calibrar máquinas herramienta a fin de obtener diferentes rasgos geométricos durante el ensamble. Este procedimiento tiene mejores exactitudes que los calibradores o indicadores. Los interferómetros láser también se usan para compensar automáticamente errores humanos de posicionamiento en las máquinas de medición de coordenadas y en las máquinas de control numérico computarizado.

Medición fotoeléctrica digital de longitudes. Se trata de un instrumento que puede medir dimensiones generales, espesor y profundidad de varias partes. Los ajustes de resolución pueden ser de 5 a 0.01 μm.

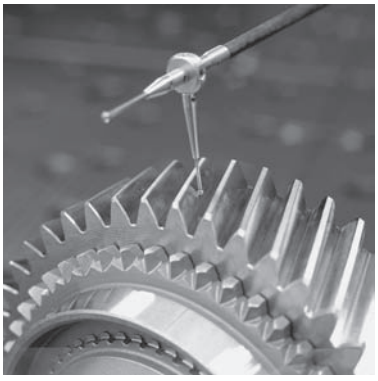
35.5.1 Máquinas de medición de coordenadas

Como se muestra de manera esquemática en la figura 35.15a, una *máquina de medición de coordenadas* (CMM, por sus siglas en inglés) consiste básicamente en una plataforma en la que se coloca la pieza de trabajo a medir y después se mueve en forma lineal o se gira. Un palpador sujeto a una cabeza (capaz de diversos movimientos, fig. 35.15b; ver también fig. 25.6) registra todas las mediciones. Además del palpador de tacto mostrado, otros tipos de palpadores son de barrido, láser (fig. 35.15c), y de visión, los cuales no son táctiles. En la figura 35.15d se muestra una máquina de medición de coordenadas para la inspección de una parte típica.

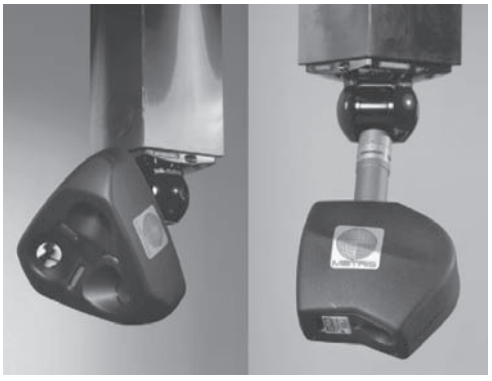
Las máquinas de medición de coordenadas son muy versátiles y capaces de registrar mediciones de perfiles complejos con alta resolución (0.25 μm; 10 μpulg) y a gran velocidad. Son de construcción rígida robusta para resistir los efectos ambientales en las plantas de manufactura, como variaciones de temperatura y vibración. Se pueden colocar cerca de las máquinas herramienta a fin de tener una inspección eficiente y retroalimentación rápida; de esta manera, los parámetros de procesamiento se corrigen antes de que se fabrique la siguiente parte. Aunque las CMM son costosas, la mayoría de las máquinas con un palpador de contacto y movimientos tridimensionales controlados por computadora son adecuadas para usarse en pequeños talleres y por lo general cuestan menos de $20,000 dólares.



(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 35.15 *(a)* Esquema de una máquina de medición de coordenadas. *(b)* Palpador de señal de contacto. *(c)* Ejemplos de palpadores láser. *(d)* Máquina de medición de coordenadas con una parte compleja en medición. *Fuente*: *(b)* a *(d)* Cortesía de Mitutoyo America Corp.

EJEMPLO 35.2 Máquina de medición de coordenadas para carrocerías automotrices

En la figura 35.16 se muestra una máquina para medición de coordenadas CNC grande y horizontal, utilizada para medir todas las dimensiones de una carrocería automotriz. Esta máquina tiene un intervalo de medición de 6 m × 1.6 m × 2.4 m de alto (236 pulgadas × 63 pulgadas × 94 pulgadas) y una resolución de 0.1 μm (4 μin.). El sistema tiene compensación de temperatura dentro de un intervalo de 16 °C a 26 °C (60 °F a 78 °F) a fin de mantener la exactitud de la medición. Para mejorar la eficiencia de las mediciones, esta máquina posee dos cabezas con palpadores de contacto y disparo que se controlan de manera simultánea y tiene movimientos tridimensionales completos. La velocidad de medición es de 5 mm/s (0.2 pulgada/s). Los palpadores se controlan mediante software y la máquina está equipada con dispositivos de seguridad para evitar que los palpadores golpeen inadvertidamente cualquier parte de la carrocería del automóvil durante sus



FIGURA 35.16 Máquina grande de medición de coordenadas con dos cabezales que miden diversas dimensiones en la carrocería de un automóvil. *Fuente:* Cortesía de Mitutoyo America Corp.

movimientos. El equipo mostrado alrededor de la base de la máquina incluye hardware y software de soporte que controla todos los movimientos y registra todas las mediciones.

Fuente: Cortesía de Mitutoyo America Corporation.

35.6 Medición automatizada

La medición e inspección automatizada se basa en diferentes **sistemas sensores en línea** que supervisan las dimensiones de las partes mientras se fabrican y, de ser necesario, utilizan estas mediciones como entrada para realizar correcciones (ver sección 37.7). Las celdas de manufactura y los sistemas de manufactura flexible (capítulo 39) han llevado a la adopción de técnicas y sistemas avanzados de medición.

Para apreciar la importancia de la supervisión en línea de las dimensiones, considérese brevemente la siguiente pregunta: si una máquina ha estado produciendo cierta parte con dimensiones aceptables, ¿qué factores contribuyen a una desviación posterior de las dimensiones de dicha parte producida por la misma máquina? Existen varios factores técnicos involucrados, así como humanos:

- Las deflexiones estáticas y dinámicas de la máquina debidas a las vibraciones y fuerzas fluctuantes, que son originadas por características de la máquina y variaciones en las propiedades y dimensiones del material de entrada.
- Distorsión de la máquina debida a efectos térmicos provocados por cambios en la temperatura del medio ambiente, los fluidos de trabajo de los metales y rodamientos y de diversos componentes.

- El desgaste de los herramentales, matrices y moldes puede afectar la precisión dimensional de las partes producidas.
- Errores y cálculos erróneos humanos.

Como un resultado de esos factores, las dimensiones de las partes pueden variar, estos hechos se continúan monitoreando lo necesario durante la producción.

35.7 Características generales y selección de instrumentos de medición

Por lo general, las características y la calidad de los instrumentos de medición se definen mediante diversos términos específicos, definidos de la siguiente manera (en orden alfabético):

- **Ampliación:** relación de la salida del instrumento a la dimensión de entrada (también llamada amplificación).
- **Amplificación:** ver ampliación.
- **Calibración:** ajuste o fijación de un instrumento para dar lecturas exactas dentro de un patrón de referencia.
- **Desviación:** ver Estabilidad.
- **Estabilidad:** capacidad del instrumento para mantener su calibración por un periodo (también llamada *desviación*).
- **Exactitud:** grado de coincidencia de la dimensión medida con su magnitud real.
- **Exactitud de repetición:** igual que Exactitud, pero repetida muchas veces.
- **Linealidad:** precisión de las lecturas de un instrumento a lo largo de todo su intervalo de operación.
- **Precisión:** grado con el que un instrumento da una medición repetida del mismo patrón.
- **Regla de 10** (regla del fabricante de calibradores)**:** un instrumento o calibrador debe ser 10 veces más exacto que las tolerancias dimensionales de la parte a medir. Al factor de 4 se le conoce como regla normal de mil (milésimos de pulgada, en el sistema inglés).
- **Resolución:** la menor dimensión que puede leer un instrumento.
- **Sensibilidad:** la menor diferencia de dimensiones que puede distinguir o detectar un instrumento.
- **Velocidad de respuesta:** cuán rápido indica un instrumento la medición, particularmente cuando se miden muchas partes en sucesión rápida.

La selección de un instrumento de medición apropiado para una aplicación particular también depende de (*a*) el tamaño y tipo de partes a medir; (*b*) el ambiente (temperatura, humedad, polvo y otros); (*c*) habilidades del operador requeridas, y (*d*) el costo del equipo.

35.8 Dimensionamiento y tolerancias geométricas

Eventualmente, las partes y los componentes manufacturados de manera individual se ensamblan como productos. Damos por hecho que cuando se fabrican y ensamblan mil podadoras, cada parte coincide en forma apropiada con otro componente. Por ejemplo, las ruedas de la podadora se deslizan con facilidad en sus ejes, o los pistones ajustan de manera adecuada dentro de los cilindros, no quedando ni apretados ni flojos.

De igual manera, cuando tenemos que reemplazar un perno roto o gastado en una máquina vieja, compramos un perno idéntico. Tenemos la confianza de experiencias similares en el pasado de que el perno se ajustará apropiadamente a la máquina. La razón por la que confiamos es que el perno se manufactura de acuerdo con ciertos estándares y las dimensiones de todos los pernos semejantes sólo varían en una pequeña cantidad especificada.

En otras palabras, todos los pernos se fabrican dentro de ciertos intervalos de tolerancias dimensionales; así, todos los pernos semejantes son *intercambiables*. También esperamos que el nuevo perno funcione en forma satisfactoria por cierto periodo, a menos que se abuse de él o se utilice de manera incorrecta. Periódicamente, los pernos se someten a diversas pruebas durante la producción para asegurar que su calidad se encuentra dentro de ciertas especificaciones.

Tolerancia dimensional. Se define como la variación permisible o aceptable de las dimensiones (altura, anchura, profundidad, diámetro y ángulos) de una parte. La raíz de la palabra "tolerancia" es el latín *tolerare*, que significa "soportar" o "tolerar". Las tolerancias son inevitables, dado que es virtualmente imposible (e innecesario) manufacturar dos partes que tengan las mismas dimensiones.

Además, debido a que las tolerancias cerradas pueden incrementar el costo del producto de manera significativa, un intervalo de tolerancia estrecha es indeseable económicamente. Sin embargo, en el caso de algunas partes, las tolerancias cerradas son necesarias para el funcionamiento apropiado y se justifica el gasto adicional asociado con los intervalos estrechos de tolerancia. Ejemplos son los instrumentos de medición y calibradores de precisión, los pistones hidráulicos y los rodamientos para motores de aeronaves.

Medir tolerancias y rasgos dimensionales de diferentes partes con rapidez y confiabilidad puede ser todo un reto. Por ejemplo, cada una de las 6 millones de partes de un avión Boeing 747-400 requiere la medición de casi 25 rasgos, lo que significa un total de 150 millones de mediciones.

Las investigaciones han mostrado que las tolerancias dimensionales en las partes manufacturadas en la tecnología de punta se están reduciendo por un factor de tres cada 10 años, y que esta tendencia continuará. Se estima que las exactitudes de (*a*) los tornos y fresadoras convencionales se elevará de las actuales 7.5 μm a 1 μm; (*b*) las máquinas rebanadoras de obleas con disco de diamante a 0.25 μm; (*c*) los tornos de precisión de diamante a 0.01 μm, y (*d*) el maquinado de haz de iones de ultraprecisión a menos de 0.001 μm, (ver también fig. 25.17).

Importancia del control de las tolerancias. Las tolerancias dimensionales sólo se vuelven importantes cuando una parte se va a ensamblar o se va a hacer coincidir con otra. Las superficies independientes y que no son funcionales no requieren un control cerrado de la tolerancia. Así, por ejemplo, la exactitud de los orificios y la distancia entre ellos en una biela son mucho más críticas que la anchura y el espesor de la misma en diversos puntos a lo largo de su longitud (ver fig. 14.7).

Para apreciar la importancia de las tolerancias dimensionales, ensamblemos una simple flecha redonda (eje) y una rueda con un orificio redondo. Supongamos que deseamos que el diámetro del eje sea de 1 pulgada (fig. 35.17). Vamos a una ferretería y compramos una barra redonda de 1 pulgada y una rueda con un orificio de 1 pulgada. ¿La barra se ajustará en el orificio sin forzarla, o quedará floja dentro de él? La dimensión de 1 pulgada es el **tamaño nominal** de la flecha. Si compramos dicha barra en una tienda distinta, en un momento distinto, y seleccionamos una al azar de un lote grande, es posible que cada barra tenga un diámetro ligeramente diferente. Las máquinas con la misma configuración pueden producir barras de diámetros un poco diferentes, dependiendo de muchos factores, como la velocidad de operación, la temperatura, lubricación y variaciones en las propiedades del material de alimentación. Si ahora especificamos un

intervalo de diámetros para la barra y para el orificio de la rueda, podemos predecir correctamente el tipo de ajuste.

Se ha establecido cierta terminología para definir con claridad estas cantidades geométricas, como el sistema de la International Organization for Standardization (ISO) mostrado en la figura 35.17. Obsérvese que tanto la flecha como el orificio tienen diámetros mínimos y máximos, respectivamente, siendo la diferencia entre ellos la tolerancia para cada miembro. En un plano apropiado de ingeniería se especificarían estos parámetros con valores numéricos, como se muestra en la figura 35.18.

A lo largo de este libro, en diversas figuras y tablas, se da el intervalo de tolerancias dimensionales posibles en los procesos de manufactura. Existe una relación general entre las tolerancias y el tamaño de la parte (fig. 35.19) y entre las tolerancias y el acabado superficial de las partes manufacturadas mediante diversos procesos (fig. 35.20). Nótese el amplio intervalo de tolerancias y acabados superficiales obtenidos. Asimismo, cuanto mayor sea la parte, mayor será su intervalo obtenible de tolerancias.

Definiciones. Se utilizan varios términos para describir las características de las relaciones dimensionales entre partes coincidentes. Los detalles sobre estas definiciones se encuentran en las normas ANSI B4.2, ANSI Y14.5 e ISO/TC10/SC5. Debido a las complejas relaciones geométricas comprendidas entre todas las partes a ensamblar, las definiciones de estos términos pueden ser de alguna manera confusas.

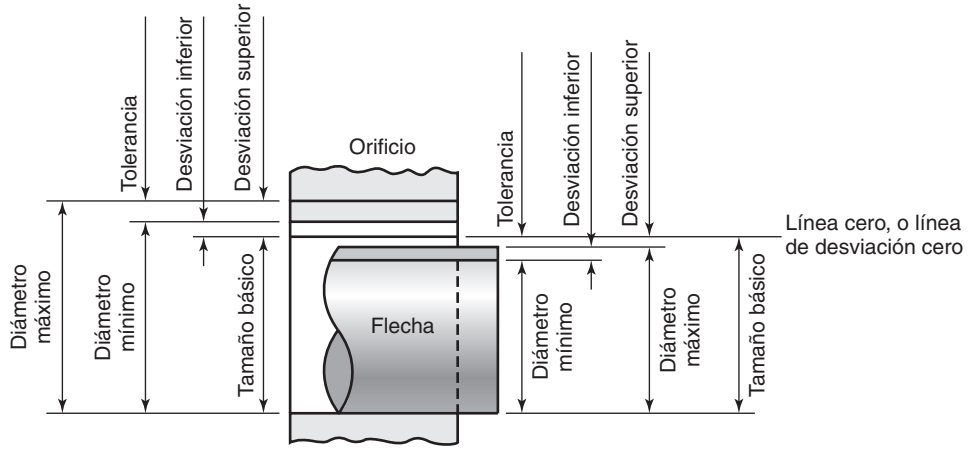


FIGURA 35.17 Tamaño básico, desviación y tolerancia en una flecha, de acuerdo con el sistema ISO.

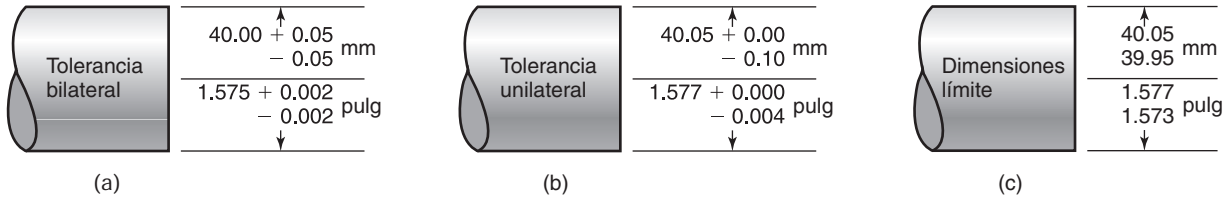


FIGURA 35.18 Diversos métodos de asignar tolerancias en una flecha: *(a)* tolerancia bilateral; *(b)* tolerancia unilateral, y *(c)* dimensiones límite.

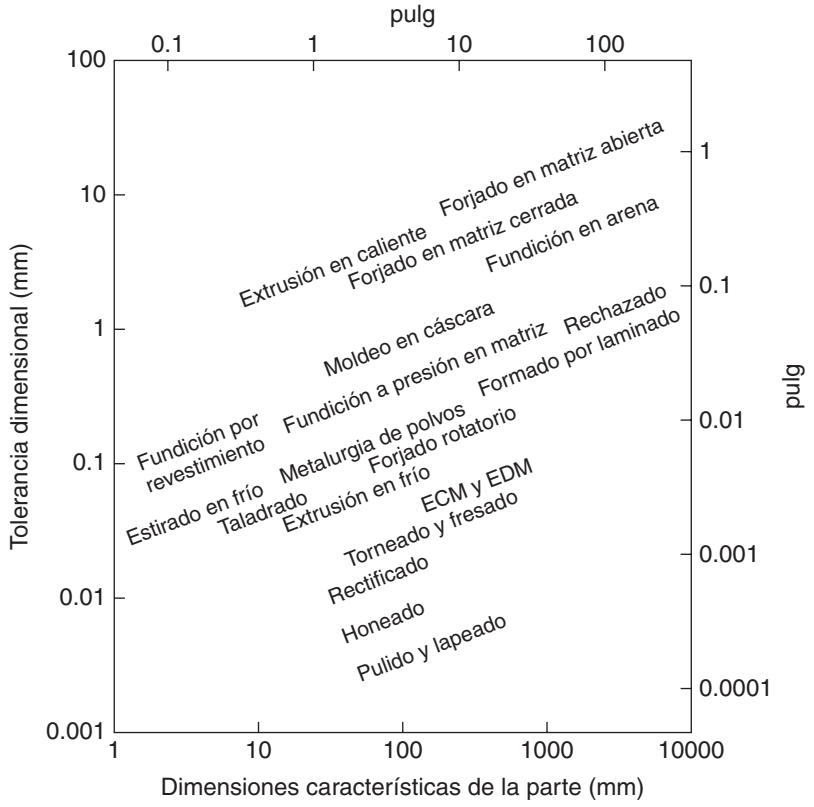


FIGURA 35.19 Tolerancias dimensionales en función del tamaño de la parte para diversos procesos de manufactura. Obsérvese que debido a los muchos factores comprendidos, existe un amplio intervalo para las tolerancias.

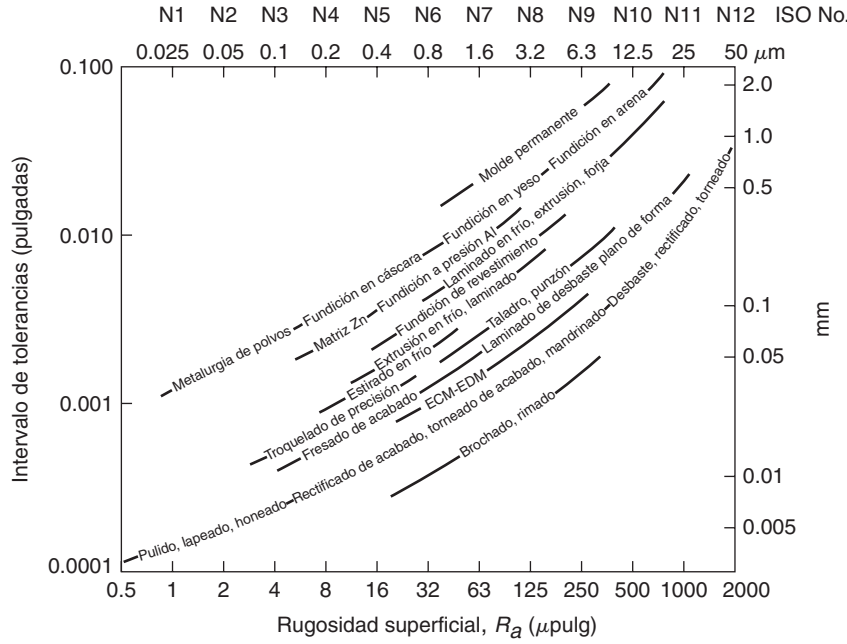


FIGURA 35.20 Intervalo de tolerancias dimensionales y rugosidad superficial obtenida en diferentes procesos de manufactura. Estas tolerancias se aplican a una dimensión de 25 mm (1 pulgada) de la pieza de trabajo. *Fuente:* J. A. Schey.

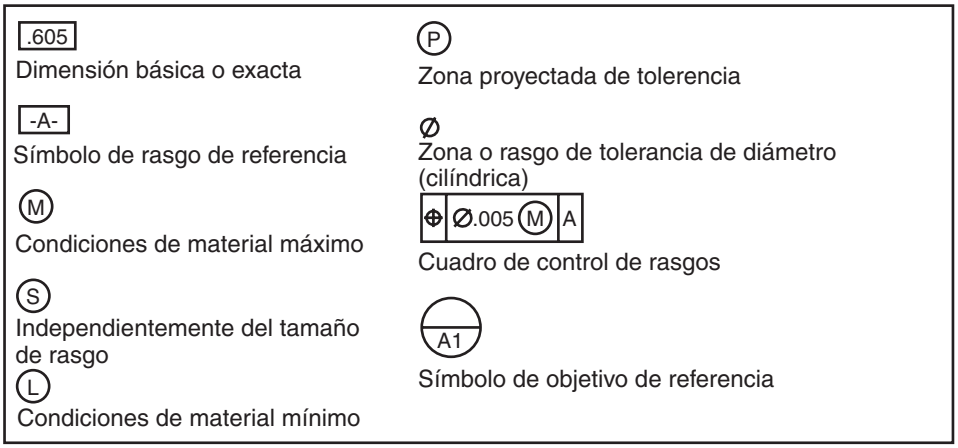
A continuación se definen brevemente los términos más utilizados para las características geométricas, en orden alfabético:

- **Ajuste:** intervalo de soltura o estrechez que puede resultar de la aplicación de una combinación específica de holgura y tolerancia en el diseño de los rasgos de las partes coincidentes.
- **Ajuste de transición:** ajuste con holgura pequeña o con interferencia que permite una localización exacta de las partes coincidentes.
- **Ajuste flojo:** ajuste que permite la rotación o deslizamiento entre partes coincidentes.
- **Ajuste por interferencia:** ajuste que tiene límites prescritos de manera que siempre se produce una interferencia cuando se ensamblan las partes coincidentes.
- **Condiciones de material máximo** (MMC, por sus siglas en inglés)**:** condiciones en que un rasgo de cierto tamaño contiene la máxima cantidad de material dentro de los límites establecidos para ese tamaño.
- **Datum o referencia:** eje, punto, línea o plano teóricamente exacto.
- **Dimensiones límite:** dimensiones máxima y mínima de una parte; también llamadas límites.
- **Grado internacional de tolerancia** (IT, por sus siglas en inglés)**:** grupo de tolerancias que varían dependiendo del tamaño básico, pero que proporcionan el mismo nivel relativo de exactitud dentro de un grado.
- **Holgura:** espacio entre las partes coincidentes.
- **Interferencia:** holgura negativa.
- **Línea cero:** línea de referencia a lo largo del tamaño básico, a partir de la cual se especifica un intervalo de tolerancias y desviaciones.
- **Rasgo:** porción físicamente identificable en una parte, como un orificio, ranura, perno o chaflán.
- **Sistema con base en la flecha:** tolerancias con base en una línea cero sobre la flecha; también llamado *práctica normal de flecha* o *sistema básico de flecha*.
- **Sistema con base en el orificio:** tolerancias con base en una línea cero en el orificio; también llamado *práctica normal de orificio* o *sistema básico de orificio*.
- **Tamaño básico:** dimensión de la que se derivan los límites del tamaño utilizando las tolerancias y las holguras.
- **Tolerancia bilateral:** desviación (positiva y negativa) del tamaño básico.
- **Tolerancia de ajuste:** diferencia de dimensiones especificada entre las partes coincidentes; también llamada *dimensión funcional* o *suma de dimensiones*.
- **Tolerancia de posición:** sistema para especificar la posición real, tamaño y forma de los rasgos de una parte, incluyendo las variaciones permisibles.
- **Tolerancias geométricas:** tolerancias que comprenden los rasgos de forma de la parte.
- **Tamaño nominal:** dimensión aproximada que se utiliza para el propósito de identificación general.
- **Tamaño normal:** tamaño nominal en enteros y subdivisiones comunes de longitud.
- **Tolerancias unilaterales:** desviación sólo en una dirección de la dimensión nominal.

Debido a que es más difícil controlar las dimensiones de los orificios que las de las flechas, es usual que se utilice el sistema con base en el orificio para especificar las tolerancias en los ensambles de flecha y orificio. En la figura 35.21a y b se muestran los símbolos usados para indicar las características geométricas.

Tipo de rasgo	Tipo de tolerancia	Característica	Símbolo
Individual (sin referencia)	Forma	Planicidad	▱
		Rectitud	—
		Circularidad (redondez)	○
		Cilindricidad	⌭
Individual o relacionado	Perfil	Perfil de una línea	⌒
		Perfil de una superficie	⌓
Relacionado (requiere referencia)	Orientación	Perpendicularidad	⊥
		Angularidad	∠
		Paralelismo	//
	Ubicación	Posición	⌖
		Concentricidad	◎
	Descentramiento	Descentramiento circular	↗
		Descentramiento total	⌰

(a)



(b)

FIGURA 35.21 Símbolos geométricos típicos a indicar en los planos de ingeniería de partes por manufacturar. *Fuente:* Cortesía de The American Society of Mechanical Engineers.

Límites y ajustes. Los límites y ajustes son fundamentales para especificar las dimensiones de orificios y flechas. Existen dos normas sobre límites y ajustes descritas por el American National Standards Institute (ver ANSI B4.1, B4.2 y B4.3). Una norma se basa en la unidad tradicional de pulgada. La otra se basa en la unidad métrica y se ha desarrollado con mayor detalle. En estas normas, las letras mayúsculas siempre se refieren al orificio y las minúsculas a la flecha.

RESUMEN

- En la tecnología moderna de manufactura, muchas partes se procesan utilizando un alto grado de precisión y, por lo tanto, requieren instrumentación de medición con varios rasgos y características.
- Existen muchos dispositivos para inspección, desde simples bloques patrón hasta calibradores electrónicos con alta resolución. La selección de un instrumento de medición particular depende de factores como el tipo de medición para el que se utilizará, el ambiente en el que se usará y la exactitud de medición requerida.
- Se han realizado avances importantes en la medición automatizada, conectando los dispositivos de medición a microprocesadores y computadoras para controlar las operaciones de manufactura durante el proceso. La conexión, supervisión, indicación, distribución y manipulación confiable de los datos son factores importantes, al igual que los costos significativos comprendidos en su implantación.
- Las tolerancias dimensionales y su selección son factores importantes en la manufactura. Las tolerancias no sólo afectan la exactitud y operación de todos los tipos de maquinaria y equipo, sino que también pueden influir en el costo del producto de manera apreciable.
- Cuanto menor (más estrecho) sea el intervalo de tolerancias especificadas, mayor será el costo de producción. Las tolerancias tienen que ser tan amplias como sea posible, pero también deben mantener los requerimientos funcionales del producto.

TÉRMINOS CLAVE

Ajustes
Autocolimador
Bloque patrón
Calibrador de aire
Calibrador instantáneo
Calibrador neumático
Calibradores electrónicos
Calibre de anillo
Calibre de tapón
Calibre fijo
Calibre vernier
Escuadra ajustable
Indicador de carátula
Instrumentos analógicos
Instrumentos de escala graduada
Instrumentos de medición comparativa de longitudes
Instrumentos digitales
Interferometría
Lectura total del indicador
Límites
Máquina de medición de coordenadas
Micrómetro
Micrómetro láser
Patrones de medición
Plano óptico
Precisión
Proyector óptico de contornos
Rejillas de difracción
Resolución
Sensibilidad
Tolerancia
Tolerancia dimensional

BIBLIOGRAFÍA

Bentley, J. P., *Principles of Measurement Systems,* 3a. ed., Addison-Wesley, 1995.

Bjorke, O., *Computer-Aided Tolerancing*, 2a. ed., ASME Press, 1992.

Bosch, J. A. (ed.), *Coordinate Measuring Machines and Systems*, Marcel Dekker, 1995.

Creveling, C. M., *Tolerance Control: A Handbook for Developing Optimal Specifications*, Addison-Wesley, 1996.

Drake, P. J., *Dimensioning and Tolerancing Handbook*, McGraw-Hill, 1999.

Farago, F. T. y Curtis, M. A., *Handbook of Dimensional Measurement,* 3a. ed., Industrial Press, 1994.

Gooldy, G., *Geometric Dimensioning and Tolerancing*, ed. rev., Prentice Hall, 1995.

Handbook of Metrology, Brown & Sharpe, 1992.

Henzhold, G., *Handbook of Geometric Tolerancing: Design, Manufacturing and Inspection*, Wiley, 1995.

Kennedy, C. W., Hoffman, E. G. y Bond, S. D., *Inspection and Gaging,* 6a. ed., Industrial Press, 1987.

Krulikowsky, A., *Fundamentals of Geometric Dimensioning and Tolerancing*, Delmar, 1997.

Liggett, J. V., *Dimensional Variation Management Handbook: A Guide for Quality, Design, and Manufacturing Engineers*, Prentice-Hall, 1993.

Machinery's Handbook, actualizado periódicamente, Industrial Press.

Meadows, J. D., *Geometric Dimensioning and Tolerancing*, Marcel Dekker, 1995.

_____, *Measurement of Geometric Tolerances in Manufacturing,* Marcel Dekker, 1998.

Morris, A. S., *Measurement and Calibration for Quality Assurance*, Wiley, 1998.

Peterson, M. B. y Winer, W. O. (eds.), *Wear Control Handbook*, American Society of Mechanical Engineers, 1980.

Puncochar, D. E., *Interpretation of Geometric Dimensioning and Tolerancing,* 2a. ed., Industrial Press, 1997.

Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4a. ed., Vol. 4, *Quality Control and Assembly*, Society of Manufacturing Engineers, 1987.

Whitehouse, D. J., *Handbook of Surface Metrology*, IOP Publishing, 1994.

Wilson, B. A., *Design Dimensioning and Tolerancing*, Goodheart-Wilcox, 1996.

_____, *Dimensioning and Tolerancing Handbook*. Genium, 1998.

Winchell, W., *Inspection and Measurement in Manufacturing*, Society of Manufacturing Engineers, 1996.

PREGUNTAS DE REPASO

35.1 Explique qué significa patrones de medición.

35.2 ¿Por qué es importante controlar la temperatura durante la medición de dimensiones?

35.3 Explique la diferencia entre mediciones lineales de lectura directa y de lectura indirecta. Mencione los instrumentos utilizados en cada categoría.

35.4 ¿Qué significa medición comparativa de longitudes?

35.5 Describa las características de los calibradores electrónicos.

35.6 Explique cómo se mide la planicidad. ¿Qué es un plano óptico?

35.7 Describa el principio de un comparador óptico.

35.8 ¿Por qué las máquinas de medición de coordenadas se han convertido en instrumentos importantes?

35.9 ¿Cuál es la diferencia entre un calibre de tapón y un calibre de anillo?

35.10 ¿Qué son las tolerancias dimensionales? ¿Por qué es importante controlarlas?

35.11 Explique la diferencia entre tolerancia y holgura.

35.12 ¿Cuál es la diferencia entre tolerancia bilateral y unilateral?

35.13 ¿Cómo se mide la rectitud?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

35.14 ¿Por qué las palabras "exactitud" y "precisión" frecuentemente se usan como sinónimos de manera incorrecta?

35.15 ¿Por qué los procesos de manufactura producen partes con una amplia variedad de tolerancias?

35.16 Explique la necesidad de la inspección automatizada.

35.17 Es común que las tolerancias dimensionales para las partes no metálicas sean más amplias que para las partes metálicas. Explique por qué. ¿Esto también sería cierto para las partes cerámicas?

35.18 Comente sus observaciones en relación con la figura 35.20. ¿Por qué aumenta la tolerancia dimensional al incrementarse la rugosidad superficial?
35.19 ¿Cuáles son las ventajas y limitaciones de los bloques patrón fabricados con zirconio?
35.20 Revise la figura 35.19 y comente el intervalo de tolerancias y dimensiones de las partes producidas mediante diversos procesos de manufactura.
35.21 En el juego de dardos, ¿es mejor ser exacto o ser preciso? Explique su respuesta.
35.22 ¿Cuáles son las ventajas y limitaciones de los calibres *PASA* y *NO PASA*?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

35.23 Suponga que una regla de acero se dilata 0.08% debido a un aumento en la temperatura ambiente. ¿Cuál será el diámetro indicado de una flecha cuyo diámetro a temperatura ambiente es de 1.500 pulgadas?
35.24 Si se utiliza la misma regla del problema 35.23 para medir extrusiones de aluminio, ¿cuál será el diámetro indicado de una parte que tiene 1.500 pulgadas a temperatura ambiente? ¿Cuál es la dimensión real? ¿Qué pasaría si la parte fuera un termoplástico?
35.25 Una flecha debe satisfacer un requisito de diseño de tener cuando menos 1.25 pulgadas de diámetro, pero puede ser 0.01 pulgada mayor. Exprese la tolerancia de la flecha como aparecería en un plano de ingeniería.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

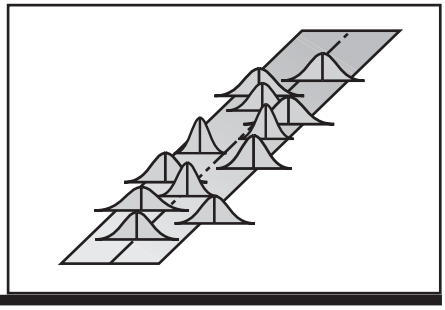
35.26 Opine sobre los méritos y limitaciones del equipo de medición digital sobre el analógico. Dé ejemplos específicos.
35.27 Tome un micrómetro vernier ordinario (fig. 35.2a) y una barra redonda sencilla. Pida a cinco compañeros de clase que midan el diámetro de la varilla con este micrómetro. Comente sus observaciones.
35.28 Consiga un micrómetro digital y una bola de acero de, digamos, 1/4 de pulgada de pulgada de diámetro. Mida su diámetro para las siguientes condiciones, cuando la bola se haya colocado en (a) un congelador; (b) agua hirviendo, y (c) su mano por diferentes periodos. Observe las variaciones de las dimensiones medidas, en su caso, y comente sobre ellas.
35.29 Repita el problema 35.28, pero con las siguientes partes: (a) la tapa de plástico de una jarra pequeña; (b) un componente de plástico termofijo, como el asa o perilla de la tapa de un sartén; (c) un vaso de jugo pequeño, y (d) una goma ordinaria de borrar.
35.30 ¿Cuál es la importancia de las pruebas descritas en los problemas 35.28 y 35.29?
35.31 Explique las ventajas y limitaciones relativas de un palpador de tacto contra un palpador láser.
35.32 Dibuje unos diagramas simples de algunas herramientas de formado y corte de metales (como las indicadas en las partes III y IV de este libro) e intégrelas con los diversos tipos de equipo de medición analizados en este capítulo. Comente las posibles dificultades implícitas en ello.
35.33 ¿Qué método se utilizaría para medir el espesor de una parte de espuma de hule? Explique su respuesta.
35.34 Consiga una o más de las siguientes partes y describa cómo se medirían tantas dimensiones clave como fuera posible. Incluya el tipo de instrumentos por utilizar y el método de medición.

- **a.** Una zapata de freno automovilístico.
- **b.** Una botella de plástico de refresco.
- **c.** Un disco compacto o un disco flexible para computadora.

35.35 Revise diversas partes y componentes en productos de consumo (incluyendo pequeños electrodomésticos) y comente el ajuste de las tolerancias dimensionales que deben tener para que estos productos funcionen apropiadamente.
35.36 Como sabe, las partes de lámina metálica muy delgada se pueden distorsionar de manera distinta cuando se sostienen de diferentes ubicaciones y bordes de la parte, al igual que lo hace una hoja de papel o de aluminio. Entonces ¿cómo se podría utilizar una máquina de medición de coordenadas para obtener medidas “exactas”? Explique su respuesta.

CAPÍTULO

36 Aseguramiento de la calidad, prueba e inspección



36.1 Introducción 1110
36.2 Calidad del producto 1111
36.3 Aseguramiento de la calidad 1112
36.4 Administración de la calidad total 1113
36.5 Métodos Taguchi 1114
36.6 Las normas ISO y QS 1119
36.7 Métodos estadísticos de control de calidad 1121
36.8 Control estadístico de proceso 1124
36.9 Confiabilidad de productos y procesos 1131
36.10 Ensayos no destructivos 1132
36.11 Ensayos destructivos 1136
36.12 Inspección automatizada 1137

EJEMPLOS:

36.1 Producción de tubería de polímeros 1117
36.2 Incremento en la calidad del producto sin aumentar el costo del mismo 1119
36.3 Cálculo de los límites de control y de la desviación estándar 1128

ESTUDIO DE CASOS:

36.1 Manufactura de televisores por Sony Corporation 1118
36.2 Control dimensional de partes de plástico en los automóviles Saturn 1129

En este capítulo se describen los procedimientos utilizados para asegurar la manufactura de productos de alta calidad. Los temas específicos que se cubren son:

- Naturaleza de la calidad y los factores que influyen en los productos manufacturados.
- Métodos de administración de la calidad total y los métodos Taguchi.
- Métodos estadísticos de control de calidad y uso de las tablas de control para asegurar que la producción de partes satisfaga las normas de calidad.
- Métodos de ensayos destructivos y no destructivos para la inspección de productos.

36.1 Introducción

A lo largo de este libro, hemos observado reiteradamente que los productos manufacturados desarrollan ciertas características externas e internas que son el resultado (en parte) de los procesos de producción utilizados. Las características externas más usadas comprenden las dimensiones, el tamaño y los aspectos de acabado e integridad superficial, como el daño superficial provocado por las herramientas de corte o por la fricción durante el procesamiento de la pieza de trabajo. Las características internas consideran defectos como porosidad, impurezas, inclusiones, transformaciones de fase, fragilización, grietas, separación de laminaciones y esfuerzos residuales.

Algunos de estos defectos pueden existir en el material original y otros se introducen, o inducen, durante la operación particular de manufactura. Antes de enviar las partes y los productos manufacturados al mercado, se inspeccionan varias de sus características. Esta rutina de inspección es importante para:

- Asegurar la precisión dimensional para que las partes se ajusten apropiadamente en otros componentes durante el ensamble.
- Identificar productos cuya falla o error tenga implicaciones potenciales serias, como lesiones o muerte de personas. Los ejemplos comunes son la falla de cables, interruptores, frenos, discos de rectificado, ruedas de ferrocarril, álabes de turbinas, recipientes a presión y uniones soldadas.

En este capítulo se identifican y describen los diversos métodos que suelen utilizarse para inspeccionar los productos manufacturados.

La **calidad del producto** siempre ha sido uno de los aspectos más importantes de las operaciones de manufactura. En vista de un mercado competitivo global, en la actualidad, *la mejora continua de la calidad* es una prioridad importante, sobre todo para las grandes

corporaciones en los países industrializados. En Japón se utiliza el término **kaizen** para identificar la mejora sin fin.

La prevención de defectos en los productos y la inspección en línea de las partes son metas importantes en todas las actividades manufactureras. Enfatizamos de nuevo que *la calidad debe integrarse dentro de un producto* y no simplemente verificarse después de que éste ya se fabricó. Por ello, son vitales una estrecha cooperación y comunicación entre los ingenieros de diseño y de manufactura, así como la participación directa y promoción de la gerencia de la compañía.

Se han logrado avances importantes en la ingeniería de la calidad y en la productividad, principalmente debido a los esfuerzos de peritos en calidad, como Deming, Taguchi y Juran. La importancia de la calidad, confiabilidad y seguridad de los productos en la economía global se reconoce ahora en el nivel internacional mediante el establecimiento de diversas normas ISO y QSO y por el Malcom Baldrige National Quality Award en Estados Unidos.

36.2 Calidad del producto

Todos hemos utilizado términos como "mala calidad" o "alta calidad" para describir un producto particular, o los productos de una compañía en particular. ¿Qué es la calidad? Aunque podamos reconocerla cuando vemos o usamos un producto, la calidad (a diferencia de la mayoría de los términos técnicos) es difícil de definir con precisión. Simple y generalmente, la calidad se puede definir como *la aptitud de un producto para su uso*.

En general, se han identificado varias dimensiones de la calidad; éstas incluyen características como el desempeño, la durabilidad, la confiabilidad, la robustez y la capacidad de servicio, así como la estética y la calidad percibida. Por lo tanto, la calidad es una característica o propiedad con bases amplias y sus factores constan no sólo de consideraciones técnicas bien definidas, sino también de opiniones subjetivas.

Considera, por ejemplo, lo siguiente: (*a*) el asa de un utensilio de cocina se instaló torcida, o se decolora, o se agrieta; (*b*) una báscula funciona de manera errática; (*c*) un juguete de plástico se rompe con facilidad; (*d*) una aspiradora requiere reparaciones frecuentes; (*e*) el vástago de un desarmador Phillips se desgasta con rapidez, y (*f*) una máquina herramienta no puede mantener las tolerancias dimensionales de la pieza de trabajo debido a la falta de rigidez o por su construcción deficiente. Estos ejemplos nos llevan a pensar que el producto es de baja calidad. La percepción general es que un producto de alta calidad realiza sus funciones de manera confiable por un largo periodo sin romperse o sin que requiera reparaciones. Algunos ejemplos de este tipo de producto son los refrigeradores, lavadoras, cuchillos de cocina, automóviles y bicicletas de "buena calidad".

Obsérvese que, al describir productos de buena o mala calidad, en este libro aún no se establecen los tiempos de vida de los productos o cualquiera otra de sus especificaciones técnicas. Hemos visto que los ingenieros de diseño y de manufactura tienen la responsabilidad de seleccionar y especificar materiales para los componentes de los productos por fabricar. Por ello, cuando se selecciona el metal para el vástago de un desarmador, podemos especificar materiales que tengan alta resistencia y alta resistencia al desgaste y a la corrosión, además de procesarlos utilizando las técnicas apropiadas de manufactura, y posiblemente tratamientos térmicos y recubrimientos.

Sin embargo, es importante observar que, en general, los materiales que poseen mejores propiedades son más costosos y es posible que sea más difícil procesarlos que aquellos con propiedades pobres. El nivel de calidad que un fabricante elige para sus productos puede depender del mercado al que éstos se dirigen. Por ejemplo, las herramientas de bajo costo y baja calidad tienen su propio nicho de mercado.

Como se describirá en el capítulo 40, el costo total del producto depende de muchas variables, incluyendo el nivel de automatización en la planta manufacturera. Entonces, existen muchas formas de que el ingeniero revise y modifique el diseño general del producto y los procesos de manufactura para minimizar el costo de un producto sin afectar su

TABLA 36.1

Expectativa de vida de algunos productos	
Billetes de dólar	18 meses
Baterías de automóviles	4 años
Secadoras para el pelo	5 años
Calentadores domésticos para agua	10 años
Aspiradoras	10 años
Unidades de acondicionamiento de aire	15 años
Reactores nucleares	40 años
Frenos automovilísticos de disco	65,000 km (40,000 millas)
Silenciadores de escape	50,000 km (30,000 millas)
Neumáticos	65,000–100,000 km (40,000–60,000 millas)

calidad. Contrario a la percepción general, los productos de alta calidad no necesariamente cuestan más, sobre todo si se considera el hecho de que los productos de mala calidad:

- Presentan dificultades en el ensamble y mantenimiento de componentes.
- Tienen necesidad de reparaciones en campo.
- Tienen incorporado el costo apreciable de la falta de satisfacción del cliente.

Fundamentalmente, las normas de calidad son un equilibrio entre varias consideraciones; a este equilibrio se le llama **retorno económico por calidad** (ROQ, por sus siglas en inglés) y por lo general incluye algún límite respecto de la vida útil esperada del producto. En la tabla 36.1 se presentan las expectativas comunes de vida útil de algunos productos (ver también tabla 40.3).

36.3 Aseguramiento de la calidad

El aseguramiento de la calidad es un esfuerzo total realizado por un fabricante para asegurar que sus productos se adapten a un conjunto detallado de especificaciones y normas. Se puede definir como el conjunto de acciones necesarias para asegurar que se satisfacen los requisitos de calidad; mientras que el *control de calidad* es el conjunto de técnicas de operación utilizadas para satisfacer los requerimientos de calidad.

Estas normas cubren varios tipos de parámetros: dimensiones, acabado superficial, tolerancias, composición y color, así como propiedades mecánicas, físicas y químicas. Además, es común que se emitan normas para asegurar un ensamble apropiado, utilizando componentes intercambiables que no tengan defectos y que hagan que un producto se comporte como los diseñadores buscaban originalmente.

El aseguramiento de la calidad es responsabilidad de todos los que participan en el diseño y la manufactura. La declaración repetida con frecuencia de que la calidad debe integrarse dentro de un producto refleja este importante concepto. Aunque se puede inspeccionar un producto terminado para verificar su calidad, la calidad no se puede inspeccionar *dentro* de un producto terminado.

Un aspecto importante del aseguramiento de la calidad es la capacidad de (*a*) analizar los defectos conforme ocurren en la línea de producción, y (*b*) eliminarlos rápidamente, o reducirlos a niveles aceptables. En un sentido todavía más amplio, el aseguramiento de la calidad comprende la evaluación del producto y la satisfacción del cliente. A la suma total de estas actividades se le llama *control de la calidad total*, y en un sentido más amplio, *administración de la calidad total*.

Es obvio que, para controlar la calidad, tenemos que ser capaces de:

- Medir cuantitativamente el nivel de calidad.
- Identificar todas las variables del material y del proceso que se pueden controlar.

El nivel de calidad integrado durante la producción se puede entonces verificar inspeccionando de manera continua el producto para determinar si satisface las especificaciones para las tolerancias dimensionales, el acabado superficial, los defectos y otras características.

36.4 Administración de la calidad total

La *administración de la calidad total* (TQM, por sus siglas en inglés) es un sistema que enfatiza el concepto de que la calidad debe diseñarse e integrarse dentro del producto. Es el enfoque de un sistema en el que la gerencia y los empleados realizan un esfuerzo concertado para manufacturar productos de alta calidad de manera continua. En este caso, la meta es la *prevención* de defectos (más que la *detección*).

El *liderazgo* y el *trabajo en equipo* en la organización son fundamentales. Ambos aseguran que la meta de una **mejora continua** en las operaciones de manufactura sea imperativa, debido a que reducen la variabilidad del producto y mejoran la satisfacción del cliente. El concepto TQM también requiere que se controlen los *procesos* y no *las partes producidas*, para reducir la variabilidad del proceso, y que no se permita que las partes defectuosas continúen a través de la línea de producción.

Círculo de calidad. Este concepto consiste en juntas regulares entre grupos de empleados (trabajadores, supervisores y gerentes) que discuten cómo mejorar y mantener la calidad del producto en todas las etapas de la operación de manufactura. Se enfatizan la participación, responsabilidad, creatividad y trabajo en equipo del trabajador. Se da una capacitación completa para que éste pueda estar consciente de la calidad, sea capaz de analizar datos estadísticos, identifique las causas de una mala calidad y emprenda acciones inmediatas para corregir la situación. La experiencia ha indicado que los círculos de calidad son más efectivos en los ambientes de *manufactura esbelta* (*lean manufacturing*) (ver sección 39.6).

La ingeniería de la calidad como filosofía. Los expertos en control de calidad han puesto en mayor perspectiva muchos de los conceptos y métodos de control de calidad. Entre estos expertos figuran Deming, Juran y Taguchi, cuyas filosofías de calidad y de costo de producto tuvieron un impacto importante en la manufactura moderna. A continuación se describen sus filosofías de ingeniería de la calidad.

36.4.1 Métodos Deming

Durante la Segunda Guerra Mundial, W. E. Deming (1900-1993) y otros más desarrollaron nuevos métodos para el *control estadístico de los procesos* destinados a las plantas de manufactura industrial en tiempos de guerra. Los métodos de control estadístico surgieron del reconocimiento de que existían variaciones en (*a*) el desempeño de las máquinas y las personas, y (*b*) la calidad y las dimensiones de las materias primas. Sus esfuerzos comprendieron no sólo métodos estadísticos de análisis, sino también una nueva manera de ver las operaciones de manufactura, esto es, desde la perspectiva de mejorar la calidad al mismo tiempo que se reducen los costos.

Deming reconoció que las organizaciones de manufactura son sistemas de gerencia, trabajadores, máquinas y productos. Sus ideas básicas se resumen en sus ahora famosos *14 puntos*, presentados en la tabla 36.2. Estos puntos no deben verse como una lista de verificación o un menú de tareas; son las características que reconoció Deming en las compañías que producen bienes de alta calidad. Él puso gran énfasis en la comunicación, participación directa del trabajador y educación tanto en estadística como en tecnología moderna de manufactura. Sus ideas se han aceptado ampliamente desde el fin de la Segunda Guerra Mundial.

TABLA 36.2

Los 14 puntos de Deming
1. Crear constancia del propósito hacia el mejoramiento del producto y del servicio.
2. Adoptar la nueva filosofía.
3. Terminar con la dependencia de la inspección masiva para alcanzar la calidad.
4. Terminar con la práctica de asignar pedidos con base en el precio.
5. Mejorar constantemente y para siempre el sistema de producción y servicio, a fin de mejorar la calidad y la productividad, y por ende disminuir el costo de manera constante.
6. Instituir la capacitación para los requerimientos de una tarea en particular y documentarla para capacitación futura.
7. Instituir el liderazgo, en lugar de la supervisión.
8. Desterrar el miedo para que todos puedan trabajar eficazmente.
9. Romper las barreras entre los departamentos.
10. Eliminar eslóganes, exhortaciones y metas para cero defectos y nuevos niveles de productividad.
11. Eliminar las cuotas y la administración mediante números y las metas numéricas. Sustituir por el liderazgo.
12. Eliminar las barreras que roben al trabajador el orgullo por su trabajo personal.
13. Instituir un programa vigoroso de educación y automejoramiento.
14. Poner a todos en la compañía a trabajar para conseguir la transformación.

36.4.2 Métodos Juran

Un contemporáneo de Deming, J.M. Juran (1904–), enfatizó lo siguiente:

- Reconocer la calidad en todos los niveles de una organización, incluyendo la alta gerencia.
- Promover una cultura corporativa responsable.
- Capacitar a todo el personal en la forma de *planear*, *controlar* y *mejorar* la calidad.

La alta gerencia de una organización se interesa en el negocio y la administración, mientras que quienes se encuentran en control de calidad se interesan en la tecnología. Con frecuencia, estos mundos diferentes se enfrentan y sus conflictos han provocado problemas de calidad.

Los planeadores determinan quiénes son los clientes y sus necesidades. Los clientes de una organización pueden ser externos (los usuarios finales que compran el producto o el servicio) o internos (las diferentes áreas de una organización que confían en otros segmentos de la misma para que los provean con productos y servicios). Así, los planeadores desarrollan diseños de productos y procesos para responder a las necesidades del cliente. Las plantas se vuelcan sobre los encargados de las operaciones, que entonces se vuelven responsables de implantar el control de la calidad y su mejora continua.

36.5 Métodos Taguchi

En los métodos de G. Taguchi (1924-), la alta calidad y los bajos costos se logran combinando la ingeniería y los métodos estadísticos para optimizar el diseño del producto y los procesos de manufactura. Los *métodos Taguchi* se refieren a las estrategias desarrolladas por Taguchi para manufacturar productos de alta calidad. Un punto de vista fundamental es el reto de la calidad que enfrentan los fabricantes: proveer productos que deleiten a sus clientes. Para satisfacerlos, los fabricantes deben ofrecer artículos con las siguientes características:

- Alta confiabilidad.
- Buen desempeño de las funciones deseadas.

- Buena apariencia.
- Económicos.
- Actualizables.
- Disponibles en las cantidades deseadas cuando se requiera.
- Robustos a lo largo de su vida útil esperada (ver sección 36.5.1).

Obviamente, estas características de producto son la meta de los fabricantes, que buscan proveer productos de alta calidad. Aunque es un gran reto cumplir realmente con todas estas características, la *excelencia en la manufactura* es ciertamente un prerrequisito.

Taguchi también contribuyó con los métodos para documentar la calidad. Debe reconocerse que cualquier desviación del estado óptimo de un producto representa una pérdida financiera debido a dichos factores, ya que reducen la vida, el desempeño y la economía del producto. La pérdida de calidad se define como la pérdida financiera de la sociedad después de que se embarca el producto, con los siguientes resultados:

- La baja calidad lleva a la insatisfacción del cliente.
- Se incurre en costos al dar servicio y reparar productos defectuosos, algunos en el campo.
- Disminuye la credibilidad del fabricante en el mercado.
- Al final el fabricante pierde su parte del mercado.

Los métodos Taguchi de *ingeniería de la calidad* enfatizan la importancia de lo siguiente:

- **Mejorar la interacción de los equipos en las funciones interrelacionadas:** los ingenieros de diseño y los de proceso o de manufactura se comunican entre ellos en un lenguaje común. Cuantifican las relaciones entre los requisitos de diseño y la selección del proceso de manufactura (ver también la sección I.3 de la Introducción General).
- **Implementar el diseño experimental:** los factores comprendidos en un proceso u operación y sus interacciones se estudian de manera simultánea.

En el *diseño experimental*, se identifican los efectos de las variables controlables e incontrolables del producto. Este enfoque minimiza las variaciones en las dimensiones y propiedades del producto y finalmente lleva la media al nivel deseado.

Los métodos utilizados para el *diseño experimental* son complejos. Comprenden el uso del *diseño factorial* y de los *arreglos ortogonales*, que reducen el número de experimentos requeridos. También son capaces de identificar los efectos de variables que no se pueden controlar (llamadas *ruido*), como los cambios en las condiciones ambientales.

El uso de estos métodos produce (*a*) la rápida identificación de las variables de control (observando los *efectos principales*), y (*b*) la habilidad para determinar el mejor método de control del proceso. Algunas veces, el control de estas variables requiere equipo nuevo o modificaciones importantes al equipo existente. Por ejemplo, se pueden identificar con facilidad las variables que afectan las tolerancias dimensionales en el maquinado de un componente particular y (siempre que sea posible) se pueden especificar la velocidad de corte, el avance, la herramienta de corte y los fluidos de corte correctos.

Un concepto importante introducido por Taguchi es que cualquier desviación de un objetivo de diseño constituye una pérdida de calidad. Considérese, por ejemplo, las normas de tolerancia de la figura 35.18. Existe un intervalo de dimensiones en el que la parte es aceptable. Por otro lado, la filosofía Taguchi demanda minimizar la desviación del objetivo de diseño. Entonces, utilizando la figura 35.18a como ejemplo, un eje con un diámetro de 40.03 mm normalmente se consideraría aceptable y pasaría las inspecciones. Sin embargo, en el enfoque Taguchi, una parte con este diámetro representa una desviación del objetivo de diseño. En general, tales desviaciones reducen la robustez y el desempeño de los productos, sobre todo en sistemas complejos.

36.5.1 Robustez

Otro aspecto de la calidad es un concepto originalmente sugerido por Taguchi, cuya importancia ha crecido y al que se conoce como *robustez*. Un diseño, proceso o sistema robusto es aquel que continúa funcionando dentro de parámetros aceptables a pesar de las variaciones (con frecuencia imprevistas) en su ambiente. En otras palabras, sus resultados (como su funcionamiento y desempeño) tienen una sensibilidad mínima a las variaciones de entrada (como el ambiente, la carga y la fuente de potencia). Además, la robustez se refiere a que el desempeño de un producto o de una máquina sea insensible a los cambios de tolerancia y que no deben deteriorarse de manera apreciable a lo largo de su vida esperada.

Por ejemplo, en un diseño robusto, una parte funcionará lo suficientemente bien incluso si las cargas aplicadas (o sus direcciones) rebasan los valores esperados. De igual manera, el desempeño de una máquina o sistema robusto sufrirá un deterioro mínimo incluso si experimenta variaciones imprevistas en las condiciones ambientales, como temperatura, humedad y vibraciones. Asimismo, una máquina robusta no tiene una reducción significativa de su desempeño a lo largo de su vida, mientras que un diseño menos robusto se desempeña con menor eficiencia conforme pasa el tiempo.

Como ilustración simple de un diseño robusto, considérese una ménsula de lámina metálica que se debe sujetar a una pared con dos tornillos (fig. 36.1a). La posición de los dos orificios de montaje en la ménsula incluye cierto error debido al proceso de manufactura comprendido. Por lo tanto, este error evitará que la orilla superior de la ménsula quede perfectamente horizontal.

En la figura 36.1b se muestra un diseño más robusto en el que los orificios de montaje se han alejado el doble de la distancia del diseño original. Aunque la precisión en la ubicación del orificio se mantiene igual y el costo de manufactura es casi el mismo, ahora la variabilidad en la orilla superior de la ménsula (respecto de la horizontal) se ha reducido a la mitad. Sin embargo, si la ménsula se somete a vibración, los pernos pueden aflojarse al paso del tiempo. Un enfoque de diseño aún más robusto sería utilizar un adhesivo para mantener las roscas en su lugar, o usar algún tipo de sujetador que no se afloje con el tiempo.

36.5.2 Función de pérdida de Taguchi

La *función de pérdida de Taguchi* se introdujo debido a que las prácticas tradicionales de contabilidad no tenían una forma real de calcular las pérdidas de las partes que satisfacían las especificaciones de diseño. En el método tradicional de contabilidad, una parte es defectuosa y produce una pérdida a la compañía cuando excede sus tolerancias de diseño; en caso contrario, no existe pérdida para la compañía.

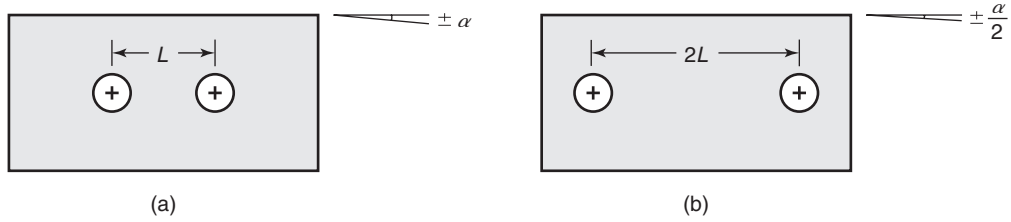


FIGURA 36.1 Ejemplo simple de un diseño robusto. *(a)* Ubicación de dos orificios de montaje en una ménsula de hoja metálica donde la desviación de la superficie superior, respecto de la horizontal, es $\pm\alpha$. *(b)* Nueva ubicación de los orificios en donde la desviación de la superficie horizontal, respecto de la horizontal, se reduce a $\pm\alpha/2$.

La función de pérdida de Taguchi es una herramienta para comparar la calidad mediante la minimización de las variaciones. Esta función calcula una pérdida creciente para la compañía cuando el componente se aleja del objetivo de diseño. Se define como una parábola, donde un punto es el costo de reemplazo (incluyendo embarque, desecho y costos de manejo) en un extremo de las tolerancias, mientras que un segundo punto corresponde a la pérdida cero en el objetivo de diseño.

Matemáticamente, la pérdida se puede escribir como:

$$\text{Costo de la pérdida} = k[(Y - T)^2 + \sigma^2] \tag{36.1}$$

donde Y es el valor medio de manufactura, T el valor objetivo del diseño, σ la desviación estándar de las partes de la manufactura y k una constante, definida como:

$$k = \frac{\text{Costo de reemplazo}}{(\text{LSL} - T)^2} \tag{36.2}$$

donde LSL es el límite inferior de la especificación. Cuando los límites inferior (LSL) y superior (USL) de la especificación son el mismo (esto es, se equilibran las tolerancias), se puede utilizar cualquiera de los límites en esta ecuación.

EJEMPLO 36.1 Producción de tubería de polímeros

Se van a producir tubos de polímeros para aplicaciones médicas. El espesor objetivo de la pared es de 2.6 mm, un límite superior de la especificación es de 3.2 mm y un límite inferior es de 2.0 mm (2.6 ± 0.6 mm). Si las unidades son defectuosas, se reemplazan con un costo de $10.00 dólares, incluyendo el embarque. El proceso actual produce partes con una media de 2.6 mm y una desviación estándar de 0.2 mm. El volumen actual es de 10,000 tramos de tubo al mes.

Se está considerando una mejora para el sistema de calentamiento del extrusor. Esta mejora reducirá la variación a la mitad, pero cuesta $50,000 dólares. Determínese la función de pérdida de Taguchi y el periodo de recuperación para ambos casos.

Solución Primero identificamos las cantidades involucradas de la siguiente manera: USL = 3.2 mm, LSL = 2.0 mm, T = 2.6 mm, σ = 0.2 mm, e Y = 2.6 mm.

La cantidad k está dada por:

$$k = \frac{(\$10.00)}{(3.2 - 2.6)^2} = \$27.28$$

El costo de la pérdida es entonces:

$$\text{Costo de la pérdida} = (27.78)[(2.6 - 2.6)^2 + 0.2^2] = \$1.11 \text{ por unidad}$$

Después de la mejora, la desviación estándar es de 0.1 mm; entonces, el costo de la pérdida es:

$$\text{Costo de la pérdida} = (27.78)[(2.6 - 2.6)^2 + 0.1^2] = \$0.28 \text{ por unidad}$$

Entonces, los ahorros son de $(\$1.11 - \$0.28)(10{,}000) = \$8300$ dólares al mes. De ahí, el periodo de recuperación de la inversión es de $\$50{,}000/(\$8300/\text{mes}) = 6.02$ meses.

ESTUDIO DE CASO 36.1 Manufactura de televisores por Sony Corporation

Los ejecutivos de Sony Corporation encontraron una situación confusa que los confrontaba a mediados de la década de 1980. Los televisores manufacturados en las instalaciones de producción japonesas se vendían mejor que los fabricados en una instalación de San Diego, aunque se producían a partir de diseños y planos idénticos. No había identificaciones para distinguir los aparatos hechos en Japón de los fabricados en Estados Unidos, por lo que no existía alguna razón aparente para esta discrepancia.

Sin embargo, las investigaciones revelaron que los televisores producidos en Japón eran superiores a las versiones estadounidenses; la definición del color era mejor y los matices eran más brillantes. Ya que los aparatos se encontraban en exhibición en las tiendas, los consumidores podían detectarlo con facilidad y comprar el modelo que tenía la mejor imagen.

La diferencia en calidad de la imagen era obvia, pero las razones de esta diferencia no estaban claras. Un punto adicional de confusión era la seguridad de que la instalación de San Diego tenía implantado un programa de calidad total y que mantenía sus normas de control de calidad para que no se produjeran partes defectuosas. La planta japonesa no contaba con un programa de calidad total, pero se hacía énfasis en reducir la variación entre parte y parte.

Investigaciones adicionales encontraron un patrón típico en un circuito integrado que era crítico porque afectaba la densidad del color. En la figura 36.2a se muestra la distribución de las partes que cumplían el objetivo de diseño del color; en la figura 36.2b se presenta la función de pérdida de Taguchi para estas partes. En la instalación de San Diego, donde se minimizaba el número de partes defectuosas (cero en este caso), se lograba una distribución uniforme dentro de los límites de la especificación.

La planta japonesa realmente producía partes fuera de la especificación de diseño, pero la desviación estándar alrededor de la media era menor. Utilizando el método de la función de pérdida de Taguchi (ver ejemplo 36.1), la instalación de San Diego perdía $1.33 dólares por unidad, mientras que la japonesa perdía $0.44 dólares por unidad.

Los puntos de vista tradicionales sobre la calidad habrían concluido que la distribución uniforme sin defectos era superior a la distribución en la que se producían unos cuantos defectos, pero donde la mayoría de las partes se encuentra más cerca de los valores objetivo de diseño. Sin embargo, los consumidores pueden detectar con facilidad qué producto es superior, y el mercado demuestra que minimizar las desviaciones es una meta de calidad que vale la pena.

Fuente: Cortesía de D. M. Byrne y S. Taguchi.

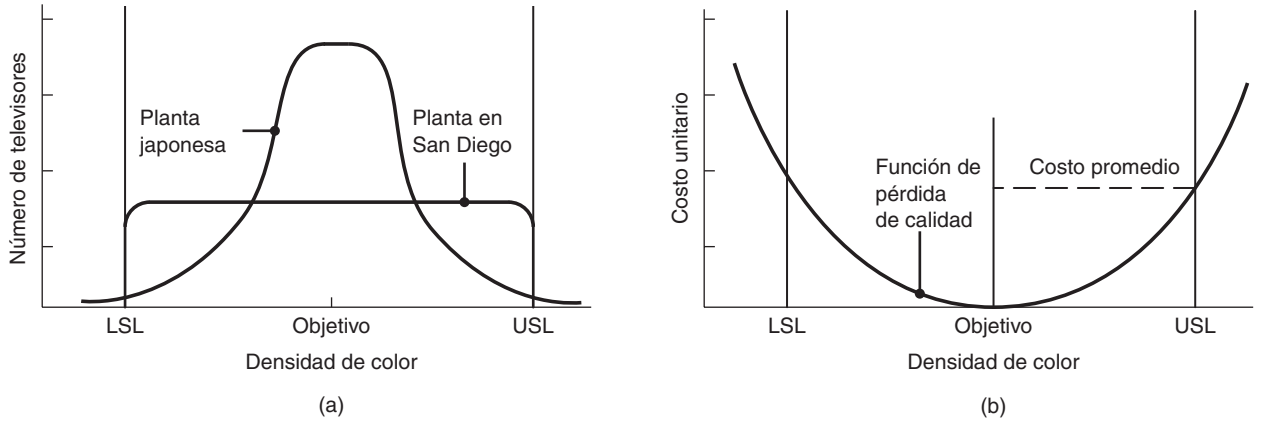


FIGURA 36.2 *(a)* Distribución de valores de la función objetivo de densidad de color para los televisores. *(b)* Función de pérdida de Taguchi que muestra el promedio del costo unitario de reemplazo para corregir los problemas de calidad. *Fuente*: G. Taguchi.

EJEMPLO 36.2 Incremento en la calidad del producto sin aumentar el costo del mismo

Un fabricante de losetas se dio cuenta de que se estaba generando demasiado desecho debido a las variaciones de temperatura en el horno utilizado para quemar las losetas, lo que afectaba de manera adversa las ganancias de la compañía. La primera solución que consideró fue comprar nuevos hornos con mejores controles de temperatura.

Sin embargo, esta solución requeriría una inversión importante de capital. Se elaboró un estudio para determinar si se podían realizar modificaciones en la composición de la arcilla, a fin de que fuera menos sensible a las fluctuaciones de temperatura durante el quemado.

Con base en un diseño experimental factorial en el que se estudiaron simultáneamente los factores comprendidos en el proceso y sus interacciones, se encontró que al aumentar el contenido de cal de la arcilla las losetas eran menos sensibles a las variaciones de temperatura durante el quemado. Se implantó esta modificación (que también era la alternativa de bajo costo), reduciendo los desechos de manera sustancial y mejorando la calidad de la loseta.

36.6 Las normas ISO y QS

Con el creciente comercio internacional, la manufactura global y la competencia sensible al precio, han aparecido amplias opciones de productos industriales y de consumo. De manera creciente, los consumidores están demandando *productos de alta calidad* y servicios a bajo costo, y están buscando proveedores que puedan responder a esta demanda en forma consistente y confiable.

A su vez, esta tendencia ha creado la necesidad de conformidad y consenso internacional en relación con el establecimiento de métodos de control de calidad, confiabilidad y seguridad de un producto. Además de estas consideraciones, se están abordando aspectos igualmente importantes respecto del ambiente y la calidad de vida con nuevas normas internacionales. En esta sección se describen las normas correspondientes a la calidad del producto y los aspectos ambientales.

36.6.1 La norma ISO 9000

Publicada primero en 1987 y modificada en 1994, la norma ISO 9000 (*Administración de la Calidad y Normas de Aseguramiento de la Calidad*) es una deliberada serie genérica de normas de administración de sistemas de calidad; ha influido de manera permanente en la manera en que las compañías manufactureras conducen sus negocios en el comercio mundial y se ha convertido en la norma internacional de calidad.

La serie ISO 9000 incluye las siguientes normas:

ISO 9001—*Sistemas de calidad. Modelo para el aseguramiento de la calidad en el diseño/desarrollo, producción, instalación y servicio*.
ISO 9002—*Sistemas de calidad. Modelo para el aseguramiento de la calidad en la producción e instalación*.
ISO 9003—*Sistemas de calidad. Modelo para el aseguramiento de la calidad en la inspección final y prueba*.
ISO 9004—*Administración de la calidad y elementos del sistema de calidad. Lineamientos*.

Las compañías se registran voluntariamente en estas normas y se emiten certificados. Por lo regular, el registro buscado es para la ISO 9001 o 9002, y algunas compañías se han registrado en la ISO 9003. La norma ISO 9004 es sólo un lineamiento y no es un modelo o base para registro. Para obtener la certificación, equipos de terceros independientes y acreditados visitan las plantas de la compañía y las auditan para certificar que los 20 elementos clave de la norma se encuentran establecidos y funcionan de manera apropiada.

Dependiendo de la medida en que una compañía falle con los requerimientos de la norma, el registro se puede recomendar o no en ese momento. El equipo de auditoría no aconseja ni consulta a la compañía sobre la forma de corregir las discrepancias, sino que simplemente describe la naturaleza del incumplimiento. Para mantener la certificación, se requieren auditorías periódicas. El proceso de certificación puede necesitar desde seis meses hasta un año o más y costar decenas de miles de dólares. El costo depende del tamaño, número de plantas y línea de productos de la empresa.

La norma ISO 9000 no es una certificación de producto, sino una **certificación del proceso de calidad**. Las compañías establecen sus propios criterios y prácticas de calidad. Sin embargo, el sistema documentado de calidad debe satisfacer la norma ISO 9000. Por ello, una empresa no puede incorporar al sistema algún criterio que se oponga a la intención de la norma.

El registro simboliza el compromiso de una compañía para adoptar prácticas consistentes, como se especifica en el sistema de calidad de la propia empresa (como calidad en el diseño, desarrollo, producción, instalación y servicio), incluyendo la documentación apropiada para tales prácticas. De esta manera, los clientes (incluyendo las entidades gubernamentales) se aseguran de que el proveedor del producto o servicio (que puede o no encontrarse dentro del mismo país) está siguiendo las prácticas especificadas. De hecho, las compañías manufactureras se aseguran también de dicha práctica en relación con sus propios proveedores que tienen registro ISO 9000; por lo tanto, éstos también deben registrarse.

36.6.2 La norma QS 9000

Desarrollada conjuntamente entre Chrysler, Ford y General Motors, la norma QS 9000 se publicó por primera vez en agosto de 1994. Antes del desarrollo de la QS 9000, cada una de las "Tres Grandes" compañías automotrices tenía su propia norma para los requisitos del sistema de calidad.

A los proveedores Tier I (grupo I) se les ha requerido que obtengan registro de terceros en la QS 9000 antes de las fechas establecidas por cada una de las tres grandes compañías. Con mucha frecuencia, se ha descrito a la QS 9000 como un "chasis ISO 9000 con muchos extras". Ésta es una buena descripción, si se tiene en cuenta que todas las cláusulas de la ISO 9000 sirven como cimiento de la QS 9000. Sin embargo, los pequeños "extras" son fundamentales.

La edición de febrero de 1995 de la QS 9000 tiene tres secciones. La sección I contiene las 20 cláusulas en su totalidad de la ISO 9001, pero casi cada una tiene requisitos adicionales para la QS 9000. La sección II cuenta con tres secciones: Proceso de Aprobación de las Partes de Producción, Mejora Continua y Capacidades de Manufactura. La sección III se titula Requisitos Específicos del Cliente y contiene secciones separadas para Chrysler, General Motors, Ford y los fabricantes de camiones, respectivamente. Los registros existentes de QS 9000 se actualizan de manera continua para satisfacer las nuevas ediciones de la norma.

36.6.3 La norma ISO 14000

ISO 14000 es una familia de normas que se publicaron por primera vez en septiembre de 1996 y se refieren a los **Sistemas de Administración Ambiental** (EMS, por sus siglas en inglés). Trata de la forma en que las actividades de una organización afectan el ambiente durante la vida de sus productos (ver también la sección I.6 de la Introducción General). Estas actividades (*a*) pueden ser internas o externas a la organización; (*b*) van desde la producción hasta la disposición final del producto después de su vida útil, y (*c*) incluyen efectos en el ambiente, como contaminación, generación y disposición de desechos, ruido, disminución de los recursos naturales y uso de la energía.

Un número de compañías que crece con rapidez en muchos países (con Japón a la cabeza) han venido obteniendo certificación para esta norma. La familia de normas ISO

14000 tiene varias secciones: Lineamientos para la Auditoría Ambiental, Evaluación Ambiental, Etiquetas y Declaraciones Ambientales, y Administración Ambiental. ISO 14001: *Requisitos del Sistema de Administración Ambiental*, consta de las secciones sobre Requisitos Generales, Política Ambiental, Planeación, Implantación y Operación, Verificación y Acción Correctiva, y Revisión de la Administración.

36.7 Métodos estadísticos de control de calidad

Debido a las numerosas variables comprendidas en los procesos y operaciones de manufactura, es fundamental implantar *técnicas estadísticas*. Las siguientes son algunas de las variables que se observan comúnmente en la manufactura:

- Las herramientas de corte, matrices o dados y moldes están sujetos a desgaste. Por lo tanto, las dimensiones y características de la superficie de las partes varía con el tiempo.
- La maquinaría funciona de manera diferente dependiendo de su calidad, edad, condiciones y mantenimiento. Por ello, las máquinas más viejas tienden a vibrar, es difícil ajustarlas y no mantienen las tolerancias tan bien como las nuevas.
- Los fluidos para trabajo de los metales se comportan de manera diferente cuando se degradan. Por lo tanto, afectan la vida útil de los herramentales y las matrices, el acabado superficial de la pieza de trabajo y los requerimientos de fuerza y energía.
- Las condiciones ambientales (como la temperatura, humedad y calidad del aire en la planta) pueden cambiar de una hora a la otra, afectando las máquinas, los espacios de trabajo y a los empleados.
- Los diferentes embarques de materias primas a una planta pueden tener dimensiones, propiedades y características superficiales significativamente diferentes.
- La habilidad y la atención del operario pueden variar durante el día, de máquina a máquina, o de operario a operario.

En esta lista, los eventos que ocurren al azar, esto es, sin alguna tendencia o patrón en particular, se llaman **variaciones aleatorias** o **causa especial**. A los eventos que se pueden rastrear hasta causas específicas se les llama **variaciones asignables** o **causa común**.

La existencia de la *variabilidad* en las operaciones de producción se ha reconocido por siglos, pero fue Eli Whitney (1765-1825) quien entendió primero su pleno significado, cuando encontró que las partes intercambiables eran indispensables para producir armas de fuego en masa. Los conceptos estadísticos modernos correspondientes a la ingeniería de manufactura se desarrollaron por primera vez a principios del siglo XX, de manera notable mediante el trabajo de W. A. Shewhart (1891-1967).

36.7.1 Control estadístico de la calidad

Para entender el **control estadístico de la calidad** (SQC, por sus siglas en inglés), revisemos primero los términos que se utilizan comúnmente.

- **Tamaño de la muestra:** número de partes a inspeccionar en una muestra. Se estudian las propiedades de las partes en la muestra para obtener información acerca de la población completa.
- **Muestreo aleatorio:** toma de una muestra de una población o de un lote, en la que cada artículo tiene la misma oportunidad de ser incluido en la muestra. Por lo tanto, al tomar muestras de un recipiente grande, el inspector no debe tomar sólo aquellas que estén al alcance.
- **Población:** número total de partes individuales del mismo diseño, de donde se toman las muestras; también llamado **universo**.

- **Tamaño del lote:** subconjunto de una población. Un lote o varios lotes se pueden considerar subconjuntos de la población y representativos de ella.

La muestra se inspecciona revisando varias características y rasgos (como tolerancias, acabado superficial y defectos) utilizando los instrumentos y las técnicas descritas en el capítulo 35 y en las secciones 36.10 y 36.11. Estas características caen dentro de dos categorías: las que se pueden medir de modo cuantitativo (método de variables) y las que se miden en forma cualitativa (método de atributos).

1. El **método de variables** es la *medición cuantitativa* de las características de la parte, como dimensiones, tolerancias, acabado superficial y propiedades físicas o mecánicas. Las mediciones se realizan para cada una de las unidades en el grupo en consideración y los resultados se comparan contra las especificaciones.
2. El **método de atributos** comprende la observación de la presencia o ausencia de *características cualitativas* (como defectos externos o internos en las partes maquinadas, formadas o soldadas, o muescas en los productos de hojas metálicas) en cada una de las unidades del grupo en consideración. En general, el tamaño de las muestras para datos del tipo atributos es mayor que para los datos tipo variables.

Durante el proceso de inspección, los resultados de la medición varían. Por ejemplo, suponga que está midiendo el diámetro de ejes torneadas conforme se producen en un torno utilizando un micrómetro (fig. 35.2). Pronto notará que su diámetro varía, aunque (idealmente) desee que todos los ejes sean exactamente del mismo tamaño. Ahora volvamos a la consideración de las técnicas de control estadístico de la calidad, lo que nos permite evaluar estas variaciones y establecer límites para la aceptación de las partes.

Si lista los diámetros medidos de los ejes torneados en una población dada, notará que una o más partes tienen el diámetro más pequeño y que una o más lo tienen más grande. El resto de los ejes torneados poseen diámetros que se encuentran entre estos dos extremos.

Si se agrupan y grafican estos diámetros, la gráfica consiste en un *histograma* (gráfica de barras) que representa el número de partes en cada grupo de diámetros (fig. 36.3a). Las barras muestran una **distribución** (también conocida como *amplitud* o *dispersión*) de las medidas de los diámetros de los ejes. A la *curva con forma de campana* de la figura 36.3a se le llama **distribución de frecuencias** y es la frecuencia con que las partes de cada tamaño de diámetro se están produciendo.

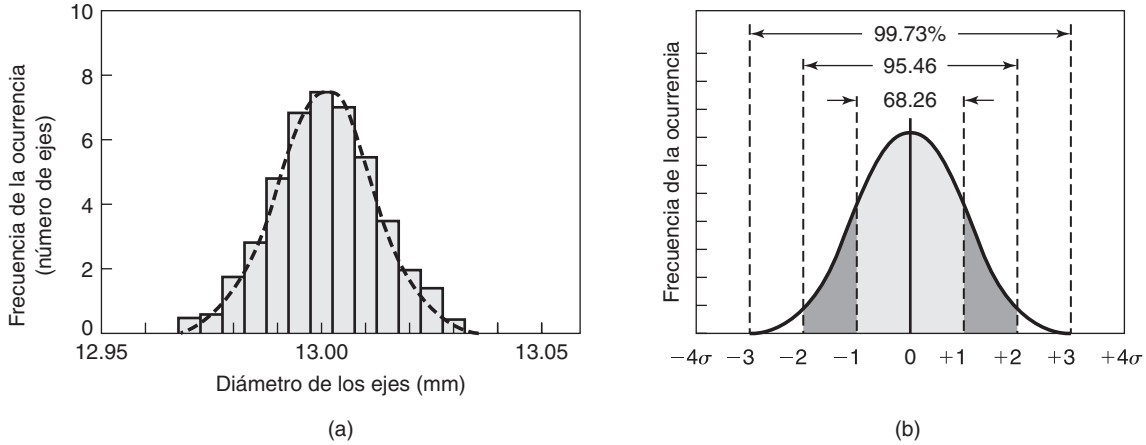


FIGURA 36.3 *(a)* Histograma del número de ejes medidos y sus diámetros respectivos. A este tipo de curva se le llama distribución de frecuencias. *(b)* Curva de distribución normal indicando las áreas dentro de cada rango de desviación estándar. Nota: Cuanto mayor es el rango, mayor será el porcentaje de partes que caen dentro de él.

Con frecuencia, los datos de los procesos de manufactura se ajustan a curvas representadas por una **curva de distribución normal** derivada matemáticamente (fig. 36.3b). A este tipo de curva también se le llama *Gaussiana*, en honor de K. F. Gauss (1777-1855), quien la desarrolló con base en las probabilidades. La curva de distribución normal con forma de campana ajustada a los datos en la figura 36.3a tiene dos características importantes.

Primero, muestra que la mayoría de los diámetros de las partes tienden a agruparse alrededor de un *valor promedio* (**media aritmética**). Por lo común, este promedio se designa como $\bar{x}$ y se calcula a partir de la expresión:

$$\bar{x} = \frac{(x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_n)}{n} \tag{36.3}$$

donde el numerador es la suma de todos los valores medidos (diámetros de las flechas) y n es el número de mediciones (número de flechas).

La segunda característica de esta curva es su anchura, que indica la **dispersión** de los diámetros medidos; cuanto más ancha sea la curva, mayor será la dispersión. La diferencia entre el valor más grande y el más pequeño se llama **rango**, R:

$$R = x_{\text{máx}} - x_{\text{mín}} \tag{36.4}$$

La dispersión se estima mediante la **desviación estándar**, σ, y está dada por la expresión:

$$\sigma = \frac{\sqrt{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \cdots + (x_n - \bar{x})^2}}{n - 1} \tag{36.5}$$

donde x_i es el valor medido para cada parte.

Obsérvese en el numerador de la ecuación 36.5 que, al ensancharse la curva, la desviación estándar se vuelve mayor. También nótese que σ tiene la unidad de la dimensión lineal. Al comparar las ecuaciones 36.4 y 36.5, se puede ver que el rango, R, es una medida más simple y conveniente de dispersión.

Debido a que ahora sabemos el número de partes torneadas que caen dentro de cada grupo, podemos calcular el porcentaje de la población total representada por cada grupo. Entonces, en la figura 36.3b se muestra que, al medir los diámetros de los ejes,

99.73% caen dentro del rango de $\pm 3\sigma$
95.46% caen dentro del rango de $\pm 2\sigma$
68.26% caen dentro del rango de $\pm 1\sigma$

Se puede ver que sólo 0.27% cae fuera del rango de $\pm 3\sigma$. Esto significa que existen 2700 partes defectuosas en cada millón de partes producidas. En la manufactura moderna esto sería un índice inaceptable, en vista de la observación de que a este nivel de defectos ninguna computadora moderna funcionaría de manera confiable. Sin embargo, obsérvese que estas cantidades sólo son válidas para distribuciones que son normales (como la mostrada en la fig. 36.3) y no están sesgadas.

36.7.2 Seis sigma (*Six sigma*)

Una norma de calidad cuya práctica se está ampliando de manera creciente es el requisito **seis sigma**. Implantado inicialmente por Motorola en la década de 1980, este concepto se refiere al rango de la distribución de la manufactura. Seis sigma significa que sólo existen 3.4 partes defectuosas por millón de partes de cada lado de la distribución (o un total de 6.8 partes por millón). Debido a la naturaleza de las distribuciones estadísticas, esto fuerza de manera tácita las mejoras en la capacidad del proceso para reducir la variabilidad. El concepto seis sigma también se ha extendido a los procesos y las operaciones de negocios y oficinas.

36.8 Control estadístico de proceso

Si el número de partes que no cumple las normas establecidas (partes defectuosas) aumenta durante una corrida de producción, debemos ser capaces de determinar la causa (materiales de entrada, controles de las máquinas, degradación de los fluidos de trabajo de los metales, aburrimiento del operario u otros factores) y emprender la acción apropiada. Aunque al principio esta declaración parece ser evidente, no fue sino hasta principios de la década de 1950 cuando se desarrolló un método estadístico sistemático para guiar a los operarios en las plantas manufactureras.

Este método aconseja al operario tomar ciertas medidas y acciones y le dice cuándo hacerlo para evitar producir más partes defectuosas. Conocido como **control estadístico de proceso** (SPC, por sus siglas en inglés), consta de diversos elementos:

- Tablas y límites de control.
- Capacidades del proceso particular de manufactura.
- Características de la maquinaria involucrada.

36.8.1 Tablas $\bar{x}$ y R (tablas de control de Shewhart)

La curva de distribución de frecuencias en la figura 36.3b muestra un rango de diámetros de ejes que se están produciendo y que pueden caer fuera del rango de tolerancia de diseño. En la figura 36.4 se muestra la misma curva con forma de campana, que ahora incluye las tolerancias especificadas para el diámetro de los ejes torneados.

Las **tablas de control** representan de manera gráfica las variaciones de un proceso para un periodo. Consisten en datos graficados durante la producción. Por lo común, existen dos gráficas. La cantidad $\bar{x}$ (fig. 36.5a) es el promedio para cada subconjunto de muestras tomadas e inspeccionadas, digamos, un subconjunto que consta de cinco partes. Un tamaño de muestra de dos a 10 partes es lo suficientemente preciso (aunque son mejores más partes), en la inteligencia de que el tamaño de la muestra se mantiene constante durante la inspección.

La frecuencia del muestreo depende de la naturaleza del proceso. Algunos procesos pueden requerir muestreo continuo, mientras que otros sólo una muestra al día. Los analistas de control de calidad son los mejor calificados para determinar esta frecuencia para una operación particular. Debido a que las mediciones en la figura 36.5a se efectúan de manera consecutiva, la abscisa de las tablas de control también representa el tiempo.

La línea continua horizontal en esta figura es el **promedio de promedios** (**promedio general**), que se denota por $\bar{\bar{x}}$ y representa la media de la población. Las líneas discontinuas horizontales superior e inferior en estas tablas de control indican los **límites de control**

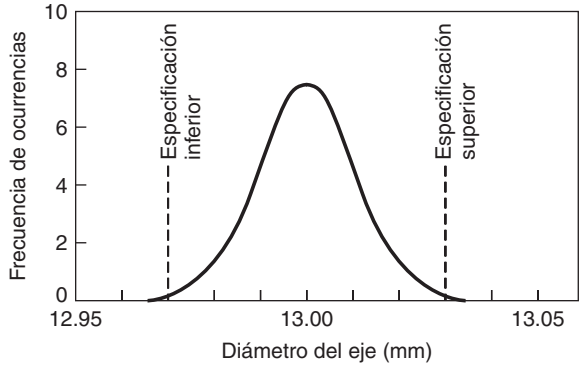


FIGURA 36.4 Curva de distribución de frecuencias que muestra los límites inferior y superior de las especificaciones.

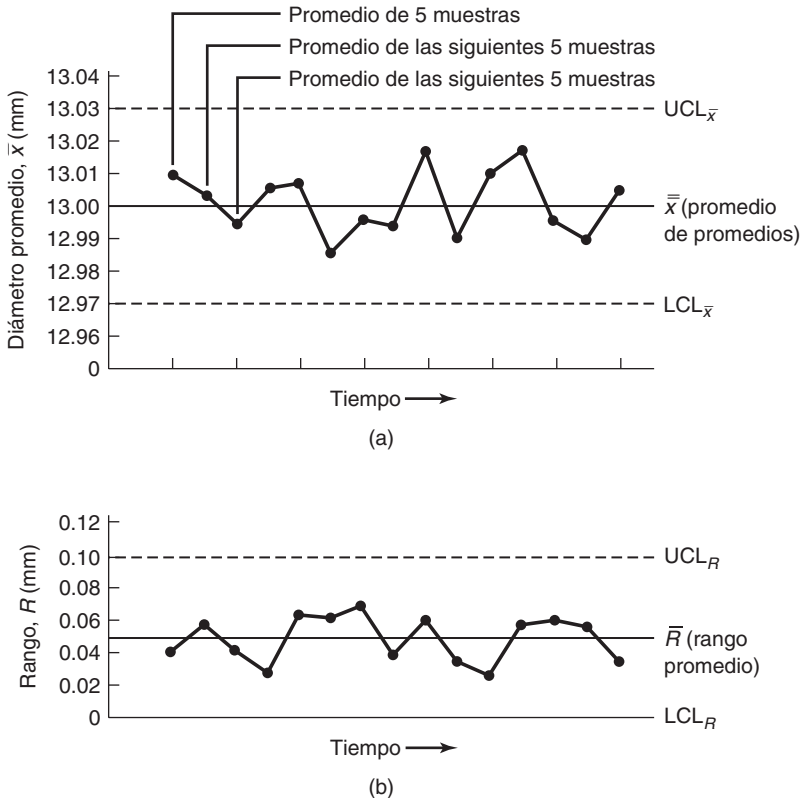


FIGURA 36.5 Tablas de control utilizadas en el control estadístico de la calidad. El proceso mostrado se encuentra bajo buen control estadístico porque todos los puntos caen dentro de los límites inferior y superior de control. En esta ilustración, el tamaño de la muestra es 5, y el número de muestras es 15.

para el proceso. Los límites de control se establecen en estas tablas de acuerdo con las fórmulas de control estadístico diseñadas para mantener la producción real dentro de niveles aceptables de variación. Un método común consiste en asegurarse de que todas las partes se encuentran dentro de tres desviaciones estándar de la media $(\pm 3\sigma)$.

La desviación estándar también se puede expresar como una función del rango. Por lo tanto, para $\bar{x}$, tenemos:

$$\text{Límite superior de control } (\text{UCL}_{\bar{x}}) = \bar{x} + 3\sigma = \bar{\bar{x}} + A_2\bar{R} \qquad (36.6)$$

y

$$\text{Límite inferior de control } (\text{LCL}_{\bar{x}}) = \bar{x} - 3\sigma = \bar{\bar{x}} - A_2\bar{R} \qquad (36.7)$$

donde A_2 se obtiene de la tabla 36.3 y $\bar{R}$ es el promedio de los valores de R. Las cantidades $\bar{\bar{x}}$ y $\bar{R}$ se estiman a partir de las mediciones efectuadas.

Estos límites de control se calculan con base en la capacidad anterior de producción del propio equipo; no están asociados ni con las especificaciones de las tolerancias de diseño ni con las dimensiones. Indican los límites dentro de los cuales se espera que caiga cierto porcentaje de valores medidos, debido a las variaciones inherentes en el propio proceso, sobre el que se basan los límites.

La principal meta del control estadístico de procesos consiste en mejorar el proceso de manufactura con la ayuda de tablas de control, a fin de eliminar las causas asignables. La tabla de control indica el avance en esta área de manera continua.

TABLA 36.3

Constantes para las tablas de control

Tamaño de la muestra	A_2	D_4	D_3	d_2
2	1.880	3.267	0	1.128
3	1.023	2.575	0	1.693
4	0.729	2.282	0	2.059
5	0.577	2.115	0	2.326
6	0.483	2.004	0	2.534
7	0.419	1.924	0.078	2.704
8	0.373	1.864	0.136	2.847
9	0.337	1.816	0.184	2.970
10	0.308	1.777	0.223	3.078
12	0.266	1.716	0.284	3.258
15	0.223	1.652	0.348	3.472
20	0.180	1.586	0.414	3.735

La segunda tabla de control (fig. 36.5b) muestra el rango, R, en cada subconjunto de muestras. La línea continua horizontal representa el promedio de los valores de R en el lote, que se denota como $\overline{R}$ y es la medida de la variabilidad de las muestras. Los límites de control superior e inferior para R se obtienen de las ecuaciones:

$$\text{UCL}_R = D_4\overline{R} \tag{36.8}$$

y

$$\text{LCL}_R = D_3\overline{R} \tag{36.9}$$

donde las constantes D_4 y D_3 toman los valores dados en la tabla 36.3. Esta tabla incluye también la constante d_2, que se utiliza para estimar la desviación estándar de la distribución del proceso mostrada en la figura 36.4 a partir de la ecuación:

$$\sigma = \frac{\overline{R}}{d_2} \tag{36.10}$$

Cuando la curva de la tabla de control es como la que aparece en la figura 36.5a, se dice que el proceso tiene *un buen control estadístico*. En otras palabras:

- No existe tendencia notable en el patrón de la curva.
- Los puntos (valores medidos) son aleatorios respecto del tiempo.
- Los puntos no exceden los límites de control.

Sin embargo, podemos ver que existen ciertas *tendencias* en las curvas, como las de la figura 36.6a, b y c. Por ejemplo, obsérvese en la mitad de la curva (*a*) que el diámetro de los ejes se incrementa con el tiempo. La razón de este incremento puede ser un cambio en una de las variables del proceso, como el desgaste de la herramienta de corte.

Si la tendencia es consistente hacia diámetros mayores, como en la curva (*b*), condiámetros rondando alrededor del límite de control superior, podría significar que los ajustes de las herramientas en el torno pueden ser incorrectos y la consecuencia sería que las partes que se están torneando son demasiado grandes de manera consistente. La curva (*c*) muestra las dos tendencias distintas que pueden provocar factores como un cambio en las propiedades del material inicial o un cambio en el desempeño del fluido de corte (por ejemplo, su degradación). Estas situaciones colocan el proceso *fuera de control*. Algunas veces se establecen límites de advertencia en $\pm 2\sigma$ para este efecto.

El análisis de los patrones y tendencias en las tablas de control requiere experiencia considerable para poder identificar la(s) causa(s) específica(s) de la falta de control. Dichas causas pueden ser las variables indicadas al inicio de la sección 36.7. Un control excesivo

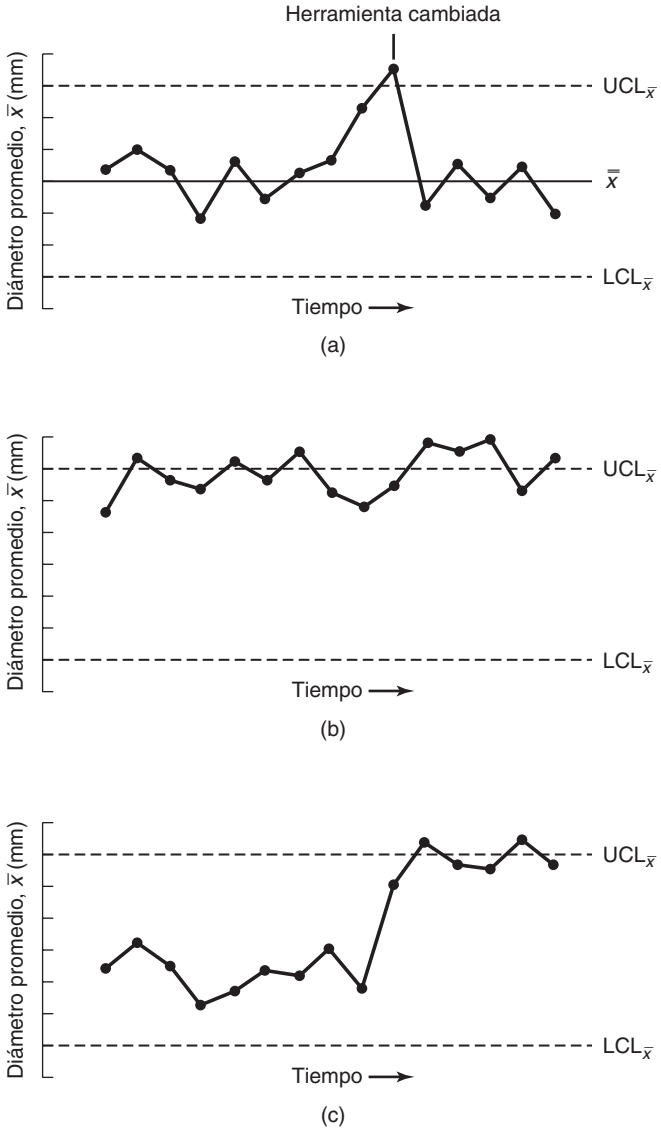


FIGURA 36.6 Tablas de control. *(a)* El progreso empieza a salirse de control debido a factores como el desgaste de la herramienta (*desviación*). Se cambia la herramienta y después el proceso se encuentra bajo control estadístico. *(b)* Los parámetros del proceso no se han establecido apropiadamente; por lo tanto, todas las partes se encuentran alrededor del límite superior de control (*desviación de la media*). *(c)* El proceso se sale de control debido a factores como un cambio en las propiedades del material de alimentación (*cambio en la media*).

del proceso de manufactura (esto es, estableciendo los límites superior e inferior de control demasiado cerca uno del otro, con un rango de desviación estándar más pequeño como consecuencia) es un caso adicional para las situaciones fuera de control. Ésta es la razón por la que los límites de control se calculan con base en la *variabilidad del proceso*, más que en criterios potencialmente inaplicables.

Es evidente que la capacitación del operario es crítica para implantar exitosamente el SPC en los talleres. Una vez que se establecen los lineamientos de control en busca de la eficiencia de la operación, los operarios también deben tener parte de la responsabilidad

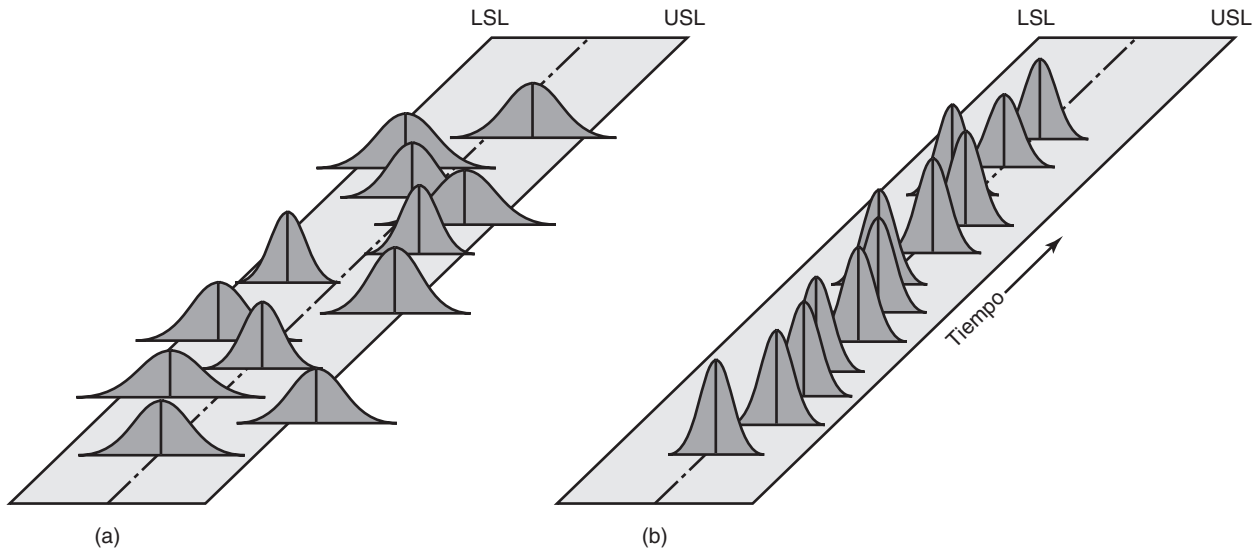


FIGURA 36.7 Ilustración de procesos que son: *(a)* inestables o fuera de control, y *(b)* estables o en control. Obsérvese en el diagrama *(b)* que todas las distribuciones tienen menores desviaciones estándar y medias más cercanas al valor deseado. *Fuente*: K. Crow.

de hacer ajustes en los procesos de producción que están comenzando a salirse de control. Deben tenerse en cuenta además las habilidades individuales de los operarios para que no se sobrecarguen con la alimentación de datos y obtener una interpretación apropiada de los mismos.

En la actualidad esta tarea es más sencilla debido a la disponibilidad de software. Por ejemplo, ahora existen indicadores digitales en los dispositivos electrónicos de medición, directamente integrados en un sistema de cómputo para obtener un SPC en tiempo real. En la figura 35.2 se muestra un sistema de cómputo de funciones múltiples como el indicado, en el que la salida de un calibrador digital o micrómetro se analiza mediante un microprocesador en tiempo real y se muestra de varias maneras, como curvas de distribución de frecuencias y tablas de control.

36.8.2 Capacidad del proceso

La *capacidad del proceso* se define como la habilidad de un proceso para generar productos sin defectos en una producción controlada. Ésta nos dice que el proceso de manufactura puede producir partes de manera consistente y reiterada dentro de límites específicos de precisión (fig. 36.7). Se utilizan diversos indicadores (índices) para determinar la capacidad del proceso, que describen la relación entre la variabilidad del mismo y la dispersión de los límites de las especificaciones inferior y superior. Debido a que un proceso de manufactura comprende materiales, maquinaria y operarios, se puede analizar cada factor en lo individual para identificar un problema cuando las capacidades del proceso no satisfacen los límites de las especificaciones. Entre los diversos factores a considerar se encuentran las variaciones en el desempeño de la máquina, las habilidades del operario y las materias primas iniciales.

EJEMPLO 36.3 Cálculo de los límites de control y de la desviación estándar

Los datos ofrecidos en la tabla 36.4 muestran mediciones de longitud (pulgadas) tomadas en una pieza de trabajo maquinada. El tamaño de la muestra es 5 y el número de muestras es 10; por lo tanto, el número total de partes medidas es 50. La cantidad $\overline{x}$ es el promedio de cinco mediciones en cada muestra.

TABLA 36.4

Número de muestras	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	$\bar{x}$	R
1	4.46	4.40	4.44	4.46	4.43	4.438	0.06
2	4.45	4.43	4.47	4.39	4.40	4.428	0.08
3	4.38	4.48	4.42	4.42	4.35	4.410	0.13
4	4.42	4.44	4.53	4.49	4.35	4.446	0.18
5	4.42	4.45	4.43	4.44	4.41	4.430	0.04
6	4.44	4.45	4.44	4.39	4.40	4.424	0.06
7	4.39	4.41	4.42	4.46	4.47	4.430	0.08
8	4.45	4.41	4.43	4.41	4.50	4.440	0.09
9	4.44	4.46	4.30	4.38	4.49	4.414	0.19
10	4.42	4.43	4.37	4.47	4.49	4.436	0.12

Solución Primero calculamos el promedio de promedios, $\bar{\bar{x}}$,

$$\bar{\bar{x}} = \frac{44.296}{10} = 4.430 \text{ pulgadas}$$

y el promedio de los valores de R,

$$\bar{R} = \frac{1.03}{10} = 0.103 \text{ pulgadas}$$

Como el tamaño de la muestra es 5, determinamos las siguientes constantes a partir de la tabla 36.3: $A_2 = 0.577$, $D_4 = 2.115$, y $D_3 = 0$. Ahora se pueden calcular los límites utilizando las ecuaciones 36.4 a 36.7. Entonces, para los promedios:

$$\text{UCL}_{\bar{x}} = 4.430 + (0.577)(0.103) = 4.489 \text{ pulgadas}$$

$$\text{UCL}_{\bar{x}} = 4.430 + (0.577)(0.103) = 4.371 \text{ pulgadas}$$

Y para los rangos:

$$\text{UCL}_R = (2.115)(0.103) = 0.218 \text{ pulgadas}$$

$$\text{LCL}_R = (0)(0.103) = 0 \text{ pulgadas}$$

Ahora podemos estimar la desviación estándar para los individuos de la población del proceso utilizando la ecuación 36.10 y para un valor de $d_2 = 2.326$. Entonces:

$$\sigma = \frac{0.103}{2.326} = 0.044 \text{ pulgadas}$$

ESTUDIO DE CASO 36.2 Control dimensional de partes de plástico en los automóviles Saturn

Un automóvil Saturn común tiene alrededor de 38 partes de plástico (policarbonato, polipropileno y ABS) diferentes moldeadas por inyección, como tableros de puertas, ductos de entrada de aire, consolas y guardafangos. Todas deben conformarse a tolerancias dimensionales estrechas para que se ajusten y monten apropiadamente durante el ensamble, sin separaciones o pandeos visibles.

Sin embargo, las dimensiones de estas partes plásticas cambian con la temperatura y la humedad, y debido a su flexibilidad, tienden a doblarse y curvarse. Por esta razón, puede ser difícil medir e inspeccionar las partes de plástico (incluyendo el uso de máquinas de medición de coordenadas (CMM; ver sección 35.5.1). Aunque también se utilizan calibradores tradicionales para supervisar los parámetros del proceso al

fabricar estas partes, se ha desarrollado un sistema de inspección superior en donde se recibe retroalimentación del SPC desde un CMM de control directo por computadora para que se puedan moldear en forma apropiada.

El sistema compensa la flexibilidad de las partes, permite medirles en forma automática diversas características y realiza mediciones del molde a intervalos periódicos. Los datos se analizan de manera regular, y cuando es necesario, se toman acciones correctivas y se realizan cambios en los materiales, procesamiento o diseño del molde, a fin de que las partes que se están moldeando mantengan una buena estabilidad dimensional.

Fuente: Cortesía de Saturn Corp. y *Manufacturing Engineering*.

36.8.3 Muestreo de aceptación y control

El *muestreo de aceptación* consiste en tomar algunas muestras aleatorias de un lote e inspeccionarlas para juzgar si todo el lote es aceptable o si debe rechazarse o trabajarse de nuevo. Desarrollado en la década de 1920 y utilizado ampliamente durante la Segunda Guerra Mundial para equipo militar (norma MIL STD 105 en Estados Unidos), esta técnica estadística se usa con amplitud y se ha vuelto valiosa. El muestreo de aceptación es útil en particular para inspeccionar partes de grandes capacidades de producción, donde una inspección al 100% sería muy costosa. Sin embargo, existen algunos dispositivos críticos, como marcapasos, dispositivos prostéticos y componentes del transbordador espacial, que deben inspeccionarse en su totalidad.

Se han elaborado varios planes de muestreo de aceptación, tanto para normas militares como civiles, con base en un porcentaje aceptable, predeterminado y limitado de partes en la muestra que no cumplen la norma. Si se excede este porcentaje, se rechaza todo el lote o se trabaja de nuevo si es económicamente viable. Obsérvese que el número real de muestras (aunque no los porcentajes del lote que se encuentran en la muestra) puede ser significativo en el muestreo de aceptación.

Cuanto mayor sea el número de muestras tomadas de un lote, mayor será la posibilidad de que la muestra contenga partes que no cumplan la norma, y menor la probabilidad de aceptación del lote. La **probabilidad** se define como la ocurrencia relativa de un evento. La probabilidad de aceptación se obtiene de diversas curvas características de operación, un ejemplo de las cuales se muestra en la figura 36.8.

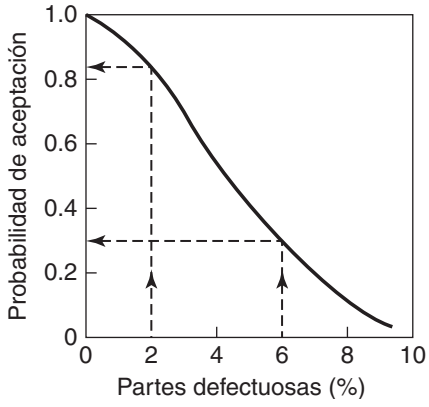


FIGURA 36.8 Curva típica de características de operación utilizada en el muestreo de aceptación. Cuanto mayor sea el porcentaje de partes defectuosas, menor será la probabilidad de aceptación por parte del consumidor.

Comúnmente, el **nivel de calidad de aceptación** (AQL, por sus siglas en inglés) se define como el nivel al cual existe una probabilidad de 95% de aceptación para el lote. Este porcentaje indica al fabricante que 5% de las partes en el lote pueden ser rechazadas por el consumidor (**riesgo del productor**). De manera similar, el consumidor sabe que 95% de las partes son aceptables (**riesgo del consumidor**).

El fabricante puede salvar los lotes que no satisfacen las normas de calidad deseadas mediante una inspección secundaria de rectificación. En este método, se realiza una inspección de 100% al lote rechazado y se retiran las partes defectuosas. Este laborioso y costoso proceso es un incentivo para que el fabricante controle mejor el proceso de producción.

El muestreo de aceptación requiere menos tiempo y menos inspecciones que otros métodos de muestreo. En consecuencia, la inspección de las partes puede ser más detallada. Se han desarrollado técnicas de inspección automatizada para hacer posible un 100% de inspección de todas las partes y para que esta inspección sea económica.

36.9 Confiabilidad de productos y procesos

Finalmente, todos los productos fallan de una manera u otra: los neumáticos para automóviles se desgastan y las roscas se alisan, los motores eléctricos se queman, los calentadores de agua comienzan a tener fugas, los dados y las herramientas de corte se desgastan y la maquinaria deja de funcionar en forma apropiada. La **confiabilidad del producto** se puede definir como la probabilidad de que un producto realice, mientras el consumidor lo usa normalmente y no falla, la función para la que está destinado en un ambiente dado y por un periodo especificado.

Cuanto más crítica sea la aplicación de un producto en particular, mayor deberá ser su confiabilidad. Por ende, la confiabilidad del motor de propulsión de una aeronave, un instrumento médico o el cable de un elevador, debe ser mucho mayor que la de un grifo en una cocina o un lápiz mecánico. De los temas descritos en este capítulo, se puede ver que al aumentar la calidad de cada componente de un producto, también lo hace la confiabilidad de todo el producto.

Para una cadena ordinaria de acero, la confiabilidad de cada uno de sus eslabones es crítica. También es crítica la confiabilidad de cada engrane en un tren de engranes para una máquina o para un automóvil. A esta condición se le conoce como *confiabilidad en serie*. En cambio, para un cable que consta de varios alambres individuales la confiabilidad de cada cable individual no es crítica, porque el cable consta de varios alambres. A esta condición se le conoce como *confiabilidad en paralelo*. Este concepto es importante en el diseño de los sistemas de respaldo porque permite a un producto continuar funcionando en caso de que falle uno de sus componentes. Los sistemas eléctricos o hidráulicos en una aeronave, por ejemplo, en general se encuentran respaldados por sistemas mecánicos; a dichos sistemas se les llama *sistemas redundantes*.

La predicción de la confiabilidad es una ciencia importante y comprende relaciones y cálculos matemáticos complejos. La importancia de predecir la confiabilidad de los componentes críticos de una aeronave civil o militar es obvia. También es fundamental la confiabilidad de una línea de producción de alta velocidad, automatizada y controlada por computadora, con todos sus complejos componentes mecánicos y electrónicos, ya que su falla podría provocar pérdidas económicas importantes al fabricante.

La **confiabilidad del proceso** se puede definir como la capacidad de un proceso de manufactura particular para operar en forma predecible y sin problemas durante un periodo. Esto implica que no habrá deterioro en el desempeño, que de otra manera requeriría paros en las máquinas, interrupción de la producción y provocaría pérdida económica.

36.10 Ensayos no destructivos

Los *ensayos no destructivos* (NDT, por sus siglas en inglés) se efectúan de manera que la integridad del producto y la textura superficial permanezcan sin cambios. Estas técnicas suelen requerir una habilidad considerable del operario y tal vez sea difícil interpretar los resultados de las pruebas con precisión, debido a que las observaciones pueden ser subjetivas. Sin embargo, el uso de gráficas de computadora y otras técnicas de mejoramiento ha reducido de manera considerable la posibilidad de error humano. Los sistemas actuales tienen diversas capacidades de adquisición de datos y de inspección y análisis cualitativo y cuantitativo.

A continuación se señalan los principios básicos de las técnicas principales de ensayos no destructivos.

Líquidos penetrantes. En esta técnica se aplican fluidos a las superficies de la parte para que penetren en grietas, costuras y poros (fig. 36.9). Por la acción de capilaridad, el penetrante puede introducirse en grietas hasta 0.1 μm (4 μpulg) de anchura. Dos tipos comunes de líquidos utilizados para esta prueba son (*a*) los *penetrantes fluorescentes* con diversas sensibilidades, con fluorescencia bajo luz ultravioleta, y (*b*) los *penetrantes visibles* que utilizan tinturas (por lo común de color rojo), que aparecen como líneas brillantes en la superficie de trabajo.

Este método se puede utilizar para detectar varios defectos superficiales. El equipo es simple y de uso sencillo, puede ser portátil y su operación es menos costosa que la de otros métodos. Sin embargo, sólo puede detectar defectos que se encuentran abiertos a la superficie o que son externos.

Inspección mediante partículas magnéticas. Esta técnica consiste en colocar partículas ferromagnéticas finas en la superficie de la parte. Las partículas se pueden aplicar en seco o con un portador líquido, como agua o aceite. Cuando se magnetizan con un campo magnético, la discontinuidad (defecto) sobre la superficie hace que las partículas se reúnan visiblemente alrededor del defecto (fig. 36.10).

Entonces, el defecto se convierte en un magneto, debido a las fugas de flujo donde el defecto interrumpe las líneas del campo magnético. Esto, a su vez, crea un par de polos *N-S* a pequeña escala en cualquier lado del defecto conforme las líneas del campo salen de la superficie. Por lo general, las partículas toman la forma y el tamaño del defecto. Los defectos debajo de la superficie también se pueden detectar mediante este método, siempre que no sean profundos. Es posible colorear las partículas magnéticas con pigmentos para mejorar la visibilidad sobre superficies metálicas.

Los campos magnéticos también se pueden generar con corriente directa o alterna, utilizando yugos, barras y bobinas. La mejor manera de detectar los defectos debajo de

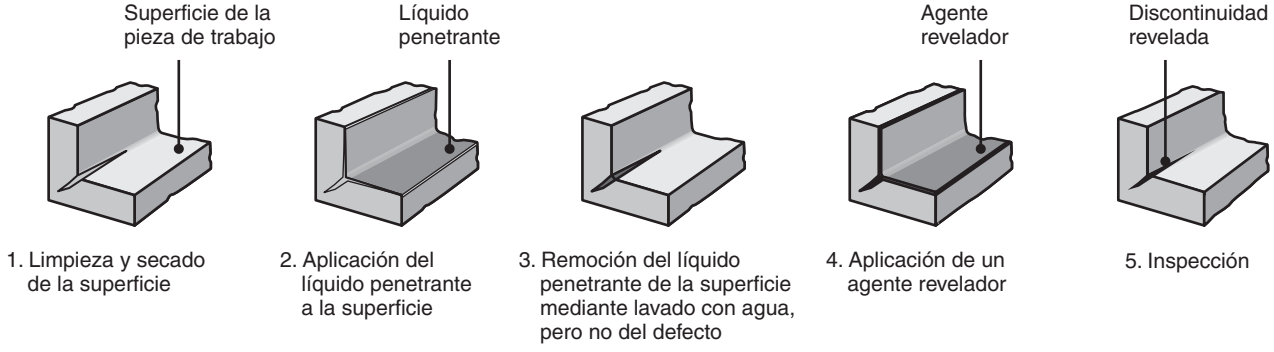


FIGURA 36.9 Secuencia de operaciones para la inspección de líquido penetrante a fin de detectar la presencia de grietas y otros defectos en una pieza de trabajo. *Fuente:* ASM International.

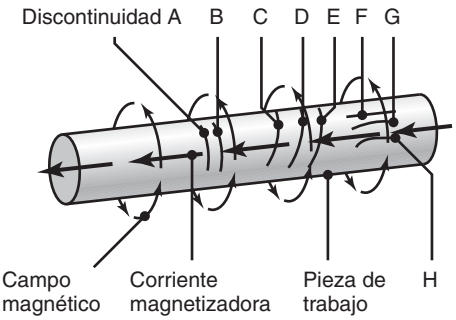


FIGURA 36.10 Esquema de la inspección por partículas magnéticas de una parte con un defecto en ella. Las grietas que se encuentran en dirección paralela al campo magnético (como en A) no se detectarían, mientras que las otras sí lo serían. Las grietas F, G y H son las más fáciles de detectar. *Fuente:* ASM International.

la superficie es con corriente directa. El método de las partículas magnéticas sólo se puede utilizar con materiales ferromagnéticos, pero las partes pueden desmagnetizarse y limpiarse después de la inspección. El equipo sería portátil o estacionario.

Inspección ultrasónica. En esta técnica, una onda ultrasónica viaja a través de la parte. Los defectos internos (como las grietas) interrumpen la onda y reflejan parte de la energía ultrasónica. La amplitud de la energía reflejada y el tiempo requerido para su retorno indican la presencia y ubicación de cualquier defecto en la pieza de trabajo.

Las ondas ultrasónicas se generan mediante transductores (llamados *unidades de búsqueda* o *sondas*), disponibles en diversos tipos y tamaños. Los transductores funcionan con base en el principio de la *piezoelectricidad* (ver sección 3.7) utilizando materiales como cuarzo, sulfato de litio o diversos materiales cerámicos. La mayoría de las inspecciones se realizan en un intervalo de frecuencias de 1 a 25 MHz. Para transmitir las ondas ultrasónicas del transductor a la pieza de prueba se utilizan acopladores; los más comunes son agua, aceite, glicerina y grasa.

El método de inspección ultrasónica tiene gran poder de penetración y sensibilidad. Se puede utilizar desde diversas direcciones para inspeccionar defectos en partes grandes, como en ruedas de ferrocarril, recipientes a presión y portamatrices. Este método requiere personal con experiencia para conducir la inspección de manera apropiada e interpretar correctamente los resultados.

Métodos acústicos. La *técnica de emisión acústica* detecta señales (ondas de esfuerzo de alta frecuencia) generadas por la propia pieza de trabajo durante la deformación plástica, la iniciación y propagación de grietas, la transformación de fase y la reorientación abrupta de los límites de grano. La formación de burbujas durante la ebullición de un líquido y la fricción y el desgaste de las interfaces deslizantes son otras fuentes de señales acústicas (ver también la sección 21.5.4).

La inspección por emisión acústica suele realizarse aplicando esfuerzos elásticos a la parte o estructura, como doblando una viga, aplicando torque a una flecha o presurizando internamente un recipiente. Por lo general, los sensores consisten en elementos cerámicos piezoeléctricos que detectan emisiones acústicas. Este método es muy efectivo para inspección continua de estructuras que soportan cargas.

La **técnica del impacto acústico** consiste en golpear en forma ligera la superficie de un objeto, escuchando y analizando las señales para detectar discontinuidades y defectos.

El principio es básicamente el mismo que cuando uno golpea paredes, cubiertas de escritorios o fondos en diversos lugares con un dedo o con un martillo y escucha el sonido emitido. Los discos vitrificados para rectificado (sección 26.2) se prueban de manera similar (*prueba de sonido*) a fin de detectar grietas en el disco que pueden no ser visibles a simple vista. La técnica del impacto acústico se realiza con facilidad y se puede instrumentar y automatizar. Sin embargo, los resultados dependen de la geometría y masa de la parte, por lo que es necesario un patrón de referencia para identificar los defectos.

Radiografía. La radiografía utiliza la inspección mediante rayos X para detectar defectos internos como grietas y porosidad. El principio implica las diferencias de densidad dentro de la parte. Por ejemplo, es común que el metal que rodea un defecto sea más denso y que, en consecuencia, aparezca como más ligero que los defectos en una película de rayos X. Esto es similar a la forma en que los huesos y dientes aparecen más ligeros que el resto del cuerpo en las películas de rayos X.

Por lo general, la fuente de radiación es un cañón de rayos X que produce una imagen permanente visible sobre una película o papel radiográfico (fig. 36.11a). También se utilizan fluoroscopios para producir imágenes de rayos X con rapidez, y constituye una técnica de radiografía en tiempo real que muestra eventos conforme ocurren. La radiografía requiere equipo costoso, interpretación apropiada de los resultados y puede constituir un riesgo de radiación.

- En la **radiografía digital** se reemplaza la película por un arreglo lineal de sensores (fig. 36.11b). El haz del rayo X es colimado y forma un rayo extendido y plano (compare la fig. 36.11a y b), y la pieza de trabajo se mueve en forma vertical. Los sensores analizan la radiación de manera digital y los datos se guardan en la memoria de una computadora. Después la pantalla muestra los datos como una imagen bidimensional de la pieza de trabajo.

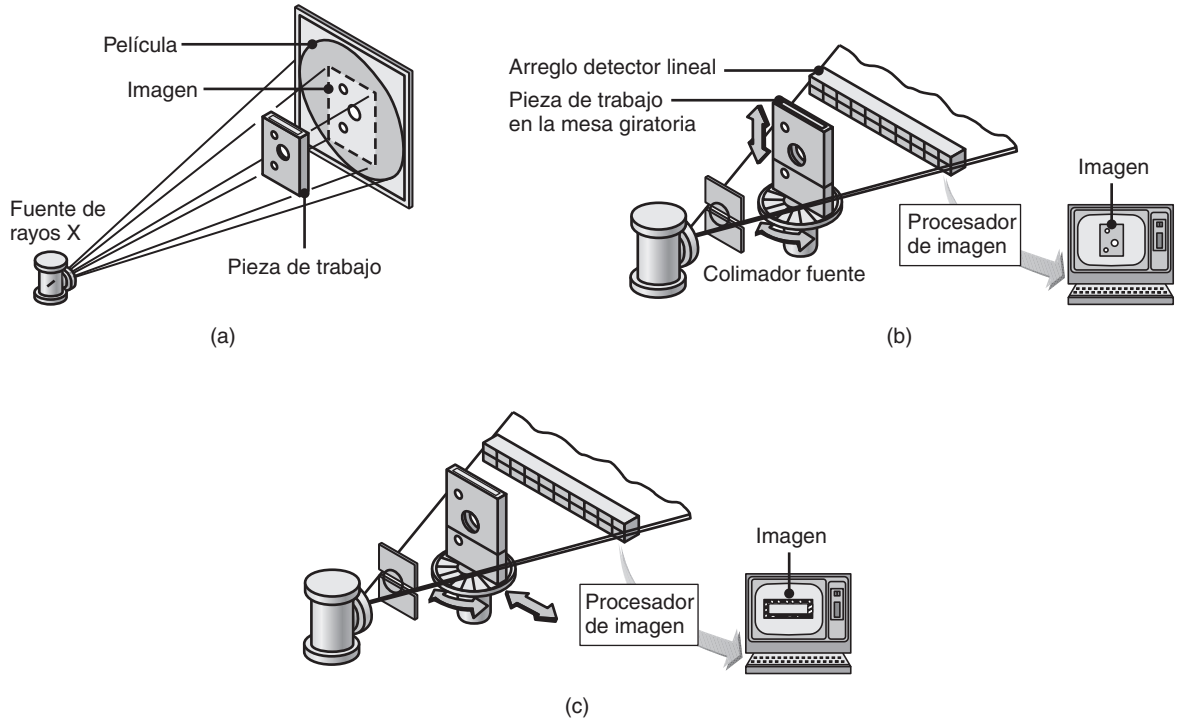


FIGURA 36.11 Tres métodos de inspección radiográfica: *(a)* radiografía convencional; *(b)* radiografía digital, y *(c)* tomografía computarizada. *Fuente:* ASM International.

- La **tomografía computarizada** se basa en el mismo sistema descrito para la radiografía digital, excepto en que la pieza de trabajo gira en un eje vertical mientras se mueve verticalmente (fig. 36.11c) y la pantalla produce imágenes de rayos X de secciones transversales delgadas de la pieza. La traslación y rotación de la pieza de trabajo proporcionan varios ángulos desde los cuales se ve con precisión el objeto.
- La **tomografía asistida por computadora** (**catscan**) también se basa en el mismo principio y se utiliza ampliamente en la práctica y el diagnóstico médico.

Inspección mediante corrientes parásitas (de eddy). Este método se basa en el principio de la inducción electromagnética. La parte se coloca en una bobina eléctrica, o junto a ella, por la que fluye corriente alterna (corriente excitadora) a frecuencias que van de 60 Hz a 60 MHz. Esta corriente provoca corrientes parásitas o de eddy en la parte. Los defectos en la parte impiden y cambian la dirección de las corrientes parásitas (fig. 36.12) y provocan cambios en el campo electromagnético que afectan la bobina excitadora (bobina de inspección), cuyo voltaje se supervisa para determinar la presencia de defectos.

Se pueden fabricar bobinas de inspección de diferentes tamaños y formas para adaptarse a la geometría de la parte por inspeccionar. Las partes deben ser eléctricamente conductoras y, por lo general, la profundidad de los defectos está limitada a 13 mm (0.5 pulgada). La técnica requiere el uso de una muestra patrón de referencia para ajustar la sensibilidad del probador.

Inspección térmica. La inspección térmica comprende el uso de dispositivos sensores de calor del tipo de contacto y sin contacto que detectan los cambios de temperatura. Los defectos en la pieza de trabajo (como grietas, regiones separadas en estructuras laminadas y uniones deficientes) causan un cambio en la distribución de la temperatura.

En la **inspección termográfica** se aplican algunos materiales (como pinturas y papeles sensibles al calor, cristales líquidos y otros recubrimientos) a la superficie de la pieza de trabajo. Cualquier cambio en su color o apariencia indica defectos. El método más común de inspección termográfica sin contacto utiliza sensores de luz infrarroja (por lo común microscopios y cámaras de barrido infrarrojo), que tienen un tiempo alto de respuesta y sensibilidades elevadas de 1 °C (2 °F). La **inspección termométrica** usa dispositivos (como termopares, radiómetros, pirómetros) y algunas veces materiales fundibles, como crayones parecidos a la cera.

Holografía. La técnica de la holografía crea una imagen tridimensional de la parte que utiliza un sistema óptico (fig. 36.13). Por lo regular utilizada en formas simples y en superficies altamente pulidas, esta técnica registra la imagen en una película fotográfica.

Su uso se ha extendido a la **interferometría holográfica** para la inspección de partes con diversas formas y rasgos superficiales. En respuesta a técnicas de exposición doble

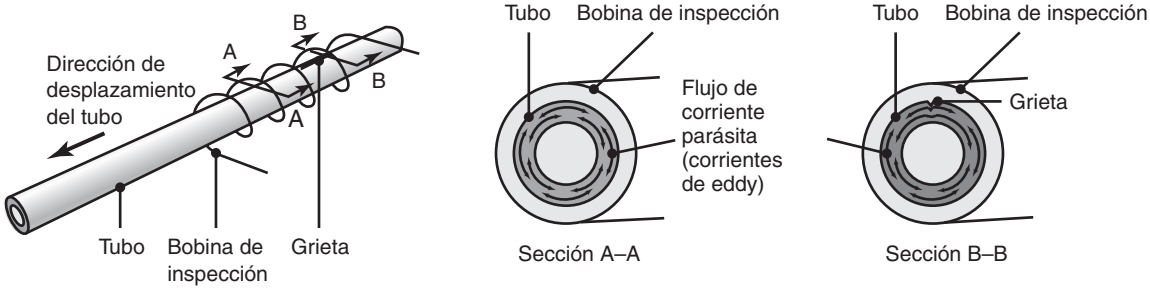


FIGURA 36.12 Cambios en el flujo de corriente parásita (de eddy) provocados por un defecto en una pieza de trabajo. *Fuente:* Cortesía de ASM International.

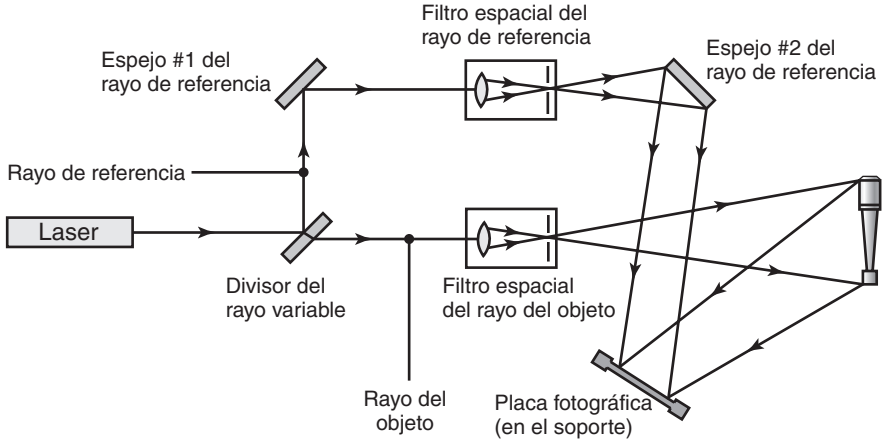


FIGURA 36.13 Esquema del sistema básico óptico utilizado en elementos holográficos en radiografía para detectar defectos en piezas de trabajo. *Fuente:* ASM International.

y múltiple, mientras la parte se somete a fuerzas externas o a variaciones dependientes de la temperatura, los cambios en las imágenes revelan defectos en la parte.

- En la **holografía acústica**, la información sobre los defectos internos se obtiene directamente de la imagen del interior de la parte. En la *holografía acústica de superficie líquida*, la pieza de trabajo y dos transductores ultrasónicos (uno para el rayo objetivo y el otro para el rayo de referencia) se sumergen en un tanque lleno con agua. Después, la imagen holográfica se obtiene de las ondas en el tanque.
- En la **holografía acústica de barrido**, sólo se utiliza un transductor y el holograma se produce mediante detección de fase electrónica. Además de ser más sensible, por lo general el equipo es portátil y puede aceptar piezas de trabajo muy grandes mediante el uso de una columna de agua en lugar de un tanque.

36.11 Ensayos destructivos

Como su nombre lo indica, la parte sometida a prueba utilizando métodos de *ensayo destructivos* ya no mantiene su integridad, forma original o características superficiales. Todos los métodos mecánicos de prueba descritos en el capítulo 2 son destructivos, pues en ellos se retira del producto una muestra o espécimen para someterla a prueba. Los ejemplos de otras pruebas destructivas incluyen la prueba de velocidad de discos de rectificado, a fin de determinar su velocidad de explosión, y la prueba de alta presión de recipientes a presión, para determinar su presión de explosión.

Las pruebas de dureza que dejan grandes muescas (ver figs. 2.12 y 2.13) también se pueden considerar como ensayos destructivos. Sin embargo, es posible considerar los ensayos de microdureza como no destructivos debido a las muescas permanentes tan pequeñas. Esta distinción se basa en el supuesto de que el material es no sensible a las muescas. En general, la mayoría de los vidrios, los metales con altos tratamientos térmicos y los materiales cerámicos son sensibles a las muescas. En consecuencia, una pequeña muesca producida por el marcador puede reducir su resistencia y tenacidad de manera significativa.

36.12 Inspección automatizada

Tradicionalmente, las partes individuales y los ensambles de partes se han manufacturado en lotes, enviados a inspección en los cuartos de control de calidad (**inspección posterior al proceso**) y, si se aprueban, se colocan en el inventario. Si las partes no pasan la inspección de calidad, se desechan o se mantienen y se usan considerando que tienen cierta desviación aceptable del patrón.

Por el contrario, la *inspección automatizada* utiliza varios sistemas sensores que supervisan los parámetros correspondientes *durante* el proceso de manufactura (llamada **inspección en línea**). Usando estas mediciones, el proceso se corrige por sí mismo automáticamente para producir partes aceptables. Por ende, no es necesaria una inspección posterior de la parte en otro lugar de la planta. Las partes también se pueden inspeccionar inmediatamente después de haber sido producidas (proceso llamado **inspección en proceso**).

El desarrollo de sensores de precisión y sistemas avanzados de control computarizados ha permitido integrar la inspección automatizada en las operaciones de manufactura (capítulos 37 y 38). Dichos sistemas aseguran que no se pasa alguna parte de un proceso de manufactura a otro (por ejemplo, una operación de torneado seguida de un rectificado cilíndrico) a menos que la parte esté fabricada correctamente y satisfaga las normas de la primera operación.

La inspección automatizada es flexible y da respuesta a los cambios de diseño del producto. Además, debido al equipo automatizado, se requiere menor habilidad del operario, se aumenta la productividad y las partes tienen mayor calidad, confiabilidad y precisión dimensional.

Sensores para inspección automatizada. Los continuos avances en la **tecnología de los sensores** (que se describirá en la sección 37.7) han hecho factible la supervisión en línea, o en tiempo real, de los procesos de manufactura. Directa o indirectamente, y con el uso de diversas *sondas*, los sensores pueden detectar dimensiones, rugosidad superficial, temperatura, fuerza, potencia, vibración, desgaste de la herramienta y la presencia de defectos externos o internos.

Los sensores pueden funcionar con base en los principios de las galgas extensiométricas y calibradores de inductancia, capacitancia, ultrasonido, acústica, neumática, radiación infrarroja, óptica, láser y electrónicos. Los sensores pueden ser *táctiles* (de contacto) o *no táctiles*. Se conectan con microprocesadores y computadores para la visualización gráfica de los datos (ver también *controladores lógicos programables*, sección 37.2.6). Esta capacidad permite el rápido ajuste en línea de cualquier parámetro del proceso, lo que da como resultado la producción de partes que de manera consistente están dentro de normas especificadas de tolerancia dimensional y calidad. Por ejemplo, dichos sistemas ya son equipo estándar en muchas máquinas herramienta de corte de metales y en las rectificadoras descritas en la parte IV de este libro.

RESUMEN

- La calidad debe integrarse dentro de los productos. El aseguramiento de la calidad comprende diversos aspectos de la producción, como diseño, manufactura y ensamble, y en particular la inspección a cada paso de la producción para que se apeguen a las especificaciones.
- El control estadístico de la calidad y el control de proceso son indispensables en la manufactura moderna. Son importantes sobre todo en la producción de partes intercambiables y en la reducción de costos de manufactura.
- Aunque todos los métodos de control de calidad tienen sus límites de aplicabilidad en la producción de artículos, la implantación de la administración de la calidad total, las normas ISO y QSO 9000, así como la norma ISO 14000, se encuentran entre los desarrollos más significativos de control de la calidad en la manufactura.

- Existen varias técnicas de ensayos destructivos y no destructivos (cada una de las cuales tiene sus propias aplicaciones, ventajas y limitaciones) para la inspección de las partes y los productos terminados.
- El método tradicional de inspección de las partes o productos después de ser manufacturados ha sido reemplazado en gran medida por la inspección en línea y al 100% de todas las partes y productos que se fabrican.

TÉRMINOS CLAVE

Administración de la calidad total
Aseguramiento de la calidad
Calidad
Capacidad del proceso
Causa común
Causa especial
Círculo de calidad
Confiabilidad
Confiabilidad del proceso
Confiabilidad del producto
Control de la calidad total
Control estadístico de la calidad
Control estadístico de proceso
Curva de distribución normal
Desviación estándar
Diseño experimental
Diseño factorial
Dispersión
Distribución
Distribución de frecuencias
Ensayo destructivo
Ensayo no destructivo
Estadística
Función de pérdida de Taguchi
Inspección automatizada
Kaizen
Límite de control inferior
Límite de control superior
Límites de control
Límites de especificaciones
Mejora continua
Método de atributos
Método de variables
Métodos Deming
Métodos Juran
Métodos Taguchi
Muestreo aleatorio
Muestreo de aceptación
Nivel de calidad de aceptación
Normas ISO
Normas QS
Población
Prevención de defectos
Probabilidad
Promedio general
Rango
Retorno económico por calidad
Riesgo del consumidor
Riesgo del productor
Robustez
Seis sigma (*Six sigma*)
Sensores
Sistemas de Administración Ambiental
Tablas de control
Tablas de control Shewhart
Tamaño de la muestra
Tamaño de lote
Variabilidad
Variaciones aleatorias
Variaciones asignables

BIBLIOGRAFÍA

Aft, L. S., *Fundamentals of Industrial Quality Control*, 3a. ed., Addison-Wesley, 1998.

Anderson, D. M., *Design for Manufacturability, Optimizing Cost, Quality, and Time to Market*, CIM Press, 1991.

ASM Handbook, Vol. 17: *Nondestructive Evaluation and Quality Contro*l, ASM International, 1989.

Bentley, J. P., *Introduction to Reliability and Quality Control*, 2a. ed., Addison-Wesley, 1999.

Besterfield, D. H., *Quality Control*, 5a. ed., Prentice Hall, 1997.

Bothe, D. R., *Measuring Process Capability: Techniques and Calculations for Quality and Manufacturing Engineers*, McGraw-Hill, 1997.

Bray, D. E. y Stanley R. K., *Nondestructive Evaluation: A Tool in Design, Manufacturing, and Service*, ed. rev., CRC Press, 1997.

Breyfogle, F. W., III, *Statistical Methods for Testing, Development, and Manufacturing*, Wiley Interscience, 1992.

Cartz, L., *Nondestructive Testing*, ASM International, 1995.

Clements, R. B., *The Handbook of Statistical Methods in Manufacturing*, Prentice Hall, 1991.

Connor, G., *Six Sigma and other Continuous Improvement Tools for the Small Shop*, Society of Manufacturing Engineers, 2001.

Deming, W. E., *Out of the Crisis*, MIT Press, 1986.

DeVor, R. E., Chang, T. y Sutherland, J. W., *Statistical Quality Design and Control*, MacMillan, 1992.

Diamond, W. J., *Practical Experimental Designs for Engineers and Scientists*, 2a. ed., Van Nostrand Reinhold, 1989.

Doty, L. A., *SPC for Short Run Manufacturing*, Hanser Gardner, 1997.

_____, *Statistical Process Control*, 2a. ed., Industrial Press, 1996.

Elsayed, E. A., *Reliability Engineering,* Addison-Wesley, 1996.
Feigenbaum, A. V., *Total Quality Control*, 3a. ed., actualizada, McGraw-Hill, 1991.
Fowlkes, W. Y. y Creveling, C. M., *Engineering Methods for Robust Product Design: Using Taguchi Methods in Technology and Product Development*, Addison-Wesley, 1995.
Grant, E. L. y Leavenworth, R. S., *Statistical Quality Control*, McGraw-Hill, 1997.
Imai, M., *Gemba Kaizen: A Commonsense, Low-Cost Approach to Management,* McGraw-Hill, 1997.
Ireson, W. G., Coombs, C. F., Jr. y Moss, R. Y., *Handbook of Reliability Engineering and Management,* 2a. ed., McGraw-Hill, 1996.
Juran, J. M. y Godfrey, A. B. (eds.), *Juran's Quality Handbook*, 5a. ed., McGraw-Hill, 1999.
Kales, P., *Reliability: For Technology, Engineering, and Management*, Prentice Hall, 1997.
Kane, V. E., *Defect Prevention: Use of Simple Statistical Tools,* Marcel Dekker, 1989.
Kear, F. W., *Statistical Process Control in Manufacturing Practice*, Marcel Dekker, 1997.
Kolarik, W. J., *Creating Quality*, McGraw-Hill, 1995.
Lamprecht, J. L., *Implementing the ISO 9000 Series,* Marcel Dekker, 1993.
Levinson, W. A. y Tumbelty, F., *SPC Essentials and Productivity Improvement: A Manufacturing Approach*, American Society for Quality Control, 1996.
Lewis, E. E., *Introduction to Reliability Engineering*, 2a. ed., Wiley, 1995.
Menon, H. G., *TQM in New Product Manufacturing,* McGraw-Hill, 1992.
Monden, Y., *Toyota Production System*, Industrial Engineering and Management Press, 1993.
Montgomery, D. C., *Introduction to Statistical Quality Control,* 3a. ed., Wiley, 1996.
Oakland, J. S., *Statistical Process Control*, 3a. ed., Butterworth-Heinemann, 1996.
Ott, E. R. y Schilling, E. G., *Process Quality Control*, 2a. ed., McGraw-Hill, 1990.
Park, S., *Robust Design and Analysis for Quality Engineering,* Chapman & Hall, 1997.
Quensenberry, C. P., *SPC Methods for Quality Improvement*, Wiley, 1997.
Raj, B. Jaykumar, T. y Thavasimuthu, M. (eds.), *Practical Non-Destructive Testing*, 2a. ed., ASM International, 2002.
Ross, J. E., *Total Quality Management-Text, Cases and Readings*, St. Lucie Press, 1993.
Ross, P. J., *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, 2a. ed., McGraw-Hill, 1996.
Rothery, B., *ISO 14000 and ISO 9000*, Gower Publishing Co., 1995.
Smith, G. M., *Statistical Process Control and Quality Improvement*, American Society for Quality Control, 1997.
Taguchi, G., *Introduction to Quality Engineering,* UNIPUB-/Kraus International, 1986.
_____, *Taguchi on Robust Technology Development: Bringing Quality Engineering Upstream*, ASME Press, 1993.
_____, ElSayed, E. A. y Hsiang, T., *Quality Engineering in Production Systems*, McGraw-Hill, 1989.
Taylor, W., *Optimization and Variation in Reduction in Quality*, McGraw-Hill, 1991.
Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4a. ed., Vol. 4, *Assembly, Testing, and Quality Control*, Society of Manufacturing Engineers, 1986.
Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4a. ed., Vol. 7, *Continuous Improvement*, Society of Manufacturing Engineers, 1993.
Tozawa, B. y Bodek, N., *The Idea Generator: Quick and Easy Kaizen*, PCS Press, 2001.

PREGUNTAS DE REPASO

36.1 Explique por qué se hacen esfuerzos importantes de manera continua para integrar la calidad en los productos.

36.2 ¿Qué son las variaciones aleatorias?

36.3 Defina los términos *tamaño de muestra, muestreo aleatorio, población y tamaño de lote*.

36.4 Explique la diferencia entre método de variables y método de atributos.

36.5 Defina desviación estándar. ¿Por qué es importante en manufactura?

36.6 Describa qué significa control estadístico de proceso.

36.7 ¿Por qué se producen las tablas de control? ¿Cómo se utilizan?

36.8 ¿Qué indican los límites de control?

36.9 Defina capacidad del proceso. ¿Cómo se utiliza?

36.10 ¿Qué es el muestreo de aceptación? ¿Por qué se desarrolló?

36.11 ¿Cuál es la diferencia entre confiabilidad en serie y en paralelo?

36.12 ¿Qué es la función de pérdida de Taguchi? ¿Cuál es su significado?

36.13 ¿Qué significa calidad seis sigma?

36.14 ¿Cuál es la diferencia entre (*a*) probabilidad y confiabilidad, y (*b*) robustez y confiabilidad?

36.15 Liste técnicas destructivas y coméntelas.

PROBLEMAS CUALITATIVOS

36.16 ¿Cuál es la consecuencia de establecer especificaciones inferior y superior cercanas al pico de la curva en la figura 36.4?
36.17 Identifique varios factores que puedan hacer que un proceso se salga de control.
36.18 Describa situaciones en las que sea inevitable la necesidad de técnicas de ensayo destructivas.
36.19 ¿Cuál de las técnicas de inspección no destructivas es adecuada para materiales no metálicos? ¿Por qué?
36.20 Dé ejemplos de productos en los que no es posible o factible el muestreo al 100%.
36.21 ¿Cuáles son las ventajas de la inspección automatizada? ¿Por qué se ha vuelto parte importante de la ingeniería de manufactura?
36.22 ¿Por qué es importante la confiabilidad en la ingeniería de manufactura? Dé varios ejemplos.
36.23 Dé ejemplos de la técnica de inspección de impacto acústico, diferentes de los presentados en el capítulo.
36.24 Explique por qué los calibres *PASA* y *NO PASA* (ver sección 35.4.4) son incompatibles con la filosofía Taguchi.
36.25 Diga lo que piensa en relación con la tabla 36.1.
36.26 Dé ejemplos de diseño robusto además del de la figura 36.1.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

36.27 Los fabricantes de latas para bebidas tratan de obtener índices de falla de menos de una en diez mil latas. Si esto corresponde a una calidad sigma n, encuentre n.
36.28 Suponga que en el ejemplo 36.3 el número de muestras era ocho en lugar de 10. Utilizando la mitad superior de los datos de la tabla 36.4, calcule nuevamente los límites de control y la desviación estándar. Compare sus observaciones con los resultados obtenidos usando 10 muestras.
36.29 Calcule los límites de control para los promedios y los rangos de lo siguiente: (a) número de muestras = 6; (b) $\overline{\overline{x}} = 65$, y (c) $R = 5$.
36.30 Calcule los límites de control para lo siguiente: (a) número de muestras = 5; (b) $\overline{\overline{x}} = 36.5$, y (c) $\text{UCL}_R = 5.75$.
36.31 En una inspección con un tamaño de muestra de 12 y un número de muestras de 50, se encontró que el rango promedio era 12 y el promedio de promedios era 75. Calcule los límites de control para los promedios y los rangos.
36.32 Determine los límites de control para los datos mostrados en la tabla al final de la primera columna.

x_1	x_2	x_3	x_4
0.57	0.61	0.50	0.55
0.59	0.55	0.60	0.58
0.55	0.50	0.55	0.51
0.54	0.57	0.50	0.50
0.58	0.58	0.60	0.56
0.60	0.61	0.55	0.61

36.33 Se determinó que el promedio de promedios de un número de muestras de tamaño ocho era 124. El rango promedio era 17.82 y la desviación estándar era 4. En una muestra se tomaron las siguientes mediciones: 120, 132, 124, 130, 118, 132, 135, 121 y 127. ¿El proceso se encuentra bajo control?
36.34 La tendencia en la industria electrónica y en la de chips para computadoras es fabricar productos en los que se ha establecido que la calidad se aproxima a seis sigma (6σ). ¿Cuál sería el índice de rechazos por un millón de partes?
36.35 Un fabricante está laminando anillos para las pistas de rodamientos de bolas (ver fig. 13.15). La superficie interior tiene una especificación de rugosidad superficial de $0.10 \pm 0.06\ \mu$m. Las mediciones tomadas en los anillos laminados indican una rugosidad media de $0.112\ \mu$m con una desviación estándar de $0.02\ \mu$m. Se fabrican 50,000 anillos al mes y el costo de desechar un anillo defectuoso es de $5.00 dólares. Se sabe que, al cambiar los lubricantes a una emulsión especial, fundamentalmente la rugosidad media podría igualarse a la especificación de diseño. ¿Qué costo adicional por mes se puede justificar para el lubricante?
36.36 Para los datos del problema 36.35, suponga que el cambio de lubricante puede provocar que el proceso de manufactura alcance una rugosidad de $0.10 \pm 0.01\ \mu$m. ¿Qué costo adicional al mes se puede justificar para el lubricante? ¿Qué pasa si el lubricante no agregara ningún costo nuevo?

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

36.37 ¿Qué aspectos de los conceptos de control de calidad de Deming, Taguchi y Juran serían difíciles de implantar en una instalación manufacturera común? ¿Por qué?

36.38 ¿Deberían diseñarse y fabricarse los productos para una cierta vida útil esperada? Explique su respuesta.

36.39 Investigue en la bibliografía técnica, póngase en contacto con distintas asociaciones y elabore una tabla completa relativa a las expectativas de vida útil de diferentes productos de consumo.

36.40 ¿Existe alguna relación entre las especificaciones de diseño de los planos y los límites en las tablas de control?

36.41 ¿Sería deseable incorporar técnicas de inspección no destructivas en diferentes maquinarias de trabajo de los metales? Dé un ejemplo específico, haga un diagrama de dicha máquina y explique sus características.

36.42 Indique diferentes variables de materiales y procesos que pueden influir en la calidad de un producto metálico: (a) fundido; (b) formado, y (c) maquinado.

36.43 Identifique las técnicas no destructivas que son capaces de detectar defectos internos y las que sólo pueden identificar defectos externos.

36.44 Explique la diferencia entre inspección en proceso e inspección posterior al proceso de partes manufacturadas. ¿Qué tendencias existen en dichas inspecciones?

36.45 Suponga que está a cargo de las operaciones de manufactura en una compañía que aún no adopta técnicas de control estadístico de proceso. Diga cómo haría para desarrollar un plan a fin de hacerlo, incluyendo el suministro de capacitación para su personal.

36.46 Muchos componentes de productos tienen un efecto mínimo en la robustez y calidad de una parte. Por ejemplo, las bisagras del compartimiento de guantes de un automóvil realmente no impactan en la satisfacción del propietario y el compartimiento para guantes se abre con tan poca frecuencia que es fácil alcanzar un diseño robusto. ¿Promovería el uso de los métodos Taguchi (como el de función de pérdida) en este tipo de componente? Explique su respuesta.

PARTE

IX

Manufactura en un ambiente competitivo

En un mercado cada vez más global y competitivo de los productos de consumo e industriales, los avances en los procesos de producción, maquinaria, herramientas y operaciones han sido promovidos sobre todo por los objetivos que se describen en la Introducción General. Una revisión de los mismos proporciona el contexto apropiado para estudiar y apreciar los diversos temas y ejemplos presentados en la parte final de este libro. Dichos objetivos pueden resumirse de la siguiente manera:

- Los productos deben satisfacer en su totalidad tanto **los requisitos de diseño y servicio** como las especificaciones y normas.
- La **calidad** debe integrarse dentro del producto en cada etapa de diseño y manufactura.
- Deben explorarse e implementarse los **métodos más económicos** de manufactura.
- Los procesos y las operaciones de manufactura deben tener suficiente **flexibilidad** para responder rápidamente a las demandas en constante cambio del mercado global.
- La manufactura debe procurar continuamente niveles más altos de calidad y **productividad.**

En los siguientes capítulos se describen el significado y la importancia de *ver la manufactura como un gran sistema* en el que deben integrarse todas sus partes y actividades. Aunque a principios de la década de 1950 el control numérico de las máquinas herramienta era un factor clave en el establecimiento de la manufactura moderna, gran parte del avance en las actividades de manufactura se origina en nuestra capacidad para ver estas actividades y operaciones como un gran sistema con interacciones complejas entre todos sus componentes. Al establecer un *planteamiento de sistemas* para la manufactura, se pueden *integrar* y *optimizar* diversas funciones y actividades que durante mucho tiempo han sido entidades independientes y distintas.

Se inicia con la descripción del concepto de automatización en el capítulo 37. Después se habla acerca de su implementación en términos de desarrollos clave en el control numérico (y posteriormente en el control numérico computarizado). En seguida se describen más avances en la automatización y los controles que comprenden temas importantes como control adaptable, robots industriales, tecnología de sensores, además de manejo y movimiento de materiales. El capítulo finaliza con sistemas de ensamble y cómo pueden implantarse en la producción moderna.

En el capítulo 38 se describen los sistemas de manufactura y cómo se integran sus componentes y operaciones individuales, junto con el papel crítico de las computadoras y diversas tecnologías de habilitación como ayuda a actividades de diseño, ingeniería,

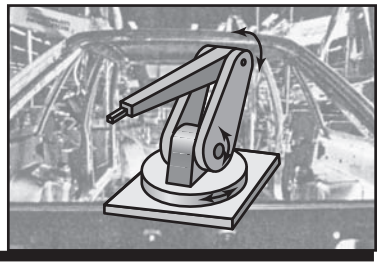
manufactura y planeación de procesos. También se trata el importante concepto de la tecnología de grupos. En el capítulo 39 se describe la manufactura integrada por computadora, con sus diversos rasgos como la manufactura celular, los sistemas flexibles de manufactura, la producción justo a tiempo y la manufactura esbelta, incluyendo el nuevo concepto de manufactura holónica. Esto lleva a la óptima producción de los productos deseados, la importancia y el significado de las redes de comunicación y el uso de inteligencia artificial. Se demuestra que cada una de estas tecnologías afecta la flexibilidad de los costos de operación, la productividad, la calidad de los productos y la manufactura.

El propósito del capítulo final de este libro es reconocer la importancia de los diversos factores que afectan de manera significativa la manufactura competitiva en un mercado global. Como se describe en el capítulo 40, estos factores comprenden el diseño, la calidad y el ciclo de vida de los productos; la selección de materiales y procesos y su reemplazo en la producción económica; las capacidades del proceso y los costos comprendidos, entre ellos los de maquinaria, herramientas y mano de obra. Por lo tanto, este capítulo ayuda a responder a los objetivos indicados al inicio de esta introducción.

CAPÍTULO

37

Automatización de los procesos de manufactura



37.1 Introducción 1144
37.2 Automatización 1146
37.3 Control numérico 1153
37.4 Control adaptable 1161
37.5 Manejo y movimiento de materiales 1163
37.6 Robots industriales 1165
37.7 Tecnología de sensores 1171
37.8 Soportes Flexibles 1176
37.9 Sistemas de ensamble 1180
37.10 Consideraciones de diseño para soportes fijos, ensamble, desensamble y servicio 1183
37.11 Consideraciones económicas 1186

EJEMPLOS:

37.1 Origen histórico del control numérico 1154
37.2 Aplicaciones especiales de los sensores 1175

ESTUDIO DE CASO:

37.1 Desarrollo de un soporte fijo modular 1178

En este capítulo se describen el arte y la ciencia de la automatización en los procesos y las operaciones de manufactura. La capacidad de producir partes de manera confiable y económica con gran precisión y altas velocidades de producción se facilita sobre todo por el uso de la automatización. Los temas considerados incluyen:

- El uso de automatización rígida para líneas de producción muy grandes.
- El control numérico de máquinas para mejorar la productividad y aumentar la flexibilidad de la manufactura.
- Estrategias de control, incluyendo lazos abiertos, lazos cerrados y el control adaptable de procesos.
- El uso de robots industriales en diversas fases de las operaciones de manufactura.
- El impacto de la automatización en el diseño de los productos y en la economía de los procesos.

37.1 Introducción

A principios de la década de 1950, la mayoría de las operaciones de manufactura en una planta común se realizaban en maquinaria tradicional, como tornos, fresadoras, taladrados y diversos equipos de formado, moldeado y unión de materiales. Sin embargo, dicho equipo solía carecer de flexibilidad y requería considerable mano de obra calificada para producir partes con dimensiones y características aceptables. Cada vez que se manufacturaba un producto diferente, la maquinaria tenía que equiparse con herramental nuevo, prepararse los soportes fijos y arreglarse de nuevo el movimiento de materiales entre las distintas máquinas. El desarrollo de nuevos productos y partes con formas complejas exigía diversos intentos de prueba y error del operador a fin de establecer los parámetros adecuados de procesamiento en la máquina. Además, debido a la participación humana, era difícil, laborioso y costoso fabricar partes que fueran exactamente iguales.

En general, estas circunstancias ocasionaban que los métodos de procesamiento fueran ineficientes y los costos de mano de obra una parte significativa del costo general de producción. La urgencia de reducir esta última parte del costo de los productos se volvió cada vez más evidente, así como la necesidad de mejorar la eficiencia y flexibilidad de las operaciones de manufactura, en particular debido a la continua competencia interna y global.

La **productividad** también se convirtió en una mayor preocupación. En general, definida como "producción total por empleado por hora", mide básicamente la eficiencia operativa. Por lo tanto, una operación eficiente optimiza el uso de todos los recursos, tales

como materiales, energía, capital, mano de obra, maquinaria y tecnología actualizada. Con los rápidos avances en ciencia y tecnología de la manufactura, la eficiencia de las operaciones de manufactura empezó a mejorar y, como resultado, el porcentaje de la mano de obra en el costo total empezó a declinar.

En el mejoramiento de la productividad, los elementos importantes han sido la *mecanización,* la *automatización* y el *control* del equipo y los sistemas de manufactura. La **mecanización** controla una máquina o un proceso mediante diversos dispositivos mecánicos, hidráulicos, neumáticos y eléctricos. Alcanzó su auge en la década de 1940. A pesar de sus beneficios, en las operaciones mecanizadas el trabajador sigue participando en un proceso específico directamente y debe verificar cada paso del desempeño de una máquina. Por ejemplo, si (*a*) una herramienta de corte se rompe durante el maquinado; (*b*) las partes se sobrecalientan durante el tratamiento térmico; (*c*) el acabado superficial empieza a deteriorarse en el rectificado, o (*d*) las tolerancias dimensionales se vuelven demasiado grandes en el formado de láminas metálicas, el operador debe intervenir, cambiar uno o más de los parámetros del proceso correspondiente y ajustar las máquinas, lo que requiere bastante experiencia.

El siguiente paso en la mejora de la eficiencia de las operaciones de manufactura fue la **automatización**. A mediados de la década de 1940, la industria automotriz en Estados Unidos propuso la palabra automatización para indicar el *manejo y proceso automáticos* de las partes entre las máquinas de producción. Aunque no existe una definición precisa, por lo general la automatización significa la metodología y el sistema de operación de una máquina o proceso por medios altamente *automáticos*; proviene del término griego *automatos*, que significa "de accionamiento propio".

Existen diversos tipos y niveles (órdenes) de automatización. El orden se inicia con herramientas manuales simples y continúa con máquinas manuales, herramientas de potencia, máquinas automáticas de ciclo simple, máquinas de ciclos múltiples, líneas de transferencia, máquinas de control numérico y, finalmente, la implementación de sistemas expertos e inteligencia artificial, como se describe en el capítulo 39. Los rápidos avances en la automatización y las tecnologías de habilitación se han hecho posibles en gran medida gracias a los desarrollos en los **sistemas de control**, con la ayuda de computadoras y *software* cada vez más poderosos y sofisticados.

Este capítulo sigue la descripción esquemática de la figura 37.1. Primero se revisan la historia y los principios de la automatización y cómo ha ayudado a la integración de diversas operaciones y actividades clave en una planta de manufactura. Después, se introduce

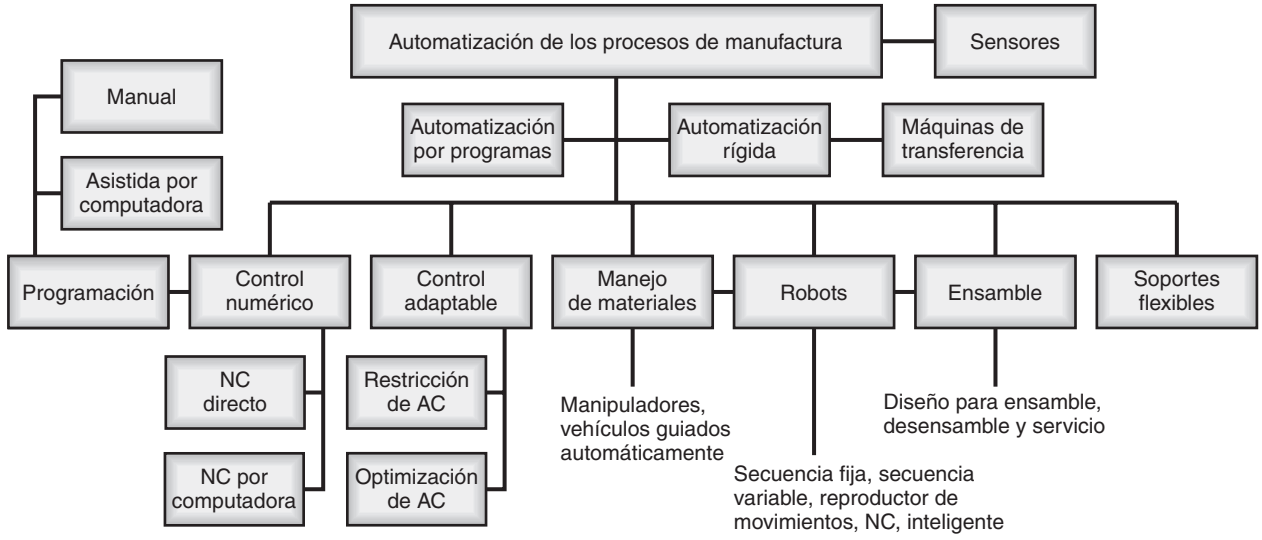


FIGURA 37.1 Diagrama de los temas comprendidos en el capítulo 37.

el concepto de control de máquinas y sistemas por medio de técnicas de *control numérico* y *control adaptable*. También se describe cómo se ha desarrollado la importante actividad del manejo y los movimientos de materiales en diversos sistemas, en particular los que incluyen el uso de *robots industriales* para mejorar la eficiencia del manejo.

Luego se describe el tema de la *tecnología de sensores,* que es fundamental en el control y la optimización de maquinaria, procesos y sistemas. También se abarcan desarrollos significativos en los *soportes flexibles* y las *operaciones de ensamble*. Estos métodos nos permiten aprovechar en su totalidad las tecnologías de manufactura avanzada, en particular los sistemas flexibles de manufactura. Este capítulo también trata los lineamientos para los *diseños de ensamble, desensamble y servicio* con recomendaciones específicas para mejorar la eficiencia de estas operaciones. El tema final describe los aspectos *económicos* de los procesos y las operaciones cubiertas en este capítulo.

37.2 Automatización

Aunque pueden existir variaciones en la definición, la *automatización* suele definirse como el proceso de habilitación de las máquinas para seguir una secuencia predeterminada de operaciones con poca o ninguna mano de obra humana, utilizando equipo especializado y dispositivos que realizan y controlan los procesos de manufactura (tabla 37.1). La automatización total se logra mediante diversos dispositivos, sensores, actuadores, técnicas y equipo que tienen la capacidad de (*a*) supervisar todos los aspectos de la

TABLA 37.1

Desarrollo en la historia de la automatización de los procesos de manufactura

Fecha	Desarrollo
1500-1600	Potencia hidráulica para el trabajo mecánico; molinos de laminación para cintas de acuñación.
1600-1700	Torno manual para madera; calculadora mecánica.
1700-1800	Torno de mandrinado, torneado y corte de tornillos; taladradoras de columna.
1800-1900	Torno de copiado, torno de torreta, fresadora universal; calculadoras mecánicas avanzadas.
1808	Tarjetas de lámina metálica con orificios troquelados para control automático de patrones de tejidos en telares.
1863	Piano automático (Pianola).
1900-1920	Torno engranado; máquina automática de tornillos; máquina automática de fabricación de botellas.
1920	Primer uso de la palabra *robot*.
1920-1940	Máquinas de transferencia; producción en masa.
1940	Primera máquina de cálculo electrónico.
1943	Primera computadora electrónica digital.
1945	Primer uso de la palabra *automatización*.
1947	Invención del transistor.
1952	Primer prototipo de máquina herramienta de control numérico.
1954	Desarrollo del lenguaje simbólico APT (Herramienta Programada Automáticamente); control adaptable.
1957	Máquinas herramienta NC comercialmente disponibles.
1959	Circuitos integrados; primer uso del término *tecnología de grupos*.
Década 1960	Robots industriales.
1965	Circuitos integrados a gran escala.
1968	Controladores lógicos programables.
1970	Primer sistema integrado de manufactura; soldadura por punto con robots para carrocerías automotrices.
Década 1970	Microprocesadores; robot controlado por minicomputadora; sistemas flexibles de manufactura; tecnología de grupos.
Década 1980	Inteligencia artificial; robots inteligentes; sensores inteligentes; celdas de manufactura sin atención de personal.
1990-2000	Sistemas integrados de manufactura; máquinas inteligentes y basadas en sensores; telecomunicaciones y redes globales de manufactura; dispositivos de lógica difusa; redes neuronales artificiales; herramientas de internet.

operación de manufactura; (*b*) tomar decisiones respecto de los cambios que deben hacerse en la operación, y (*c*) controlar todos sus aspectos.

La automatización es un concepto *evolutivo* más que revolucionario. En las plantas de manufactura, se ha implementado sobre todo en las siguientes áreas básicas de actividad:

- **Procesos de manufactura:** las operaciones de maquinado, forjado, extrusión en frío, fundición, metalurgia de polvos y rectificado son ejemplos principales de procesos que se han automatizado ampliamente.
- **Manejo y movimiento de materiales:** los materiales y las partes en diversas etapas de terminación se movilizan a través de una planta mediante equipo controlado por computadora, con poca o ninguna guía humana.
- **Inspección:** se inspeccionan automáticamente la precisión dimensional, el acabado superficial, la calidad y diversas características específicas de las partes mientras se fabrican (*inspección en proceso*).
- **Ensamble:** las partes manufacturadas individualmente y los componentes se ensamblan de manera automática como subensambles y ensambles para formar un producto.
- **Empaque:** los productos se empacan automáticamente para su envío.

37.2.1 Evolución de la automatización

Algunos de los procesos de trabajo mecánico se desarrollaron desde el año 4000 a.C., como se muestra en la tabla I.2 de la Introducción General. Sin embargo, no fue sino hasta el inicio de la Revolución Industrial, en la década de 1750 (también conocida como Primera Revolución Industrial), cuando se empezó a introducir la automatización en la producción de bienes. Las máquinas herramienta (como los tornos de torreta, las máquinas automáticas de tornillo y el equipo automático de fabricación de botellas) comenzaron a desarrollarse a finales del siglo XIX. Las técnicas de producción en masa y las máquinas de transferencia se desarrollaron en la década de 1920. Estas máquinas tenían mecanismos automáticos *fijos* y se diseñaron para fabricar productos *específicos*, bien representados por la industria automotriz, que producía vehículos de pasajeros a alta velocidad de producción y bajo costo.

La innovación más importante en la automatización se inició con el control numérico (NC) de las máquinas herramienta. A partir de este desarrollo histórico, ha habido un rápido avance en la automatización de la mayoría de los aspectos de manufactura. Estos desarrollos comprenden la introducción de computadoras en la automatización, control numérico computarizado (CNC), control adaptable (AC), robots industriales, diseño, ingeniería y manufactura asistidos por computadora (CAD/CAE/CAM) y sistemas de manufactura integrados por computadora (CIM).

La manufactura comprende diversos niveles de automatización, dependiendo de los procesos utilizados, el producto deseado y los volúmenes de producción. Los sistemas de manufactura, en orden creciente de automatización (ver fig. 37.2), incluyen las siguientes clasificaciones:

- **Trabajos de taller (*Job shops*):** en estas instalaciones se utilizan máquinas de propósito general y centros de maquinado con altos niveles de participación de mano de obra.
- **Producción autónoma de NC:** utiliza **máquinas de control numérico** (sección 37.3), pero con una interacción significativa operador/máquina.
- **Celdas de manufactura:** utilizan un conjunto diseñado de máquinas con control integrado por computadora y manejo flexible de materiales, a menudo con robots industriales (sección 37.6).
- **Sistemas flexibles de manufactura:** como se señala en la sección 39.3, utilizan control por computadora de todos los aspectos de la manufactura, incorporación simultánea de varias celdas de manufactura y sistemas automatizados de manejo de materiales.

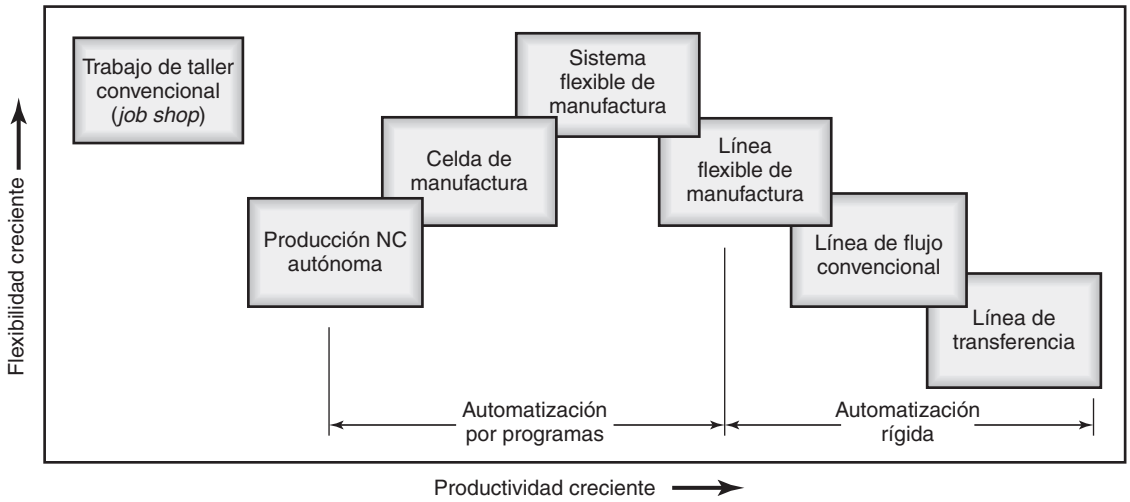


FIGURA 37.2 Flexibilidad y productividad de diferentes sistemas de manufactura. Obsérvese el traslape entre los sistemas; se debe a los diversos niveles de automatización y control por computadora que son posibles en cada grupo. Ver también el capítulo 39 para detalles.

- **Líneas flexibles de manufactura:** organizan la maquinaria controlada por computadora en líneas de producción en lugar de celdas. La transferencia de partes se efectúa mediante automatización rígida y el flujo de productos es más limitado que en los sistemas de manufactura flexibles, pero el rendimiento es mayor para cantidades de producción superiores.
- **Líneas de flujo y líneas de transferencia:** constan de agrupamientos organizados de maquinaria con manejo automatizado de materiales entre las máquinas. La línea de manufactura está diseñada con flexibilidad limitada o sin ella, ya que el objetivo es producir una sola parte.

37.2.2 Implementación de la automatización

La automatización tiene los siguientes objetivos principales:

- **Integrar** diversos aspectos de las operaciones de manufactura de manera que se mejoren la calidad y uniformidad de los productos, se minimicen los tiempos y esfuerzos de los ciclos y se reduzcan los costos de mano de obra.
- **Mejorar la productividad** reduciendo los costos de manufactura mediante un mejor control de la producción. Las partes se cargan, alimentan y descargan en las máquinas de modo más eficiente, las máquinas se utilizan de manera más efectiva y la producción se organiza en forma más eficaz.
- **Mejorar la calidad** utilizando procesos de mayor repetibilidad.
- **Reducir la participación humana,** el aburrimiento y de esta manera la posibilidad del error humano.
- **Reducir el daño de las piezas de trabajo** causado por el manejo manual de las partes.
- **Elevar el nivel de seguridad** del personal, sobre todo en condiciones de trabajo peligrosas.
- **Economizar el espacio de piso** en la planta arreglando las máquinas, el manejo y el movimiento de materiales y equipo auxiliar de manera más eficiente.

Automatización y cantidad de producción. La cantidad de producción es crucial al determinar el tipo de maquinaria y el nivel de automatización requeridos para elaborar partes de manera económica. La *cantidad total de producción* se define como el volumen total de partes a fabricar, el cual puede producirse en grupos o tandas individuales de varios *tamaños de lotes*. El tamaño del lote influye en gran medida en la economía de la producción.

TABLA 37.2

Cantidad aproximada de producción anual		
Tipo de producción	Cantidad producida	Productos comunes
Experimental o prototipo	1–10	Todos los productos.
Pieza o lote pequeño	10–5000	Aeronaves, misiles, maquinaria especial, matrices o dados, joyería e implantes ortopédicos.
Lote o alto volumen	5000–100,000	Camiones, maquinaria agrícola, motores de reacción, motores a diesel, componentes de computadoras y artículos deportivos.
Producción en masa	100,000 y más	Automóviles, electrodomésticos, sujetadores y contenedores para alimentos y bebidas.

La *capacidad de producción* se define como la cantidad de partes producidas por unidad de tiempo: por día, por mes o por año. En la tabla 37.2 se muestran intervalos aproximados, generalmente aceptados, de volumen de producción para algunas aplicaciones comunes. Como se esperaba, los productos experimentales o prototipos representan el volumen más bajo (ver también el capítulo 20).

Los **trabajos de taller** producen por lo común pequeñas cantidades por año (fig. 37.2) utilizando diversas máquinas herramienta estándar de propósito general (*máquinas autónomas*) o *centros de maquinado* (ver capítulo 25). Las operaciones realizadas suelen tener alta variedad de partes, lo que significa que pueden producirse diferentes partes en corto tiempo sin grandes cambios de herramientas y operaciones. Por otro lado, la maquinaria empleada en los trabajos de taller requiere por lo regular mano de obra calificada para funcionar, en tanto que las cantidades y capacidades de producción son bajas. Como resultado, el costo de producción por cada parte es elevado (fig. 37.3). Cuando las partes incluyen un componente grande de mano de obra, la producción se conoce como *intensiva en mano de obra*.

- Por lo general, la **producción de piezas y partes** considera cantidades muy pequeñas y es apropiada para talleres. La mayoría de la producción de piezas y partes comprende tamaños de lotes de 50 o menos.
- Comúnmente, las cantidades de **producción de grupos pequeños** van de 10 a 100, y el equipo utilizado consta de máquinas de propósito general y centros de maquinado con diversos controles por computadora.
- Por lo general, la **producción de grupos** comprende tamaños de lotes entre 100 y 5000. Utiliza maquinaria similar a la empleada para la producción de lotes pequeños, pero con aditamentos especialmente diseñados para tener mayor productividad.

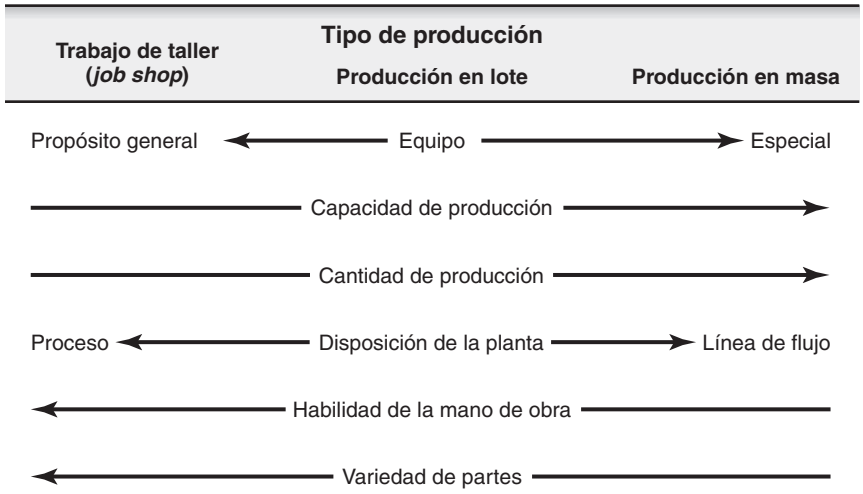


FIGURA 37.3 Características generales de tres tipos de métodos de producción: taller, por lote y producción en masa.

- La **producción en masa** a menudo comprende cantidades de alrededor de 100,000. Requiere maquinaria de propósito especial (conocida como *máquinas dedicadas*) y equipo automatizado para transferir materiales y partes en proceso. Aunque la maquinaria, el equipo y las herramientas especializadas son costosos, tanto la experiencia de la mano de obra requerida como sus costos son relativamente bajos. Estos sistemas de producción se organizan para un tipo específico de producto, de ahí que carezcan de flexibilidad.

37.2.3 Aplicaciones de la automatización

La automatización puede aplicarse a la manufactura de todo tipo de productos, desde materias primas hasta artículos terminados, y a la producción en general, desde talleres hasta grandes instalaciones de manufactura. La decisión de automatizar una instalación de producción nueva o existente requiere tomar en cuenta las siguientes consideraciones adicionales:

- Tipo de producto manufacturado.
- Cantidad y capacidad de producción requeridas.
- Fase particular de la operación de manufactura que se automatizará.
- Nivel de habilidad en la fuerza de trabajo disponible.
- Cualquier problema de confiabilidad y mantenimiento que pueda asociarse con los sistemas automatizados.
- Economía del proceso.

Debido a que la automatización generalmente comprende un alto costo inicial del equipo y requiere conocimiento sobre los principios de operación y mantenimiento, una decisión sobre el establecimiento de niveles —incluso bajos— de automatización debe incluir un estudio cuidadoso de las necesidades reales de una organización. En algunas situaciones, es más conveniente la **automatización selectiva** que la automatización total de una instalación. Como se advierte en el resto de la parte IX de este libro, existen diversos puntos importantes y complejos implícitos en la toma de decisiones acerca del nivel apropiado de automatización.

37.2.4 Automatización rígida (*Hard automation*)

En la *automatización rígida* o **automatización de posición fija**, las máquinas están diseñadas para producir un producto estándar, como un engrane, una flecha o un monobloque para motor. Aunque el tamaño del producto y los parámetros de procesamiento (como velocidad, avance y profundidad de corte) se pueden cambiar, estas máquinas son especializadas y carecen de flexibilidad. No es posible modificarlas para acomodar productos con diferentes formas y dimensiones (ver *tecnología de grupos*, sección 38.8). Debido a que es costoso diseñarlas y construirlas, su uso económico requiere la producción de partes en cantidades muy grandes. Por lo general, las máquinas utilizadas en aplicaciones de automatización rígida se construyen con base en el **principio modular** (**bloques de construcción**). Se conocen como *máquinas de transferencia* (ver abajo) y constan de dos componentes principales: unidades de producción de cabezales de potencia y mecanismos de transferencia.

Unidades de producción de cabezales de potencia. Estas unidades, que constan de un bastidor o bancada, motores de accionamiento eléctrico, cajas de engranes y husillos para herramientas, son de tipo independiente. Sus componentes se consiguen en el mercado en diversos tamaños y capacidades estándar. Debido a su modularidad, pueden reagruparse fácilmente para producir una parte diferente y así tener cierta adaptabilidad y flexibilidad.

Máquinas de transferencia. Por lo regular con dos o más cabezales de potencia, estas máquinas pueden acomodarse en el piso del taller en modelos lineales, circulares o

en forma de U. El peso y la forma de las piezas de trabajo influyen en el arreglo seleccionado, que es importante para dar continuidad a la operación en caso de fallas de herramientas o rupturas de máquinas en una o más de las unidades. En estas máquinas se incorporan rasgos de *almacenamiento acumulativo*, a fin de permitir la operación continua en dicho caso.

Mecanismos de transferencia y líneas de transferencia. Los mecanismos de transferencia se utilizan para mover la pieza de trabajo de una estación a otra dentro de la máquina o de una máquina a otra, a fin de permitir la realización de diversas operaciones en la parte. Las piezas se transfieren mediante métodos que incluyen: (*a*) rieles, a lo largo de los cuales se empujan o jalan las partes (que suelen colocarse en tarimas [pallets]) mediante diversos mecanismos (fig. 37.4a); (*b*) mesas giratorias de indización (fig. 37.4b), y (*c*) transportadores o bandas transportadoras aéreas.

Por lo general, la transferencia de partes de una estación a otra se controla mediante sensores y otros dispositivos. Las herramientas en las máquinas de transferencia se pueden cambiar con facilidad utilizando portaherramientas con elementos de cambio rápido, en tanto que las máquinas pueden equiparse con diversos sistemas automáticos de calibrado e inspección. Estos sistemas se emplean entre operaciones para asegurar que las dimensiones de la parte producida en una estación estén dentro de las tolerancias aceptables antes de transferirla a la siguiente estación. Las máquinas de transferencia también se usan ampliamente en el ensamble automatizado, como se indica en la sección 37.9.

En la figura 37.5 se muestran **líneas de transferencia** o **líneas de flujo** en un sistema muy grande para producir cabezas de cilindros de monobloques o monoblocks para motores, que constan de varias máquinas de transferencia. Este sistema tiene la capacidad de producir 100 cabezas de cilindros por hora. Obsérvese las diversas operaciones de maquinado realizadas: fresado, taladrado, rimado, mandrinado, machueleado, honeado, lavado y calibrado.

37.2.5 Automatización por programación

Ya hemos visto que la automatización rígida por lo general comprende máquinas de producción en masa que carecen de flexibilidad. En la *automatización por programación* (también conocida como **automatización flexible** o **programable**), se logra mayor flexibilidad mediante el uso del control por computadora de la máquina y sus funciones; por lo tanto, se pueden producir partes de formas complejas. La automatización por programación es un desarrollo importante, debido a que la máquina puede reprogramarse con facilidad y de inmediato para producir una parte con forma o dimensiones diferentes a la producida antes. Avances adicionales en la automatización flexible incluyen el uso extensivo de computadoras modernas que llevan al desarrollo de los **sistemas flexibles de manufactura** (sección 39.3), con altos niveles de eficiencia y productividad.

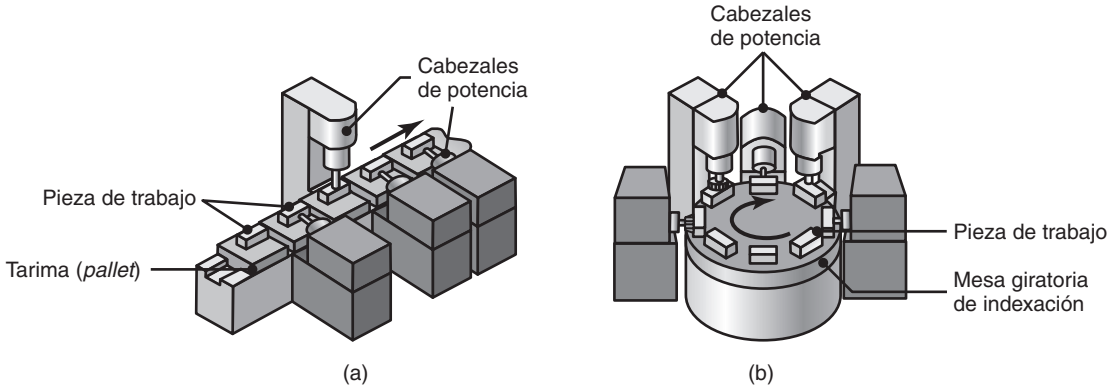


FIGURA 37.4 Dos tipos de mecanismos de transferencia: *(a)* rieles rectos, y *(b)* patrones circulares o rotatorios.

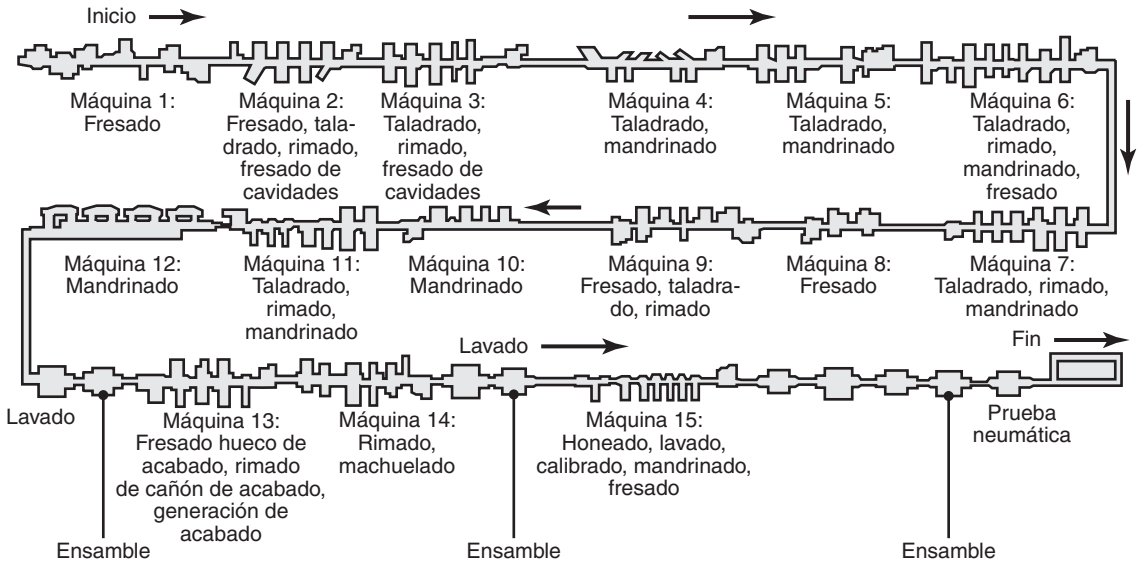


FIGURA 37.5 Línea de transferencia grande a fin de producir monobloques para motor y cabezas de cilindros. *Fuente*: Cortesía de Ford Motor Company.

37.2.6 Controladores lógicos programables

Tradicionalmente, el control de un proceso de manufactura en la secuencia apropiada (en particular uno que comprenda grupos de máquinas y equipo de manejo de material) se realiza mediante temporizadores, interruptores, relevadores, contadores y dispositivos similares cableados que se basan en principios mecánicos, electromecánicos y neumáticos. A principios de 1968 se introdujeron los *controladores lógicos programables* (PLC, *Programmable Logic Controllers*) para reemplazar estos dispositivos de cableado.

La National Electrical Manufacturers Association (NEMA) ha definido el controlador lógico programable como "un aparato electrónico de operación digital que utiliza una memoria programable para el almacenamiento interno de instrucciones a fin de implementar funciones específicas como lógica, secuenciación, tiempo, conteo y aritmética para controlar, mediante módulos de entrada y salida, digitales o analógicos, diversos tipos de máquinas o procesos". Se considera que una computadora digital, que se emplea para controlar las funciones de un controlador programable, se ubica dentro de este alcance.

Debido a que los PLC eliminan la necesidad de tableros de control de relevadores, pueden reprogramarse y ocupan menos espacio, se han adoptado extensamente en sistemas y operaciones de manufactura. Sus funciones básicas son: (*a*) encendido y apagado; (*b*) movimiento; (*c*) secuencia de operaciones, y (*d*) control de retroalimentación. Los PLC también se utilizan para controlar sistemas con capacidades de comunicación y procesamiento digital de alta velocidad. Se comportan de manera confiable en ambientes industriales y mejoran la eficiencia general de la operación. Los PLC se han vuelto cada vez menos populares en instalaciones nuevas debido a los avances en las máquinas de control numérico, pero siguen representando una base de instalación muy grande. Las microcomputadoras se utilizan con amplitud porque son menos costosas que los PLC y fáciles de programar y conectar en red.

37.2.7 Mantenimiento total productivo

La administración y el mantenimiento de una amplia variedad de máquinas, equipos y sistemas se encuentran entre los aspectos importantes que afectan la productividad de una organización de manufactura. Los conceptos de *mantenimiento total productivo* (TPM, por sus siglas en inglés) y *administración total del equipo productivo* (TPEM, por sus siglas en inglés) incluyen análisis continuos de factores como (*a*) descompostura y otros problemas de equipo; (*b*) supervisión y mejora de la productividad del equipo; (*c*) implantación de mantenimiento preventivo y predecible; (*d*) reducción del tiempo de preparación, tiempo muerto y tiempo de ciclo; (*e*) utilización total de maquinaria y equipo y mejora de su efectividad, y (*f*) reducción de defectos de los productos. El equipo de trabajo es un componente básico de esta actividad y comprende la cooperación total de los operadores de máquinas, el personal de mantenimiento, los ingenieros y la administración de la organización. (Ver también **kaisen**, sección 36.1).

37.3 Control numérico

El *control numérico* (NC, por sus siglas en inglés) es un método que controla los movimientos de los componentes de una máquina, insertando instrucciones codificadas en forma de números y letras directamente en el sistema. Éste interpreta en forma automática esos datos y los convierte en señales de salida. A su vez, dichas señales controlan diversos componentes de las máquinas, como la activación y desactivación de la rotación de husillos, cambio de herramientas, movimiento de la pieza de trabajo o de las herramientas a lo largo de trayectorias específicas, y activación y desactivación de fluidos de corte.

Para apreciar la importancia del control numérico de las máquinas, revisemos brevemente la forma en que se efectúa un proceso como el maquinado tradicional. Después de estudiar los planos de trabajo de una parte, el operador establece los parámetros apropiados del proceso (como velocidad y profundidad de corte, avance, fluido de corte y así sucesivamente), determina la secuencia de las operaciones de maquinado por realizar, sujeta la pieza de trabajo en un dispositivo portapiezas y procede con el maquinado de la parte.

Por lo general, dependiendo de la forma de la parte y de la precisión dimensional especificada, este método requiere operadores calificados. El procedimiento de maquinado puede depender del operador específico y, dadas las posibilidades de error humano, tal vez las partes producidas por el mismo operador no sean idénticas. Por lo tanto, la calidad de la parte depende de un operador específico o incluso del mismo operador en cierto día de la semana u hora del día. Debido a la necesidad de mejorar la calidad de los productos y reducir los costos de manufactura, dicha variabilidad en el desempeño, y sus efectos sobre la calidad de los productos, no son ya aceptables. Esta situación puede eliminarse mediante el control numérico de la operación de maquinado.

La importancia del control numérico puede ilustrarse con mayor detalle mediante el siguiente ejemplo. Supóngase que se van a taladrar varios orificios en una parte en las posiciones mostradas en la figura 37.6.

En el método manual de maquinado tradicional de esta parte, el operador coloca la broca para barrenar respecto de la pieza de trabajo, utilizando puntos de referencia proporcionados mediante cualquiera de los tres métodos mostrados en la figura. Después procede a taladrar los orificios. Primero supongamos que se van a taladrar 100 partes, todas exactamente con la misma forma y precisión dimensional. Es obvio que esta operación va a ser tediosa, debido a que el operador tiene que pasar de manera repetida por los mismos movimientos. Además, es alta la probabilidad de que, por diversas razones, algunas de las partes maquinadas sean diferentes a otras.

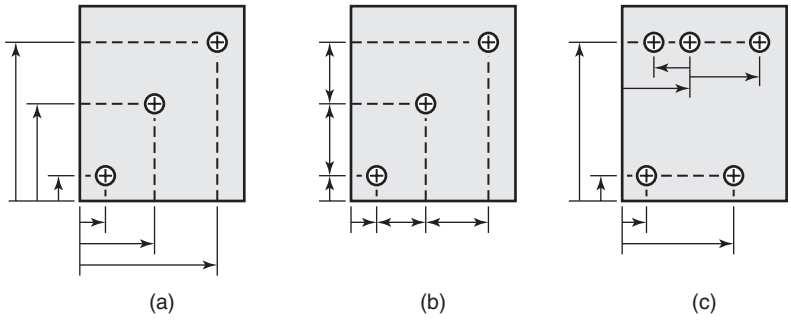


FIGURA 37.6 Posiciones de orificios taladrados en una pieza de trabajo. Se muestran tres métodos de medición: *(a)* dimensionamiento absoluto con referencia a un punto en la esquina inferior izquierda de la parte; *(b)* dimensionamiento incremental en secuencia de un orificio a otro, y *(c)* dimensionamiento mixto: combinación de ambos métodos.

Ahora supongamos que durante esta corrida de producción cambia el orden de las partes y 10 de ellas requieren orificios en diferentes posiciones. Entonces el maquinista tiene que posicionar de nuevo la mesa de trabajo; esta operación consume tiempo y está sujeta a errores. Dichas operaciones se pueden realizar con facilidad mediante máquinas de control numérico, que tienen la capacidad de producir partes de manera repetida y con precisión, y de manejar partes diferentes simplemente cargando diversos programas de partes.

En las operaciones de control numérico, los datos que se relacionan con todos los aspectos de la operación de maquinado (como localizaciones de herramientas, velocidades, avances y fluidos de corte) se almacenan en discos duros. Con base en la información de entrada, se pueden activar relevadores y otros dispositivos (*controles cableados*) para obtener la configuración deseada de la máquina. Se realizan con facilidad operaciones complejas (como el torneado de una parte que tiene diversos contornos o el estampado de dados o matrices en una fresadora). Las máquinas de NC se utilizan mucho en la producción de cantidades pequeñas y medianas (por lo general, 500 partes o menos) de una amplia variedad de partes, tanto en tiendas pequeñas como en grandes instalaciones de manufactura.

EJEMPLO 37.1 Origen histórico del control numérico

Al parecer, el concepto básico detrás del control numérico se implantó a principios del siglo XIX, cuando se utilizaban orificios perforados en tarjetas de lámina metálica para controlar en forma automática los movimientos de las máquinas tejedoras. Con la detección de la presencia o ausencia de un orificio en la tarjeta se activaban agujas. A esta invención le siguieron los pianos mecánicos automáticos (*pianolas*), cuyas teclas se activaban mediante el flujo de aire a través de orificios troquelados en un rodillo perforado de papel.

J. Parsons (1913-) concibió por primera vez el principio de controlar numéricamente los movimientos de las máquinas herramienta en un intento por maquinar aspas complejas de helicópteros. La primera máquina prototipo de NC se construyó en 1952 en el Massachusetts Institute of Technology. Era una fresadora copiadora de husillo vertical, de dos ejes equipados con servomotores, y las operaciones de maquinado realizadas consistían en fresado frontal y fresado lateral de una placa de aluminio gruesa.

Los datos numéricos a troquelar en las cintas de papel se generaban mediante una computadora digital, otra invención que se estaba desarrollando al mismo tiempo

en el MIT. En los experimentos, se maquinaban partes con éxito, precisión y de manera repetida sin intervención del operador. Con base en este éxito, la industria de las máquinas herramienta empezó a diseñar, construir y comercializar las máquinas herramienta NC. Posteriormente, estas máquinas se equiparon con controles numéricos computarizados (CNC, por sus siglas en inglés), produciendo mayor flexibilidad, precisión, versatilidad y facilidad de operación. Los últimos desarrollos son los *centros de maquinado,* cuyos principios se describen en el capítulo 25.

37.3.1 Control numérico por computadora

El siguiente paso en el desarrollo del control numérico se produjo cuando el equipo de control (montado en la máquina NC) se convirtió en un control por computadora local mediante *software*. Se desarrollaron dos tipos de sistemas computarizados: control numérico directo y control numérico por computadora.

- En el **control numérico directo** (DNC, por sus siglas en inglés), se controlan diversas máquinas directamente (paso a paso) mediante una computadora de unidad de procesamiento central. En este sistema, el operador tiene acceso a la computadora central a través de una terminal computarizada. Con el DNC, el estatus de todas las máquinas en una instalación de manufactura se puede monitorear y determinar desde una computadora central. Sin embargo, el DNC tiene una desventaja crucial: si la computadora se apaga, todas las máquinas se vuelven inoperables.

  Una definición más reciente del DNC es el **control numérico distribuido**, en el que una computadora central sirve como sistema de control para varias máquinas CNC individuales que tienen microcomputadoras incorporadas. Este sistema proporciona gran memoria e instalaciones computacionales y ofrece flexibilidad, al tiempo que supera la desventaja del control numérico directo.
- El **control numérico por computadora** (CNC) es un sistema en el que una microcomputadora de control es parte integral de una máquina (*computadora integrada*). El operador de la máquina puede programar las computadoras integradas, modificar los programas en forma directa, prepararlos para diferentes partes y almacenarlos. En la actualidad, se utilizan ampliamente sistemas CNC debido a la disponibilidad de (*a*) pequeñas computadoras con gran memoria; (*b*) controladores programables y microprocesadores de bajo costo, y (*c*) capacidades de edición de programas.

37.3.2 Principios de las máquinas NC

En la figura 37.7 se muestran los elementos y la operación básicos de una máquina NC común. A continuación se describen los elementos funcionales del control numérico y los componentes implicados.

- **Entrada de datos:** la información numérica se lee y almacena en la memoria de la computadora.
- **Procesamiento de datos:** los programas son leídos en la unidad de control de la máquina para su procesamiento.
- **Salida de datos:** esta información se traduce en comandos (por lo general, comandos por pulsos) al servomotor (fig. 37.8). Después éste mueve la mesa de trabajo (en la que se monta la pieza de trabajo) a posiciones específicas por medio de movimientos lineales o giratorios usando motores paso a paso, tornillos de avance y otros dispositivos similares.

Tipos de circuitos de control. Una máquina NC se puede controlar mediante dos tipos de circuitos: lazo abierto y lazo cerrado. En el sistema de **lazo abierto** (fig. 37.8a), las señales se envían al servomotor mediante el controlador, pero en los movimientos y las

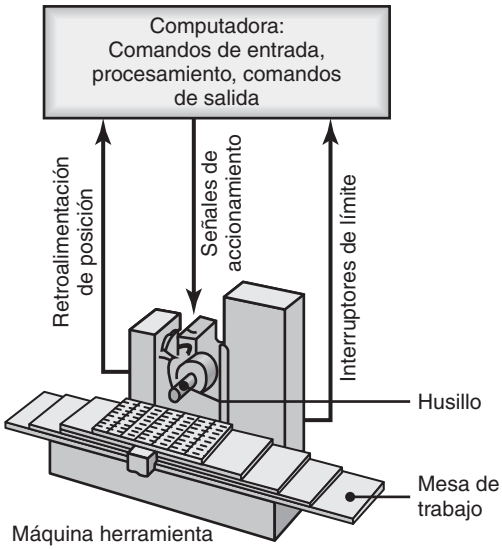


FIGURA 37.7 Esquema de los principales componentes de control de posición en una máquina herramienta de control numérico.

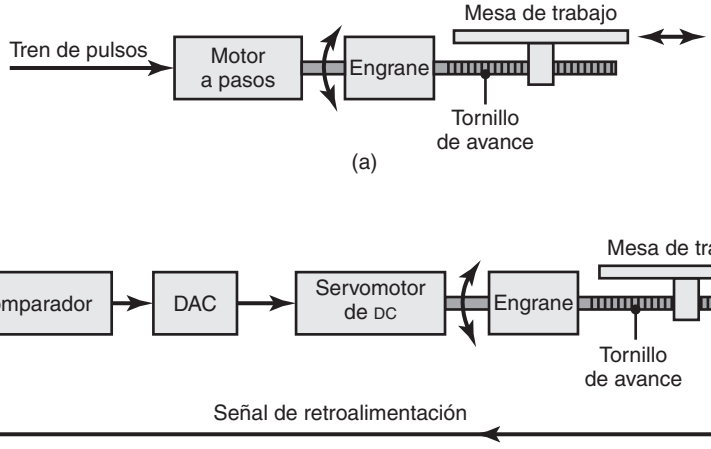


FIGURA 37.8 Esquema de los componentes de un sistema de control: *(a)* de lazo abierto, y *(b)* de lazo cerrado, para una máquina de control numérico. DAC significa "convertidor digital a analógico" (iniciales en inglés).

posiciones finales de la mesa de trabajo no se verifica la precisión. El sistema de **lazo cerrado** (fig. 37.8b) está equipado con diversos transductores, sensores y contadores que miden de manera precisa la posición de la mesa de trabajo. Mediante el **control de retroalimentación**, la posición de dicha mesa se compara con la señal, y los movimientos de la tabla terminan cuando se alcanzan las coordenadas adecuadas.

La **medición de posición** en las máquinas NC se realiza por medio de métodos indirectos o directos (fig. 37.9). En los *sistemas de medición indirecta*, los *codificadores* (*encoders*) *rotatorios* o *reductores* (*resolvers*) convierten el movimiento rotatorio en movimiento de traslación. Sin embargo, la zona muerta (el juego entre dos dientes de engranes de acoplamiento adyacente) puede afectar la precisión de la medición de manera significativa. Los mecanismos de retroalimentación de posición utilizan diversos sensores que se basan principalmente en principios magnéticos y fotoeléctricos. En los *sistemas de*

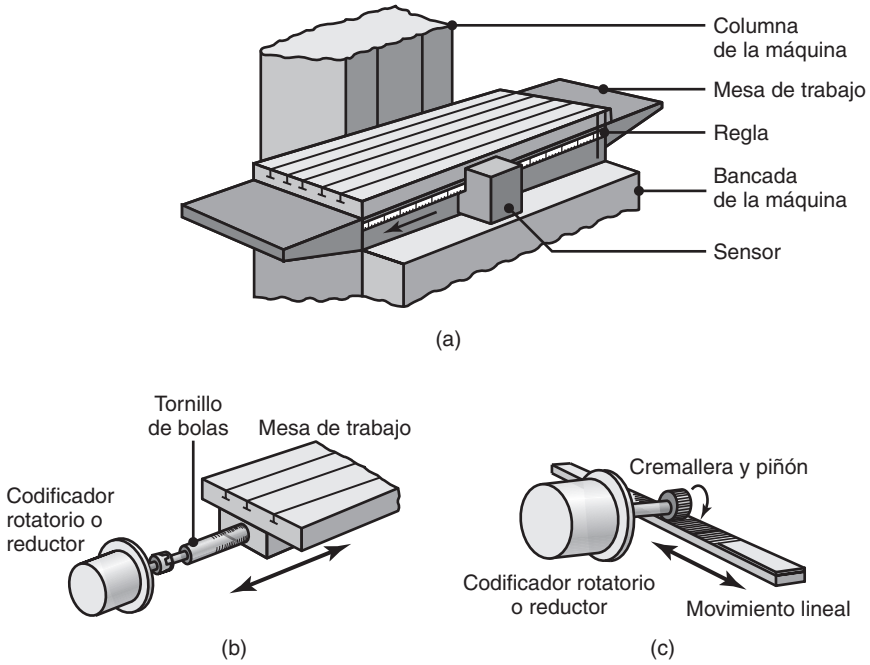


FIGURA 37.9 *(a)* Medición directa del desplazamiento lineal de la mesa de trabajo de una máquina herramienta. *(b)* y *(c)* Métodos de medición indirecta.

medición directa, un dispositivo de detección lee una regla graduada en la mesa de la máquina o en la corredera para producir un movimiento lineal (fig. 37.9c). Este sistema es el más preciso debido a que la regla se integra en la máquina y la zona muerta en los mecanismos no es significativa.

37.3.3 Tipos de sistemas de control

En el control numérico existen dos tipos básicos de sistemas de control: punto a punto y contorneado.

1. En un **sistema punto a punto** (también conocido como *sistema de posicionamiento*), cada uno de los ejes de la máquina se acciona por separado mediante tornillos de avance y a diferentes velocidades, dependiendo del tipo de operación. La máquina se mueve al principio a máxima velocidad para reducir el tiempo no productivo, pero se desacelera cuando la herramienta se aproxima a su posición definida numéricamente. Por lo tanto, en una operación como el taladrado de un orificio, posicionamiento y taladrado ocurren en secuencia (fig. 37.10a).

   Después de que se taladra el orificio, la herramienta se retira hacia arriba y se mueve con rapidez a la siguiente posición, donde la operación se repite. La trayectoria continua, de una posición a otra es importante sólo en un aspecto: debe seleccionarse para minimizar el tiempo de recorrido a fin de tener un mejor rendimiento. El sistema punto a punto se utiliza principalmente en las operaciones de taladrado, punzonado y fresado.
2. En un **sistema de contorneado** (también conocido como *sistema de trayectoria continua*), tanto el posicionamiento como las operaciones se realizan a lo largo de trayectorias controladas, pero a diferentes velocidades. Debido a que la herramienta actúa conforme avanza a lo largo de una trayectoria prescrita (fig. 37.10b), es importante el control preciso y la sincronización de velocidades y movimientos. Por lo general, el sistema de contorneado se utiliza en tornos, fresadoras, rectificadoras, soldadoras y centros de maquinado.

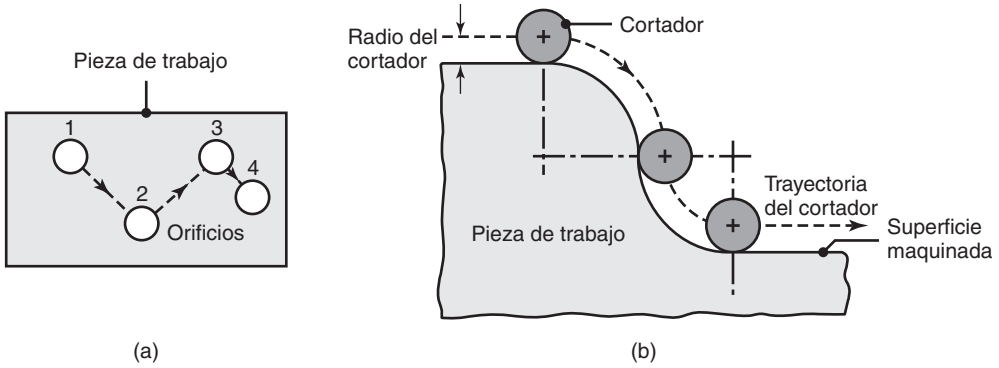


FIGURA 37.10 Movimiento de las herramientas en el maquinado de control numérico. *(a)* Punto a punto, en el que la broca perfora un orificio en la posición 1, se retrae y mueve a la posición 2 y así sucesivamente. *(b)* Trayectoria continua de una fresadora. Obsérvese que la trayectoria de la fresadora se compensa por el radio del cortador. Esta trayectoria también puede compensarse por desgaste del cortador.

Interpolación. El movimiento a lo largo de la trayectoria (*interpolación*) ocurre de manera progresiva mediante uno de los siguientes métodos (fig. 37.11). En la figura 37.12 se muestran ejemplos de trayectorias reales en las operaciones de taladrado, mandrinado y fresado. En todas las interpolaciones, la trayectoria controlada es la del *centro de rotación* de la herramienta. La compensación de diferentes tipos de herramientas, para distintos diámetros de herramientas o para desgaste de la herramienta durante el maquinado, puede realizarse en el programa NC.

- En la **interpolación lineal**, la herramienta se mueve en línea recta desde el inicio hasta el fin (fig. 37.11a) a lo largo de dos o tres ejes. En teoría, mediante este método se pueden fabricar todos los tipos de perfiles produciendo pequeños aumentos entre los puntos (fig. 37.11b). Sin embargo, se tiene que procesar una gran cantidad de datos para hacerlo.
- En la **interpolación circular** (fig. 37.11c), las entradas requeridas para la trayectoria son las coordenadas de los puntos finales, las coordenadas del centro del círculo y su radio y la dirección de la herramienta a lo largo del arco.
- En la **interpolación parabólica** o **interpolación cúbica,** la trayectoria se aproxima mediante curvas usando ecuaciones matemáticas de orden superior. Este método es efectivo en máquinas de cinco ejes y es útil en operaciones de estampado de dados o matrices, para formado de láminas de carrocerías automotrices. Estas interpolaciones también se emplean para los movimientos de los robots industriales, como se trata en la sección 37.6.

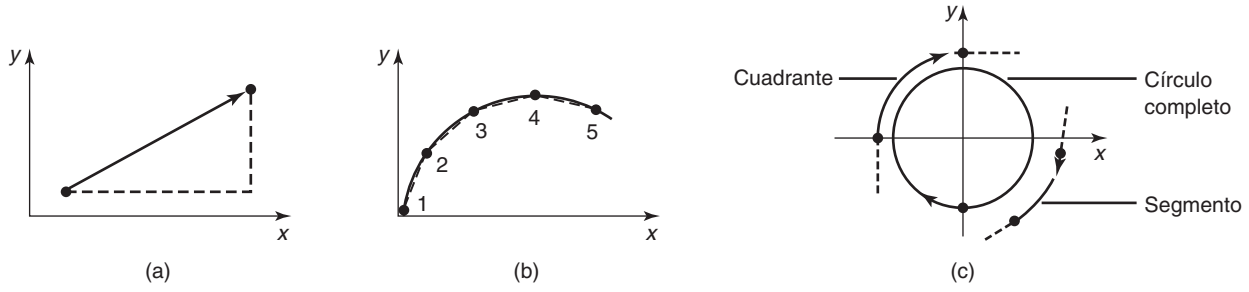


FIGURA 37.11 Tipos de interpolación en control numérico: *(a)* lineal, *(b)* trayectoria continua aproximada mediante líneas rectas adicionadas, y *(c)* circular.

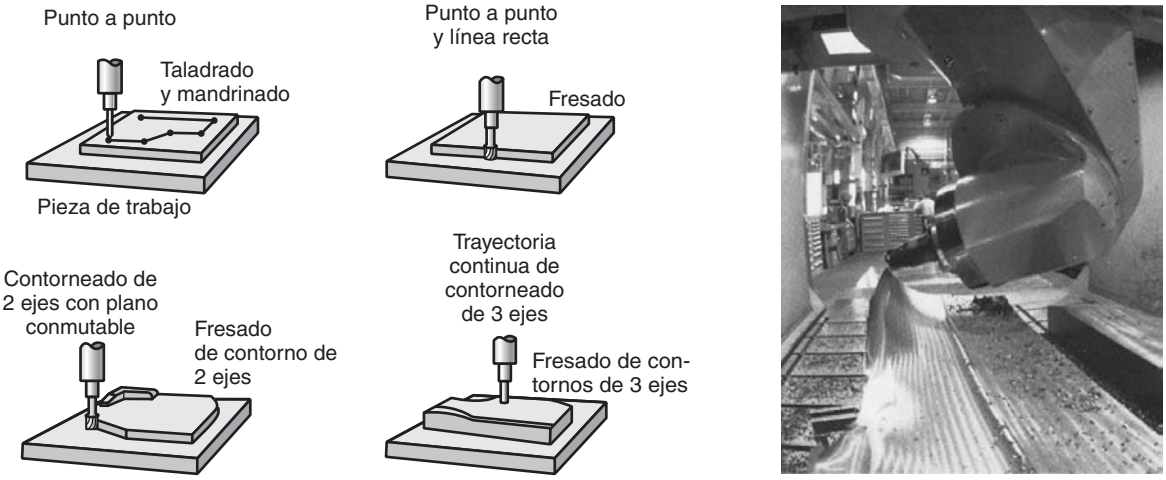


FIGURA 37.12 *(a)* Esquema de taladrado, mandrinado y fresado con diversas trayectorias. *(b)* Maquinado de una superficie esculpida en una máquina de control numérico de cinco ejes. *Fuente*: Cortesía de The Ingersoll Milling Machine Co.

37.3.4 Precisión en el control numérico

La *precisión del posicionamiento* en las máquinas de control numérico se define por la precisión con que la máquina puede posicionarse hasta cierto sistema de coordenadas. La *precisión de repetición* se define como la concordancia de los movimientos de posición repetidos en las mismas condiciones operativas de la máquina. La *resolución* (también llamada *sensibilidad*) es el incremento más pequeño de movimiento de los componentes de la máquina.

La *rigidez* de la máquina herramienta y el *juego* en los engranes transmisores y tornillos de avance son importantes para lograr la precisión dimensional. El juego en las máquinas modernas se elimina utilizando tornillos de bola precargados. Además, la rápida respuesta a las señales de los comandos requiere que se minimicen la fricción en las guías y la inercia; esto último se puede lograr reduciendo la masa de los componentes en movimiento de la máquina, como el uso de materiales de peso ligero, incluyendo cerámicos.

37.3.5 Ventajas y limitaciones del control numérico

El control numérico tiene las siguientes ventajas sobre los métodos convencionales de control de las máquinas:

- Se mejora la flexibilidad de la operación, así como la capacidad de producir formas complejas con buena precisión dimensional, buena repetibilidad, reducción en la pérdida por desperdicios, altas velocidades de producción, productividad y calidad de los productos.
- Se reducen los costos del herramental, debido a que no se requieren plantillas ni otros soportes fijos.
- Se facilita el ajuste de las máquinas.
- Se pueden realizar más operaciones con cada configuración y el tiempo requerido para el inicio y maquinado es menor en comparación con los métodos convencionales.
- Se pueden elaborar programas con rapidez y es posible reutilizarlos en cualquier momento mediante microprocesadores.
- Es posible producir prototipos con rapidez.
- La experiencia requerida del operador es menor que la de un maquinista calificado y aquél tiene más tiempo para atender otras tareas en el área de trabajo.

Las limitaciones principales del NC son el costo inicial relativamente alto del equipo, la necesidad y el costo del tiempo de programación y la computadora y el mantenimiento especial requerido. Debido a que estas máquinas son sistemas complejos, las descomposturas pueden ser costosas, así que el mantenimiento preventivo es fundamental.

37.3.6 Programación del control numérico

El programa de control numérico consta de una secuencia de direcciones que hace que una máquina NC realice cierta operación, siendo el maquinado el proceso más común. La *programación NC* se puede realizar (*a*) en un departamento de programación interna; (*b*) en el taller, o (*c*) comprarla de una fuente externa.

El programa contiene instrucciones y comandos. Las *instrucciones geométricas* corresponden a movimientos relativos entre la herramienta y la pieza de trabajo. Las *instrucciones de procesamiento* tienen que ver con las velocidades del husillo, avances, herramientas de corte, fluidos de corte y otros similares. Las *instrucciones de avance* corresponden al tipo de interpolación y a la velocidad de movimiento de la herramienta o la mesa de trabajo. Las *instrucciones de conmutación* se relacionan con la posición del encendido y apagado del suministro de refrigerante, dirección o falta de rotación del husillo, cambios de herramientas, avances de la pieza de trabajo, sujeción y otros similares.

La *programación manual de partes* consiste primero en calcular las relaciones dimensionales de la herramienta, la pieza de trabajo y la mesa de trabajo con base en los planos de ingeniería de la parte (incluyendo CAD), las operaciones de manufactura por realizar y su secuencia. Después se elabora una hoja de programa, detallando la información necesaria a fin de realizar la operación específica. Luego se prepara el programa de la parte con base en esta información. Sin embargo, el trabajo comprendido es tedioso, consume mucho tiempo y es poco económico. Por consiguiente, la programación manual se utiliza en su mayoría en aplicaciones simples de punto a punto. Con la disponibilidad más amplia de *software* de manufactura, la programación manual de partes cada vez se vuelve menos común.

La *programación de partes asistida por computadora* comprende *lenguajes de programación* simbólicos especiales que determinan los puntos de coordenadas de esquinas, bordes y superficies de la parte. Un **lenguaje de programación** es un medio de comunicación con la computadora; comprende el uso de caracteres simbólicos. El programador describe en este lenguaje el componente que se va a procesar y la computadora convierte dicha descripción en comandos para la máquina NC. Están disponibles comercialmente diversos lenguajes.

Las partes complejas se maquinan utilizando programas de maquinado basados en gráficos y asistidos por computadora. La trayectoria de una herramienta se crea en un ambiente muy gráfico que es similar a un programa de CAD. El programa crea en forma automática el código de la máquina (**Código G**). Este código es valioso para comunicar instrucciones de maquinado al *hardware* CNC, pero es difícil de editar y resolver problemas sin interpretadores de *software*. Cuando se encuentran dificultades menores, como (*a*) el uso de diámetros de fresas diferentes a los originalmente programados, o (*b*) el cambio de la velocidad de corte para evitar vibración; el operador de la máquina necesita modificar el programa, lo que es difícil utilizando el Código G.

En la *programación de piso de taller*, el *software* de programación CNC se utiliza directamente en el controlador de la máquina herramienta. Esto permite enviar geometría de nivel superior e información de procesamiento al controlador CNC en lugar del código G. Después se desarrolla este código mediante la computadora dedicada, bajo control del operador de la máquina. La ventaja es que cualquier cambio que se realice al programa de maquinado se envía de nuevo al grupo de programación, se almacena en una iteración de diseño probada en taller y puede reutilizarse o estandarizarse para las partes. Antes de iniciar la producción, se deben verificar los programas, ya sea viendo una simulación del proceso en un monitor o produciendo primero la parte con un material poco costoso, como aluminio, madera, cera o plástico.

37.4 Control adaptable

El *control adaptable* (AC, por sus siglas en inglés) es básicamente un sistema de retroalimentación dinámica en el que los parámetros operativos se adaptan en forma automática para ajustarse a nuevas circunstancias. Las reacciones humanas ante sucesos de la vida diaria también contienen un control de retroalimentación dinámica. Por ejemplo, conducir un auto en un camino sin obstáculos es, hasta cierto punto, fácil y se necesita hacer pocos ajustes (si existe alguno). Sin embargo, en un camino accidentado, quizá se tenga que conducir para evitar los baches observando continuamente la condición del camino. Además, nuestro cuerpo siente los movimientos bruscos y vibraciones del auto, por lo que reaccionamos cambiando la dirección o la velocidad del vehículo para minimizar los efectos del camino sinuoso y mejorar la comodidad del recorrido.

Un **controlador adaptable** verifica en forma continua las condiciones del camino, adapta un perfil de frenado apropiado y deseado (por ejemplo, un sistema de frenos antibloqueo y control de tracción) y después utiliza retroalimentación para implantarlo. El control adaptable es una extensión lógica de los sistemas de control numérico por computadora. Como se describe en la sección 37.3, el programador de partes establece los parámetros de procesamiento con base en el conocimiento existente acerca del material de la pieza de trabajo y diversos datos sobre el proceso específico de manufactura. En las máquinas CNC, estos parámetros se mantienen constantes durante un ciclo del proceso en particular. Por otro lado, en el control adaptable (AC), el sistema tiene la capacidad de ajustes automáticos *durante* el procesamiento mediante el control de retroalimentación de lazo cerrado (fig. 37.13). En el comercio existen disponibles diversos sistemas de control adaptables para una variedad de aplicaciones.

Control adaptable en la manufactura. La aplicación de AC en la manufactura es particularmente importante en situaciones en las que las dimensiones de la pieza de trabajo y la calidad no son uniformes, como en una fundición deficiente o una parte sometida de manera inapropiada a tratamiento térmico. Los propósitos principales del control adaptable en la manufactura son (*a*) optimizar la capacidad de producción; (*b*) optimizar la calidad de los productos, y (*c*) minimizar el costo de producción.

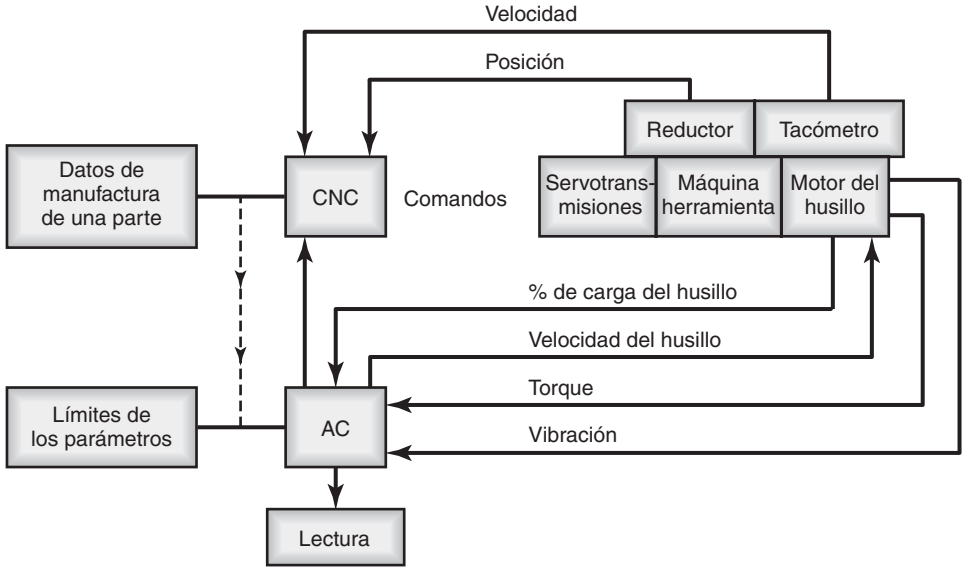


FIGURA 37.13 Esquema de la aplicación de control adaptable (AC) a una operación de torneado. El sistema supervisa parámetros como la fuerza de corte, torque y vibraciones. Si estos parámetros son excesivos, modifica las variables del proceso (como avance y profundidad de corte) para llevarlos nuevamente a niveles aceptables.

Como un ejemplo de control adaptable, considérese una operación de maquinado como el torneado en un torno. El sistema de control adaptable detecta parámetros *en tiempo real*, como fuerzas de corte, torque del husillo, temperatura, velocidad de desgaste de las herramientas, condición de las herramientas y acabado superficial de la pieza de trabajo. El sistema convierte esta información en comandos que después modifican los parámetros del proceso en la máquina herramienta a fin de mantenerlos constantes, dentro de ciertos límites, u optimizar la operación de maquinado.

Dichos sistemas, que ocupan una restricción en una variable del proceso (como fuerza, torque o temperatura), se conocen como sistemas de *restricción de control adaptable* (ACC, por sus siglas en inglés). Por lo tanto, si la fuerza de empuje y la fuerza de corte (y, por lo tanto, el torque) aumentan en forma excesiva (como por la presencia de una región dura en una pieza de trabajo fundida), el sistema cambia la velocidad o el avance para reducir la fuerza de corte a un nivel aceptable (fig. 37.14). Sin control adaptable o la intervención directa del operador (como es el caso en operaciones tradicionales de maquinado), las altas fuerzas de corte pueden provocar la falla en las herramientas o hacer que la pieza de trabajo se doble o distorsione en exceso. Como resultado, la precisión dimensional y el acabado superficial de la pieza de trabajo empiezan a deteriorarse. Los sistemas que optimizan una operación se conocen como sistemas de *optimización de control adaptable* (ACO, por sus siglas en inglés). La optimización puede comprender la maximización de la velocidad de remoción de material entre cambios de herramienta o mejorar el acabado superficial.

El tiempo de respuesta debe ser corto para que el AC sea efectivo, sobre todo en operaciones de maquinado de alta velocidad (ver sección 25.5). Por ejemplo, supóngase que se está realizando una operación de torneado en un torno a una velocidad de husillo de 1000 rpm y la herramienta se rompe de repente, afectando de manera adversa el acabado superficial y la precisión dimensional de la parte. Para que el sistema de AC sea efectivo, el sistema detector debe responder dentro de un tiempo muy corto, de lo contrario el daño a la pieza de trabajo puede ser extenso.

Para que el control adaptable sea efectivo en operaciones de manufactura, deben establecerse y guardarse relaciones cuantitativas en el *software* de la computadora como modelos matemáticos. Por ejemplo, si la velocidad de desgaste de la herramienta en una operación de maquinado es excesiva, la computadora debe tener la capacidad de decidir cuánto cambio es necesario en la velocidad o el avance (y si aumentarla o disminuirla) a fin de reducir la velocidad de desgaste a un nivel aceptable. El sistema también debe tener la capacidad de compensar cambios dimensionales en la pieza de trabajo debido a causas como desgaste de la herramienta y aumento de la temperatura (fig. 37.15).

Por ejemplo, si la operación es rectificado, el *software* de la computadora debe reflejar las relaciones cuantitativas deseadas entre las variables independientes del proceso (como velocidades del disco y trabajo, avance y tipo de disco) y parámetros dependientes (como desgaste del disco, desafilado de los granos abrasivos, fuerzas de rectificado,

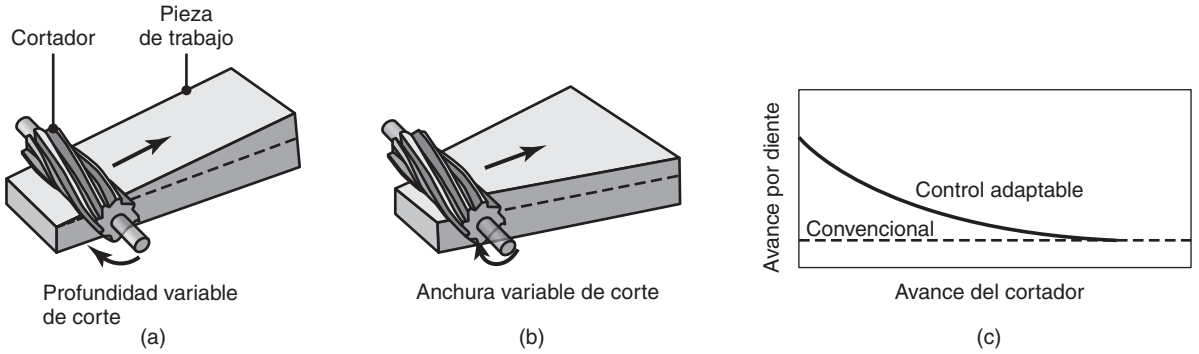


FIGURA 37.14 Ejemplo de control adaptable en fresado. Al aumentar *(a)* la profundidad de corte, o *(b)* la anchura de corte, las fuerzas de corte y el torque se incrementan. El sistema detecta este aumento y reduce automáticamente el avance *(c)* para evitar fuerzas excesivas o la ruptura de la herramienta y mantener la eficiencia del corte. *Fuente*: Y. Koren.

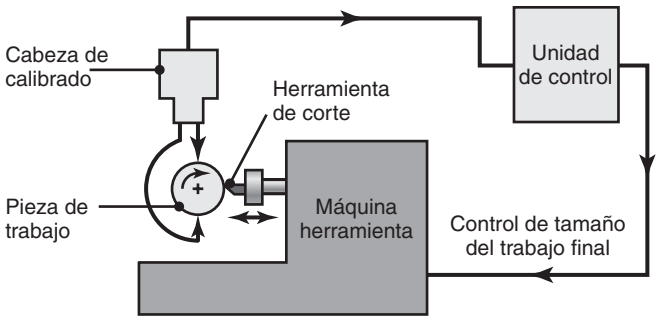


FIGURA 37.15 Inspección en proceso del diámetro de la pieza de trabajo en una operación de torneado. El sistema ajusta automáticamente la posición radial de la herramienta de corte para producir el diámetro correcto.

temperatura, acabado superficial y deflexiones de las partes). De manera similar, para el doblado de una lámina en una matriz o dado en V, los datos sobre la dependencia de la recuperación elástica respecto de la carrera del troquel y a otras variables de materiales y del proceso deben almacenarse en la memoria de la computadora.

En comparación con los demás parámetros comprendidos en las operaciones de manufactura, se ha encontrado que las fuerzas de corte y el torque del husillo en el maquinado son las más fáciles de supervisar mediante control adaptable. Están disponibles comercialmente diversos controles de potencia de estado sólido, en los que se indica la potencia o hace interfaz con sistemas de adquisición de datos. Acoplados con CNC, el control adaptable es una herramienta poderosa en la optimización de operaciones de manufactura.

37.5 Manejo y movimiento de materiales

Durante una operación común de manufactura, las materias primas y partes en proceso se mueven del almacén a las máquinas, de máquina a máquina, de inspección a ensamble e inventario y, por último, a embarque. Por ejemplo, (*a*) las piezas de trabajo se colocan en las máquinas, como la forja que se monta en la bancada de una fresadora para procesamiento adicional; (*b*) la lámina metálica se alimenta a una prensa para estampado; (*c*) las partes se retiran de una máquina y se colocan en otra (como una forja maquinada que se rectifica luego para mejorar el acabado superficial y la precisión dimensional), y (*d*) las partes terminadas se ensamblan en un producto final.

De manera similar, herramentales, moldes, matrices y muchos otros equipos y soportes fijos también se mueven dentro de las plantas de manufactura. Las herramientas de corte se montan en tornos, las matrices o dados se colocan en prensas o martillos, los discos de rectificado se montan en husillos y las partes se montan en soportes fijos especiales para medición dimensional e inspección.

Estos materiales deben moverse manualmente o por algunos medios mecánicos y requiere tiempo transportarlos de un lugar a otro. El **manejo de materiales** se define como las funciones y los sistemas asociados con la transportación, el almacenaje y el control de materiales y partes en el ciclo total de manufactura de un producto. El tiempo total requerido para la manufactura real depende del tamaño y la forma de la parte, así como de la configuración de las operaciones por realizar. También cabe hacer notar que el tiempo muerto o de ocio y el tiempo requerido para transportar materiales pueden constituir la mayoría del tiempo consumido.

La **distribución de la planta** es un aspecto importante del flujo ordenado de los materiales y los componentes a lo largo del ciclo de manufactura. Deben minimizarse el tiempo y las distancias requeridos para mover materias primas y partes, y tienen que organizarse de manera apropiada las áreas de almacenamiento y los centros de servicio. En el caso de las partes que requieren operaciones múltiples, el equipo debe agruparse

alrededor del operador o de un robot o robots industriales (ver *manufactura celular*, sección 39.2).

El manejo de los materiales debe ser una parte integral de la planeación, implantación y control de las operaciones de manufactura. Además, dicho manejo tiene que ser repetible y predecible. Por ejemplo, considérese qué sucedería si una parte o pieza de trabajo se alimenta de manera inapropiada en una matriz o dado para forja, un mandril o *chuck*, o una boquilla en un torno. Las consecuencias de tal acción bien podrían ser partes que quedaran fuera de la tolerancia dimensional, matrices y herramentales rotos y partes fabricadas en forma inadecuada. Esta acción también puede presentar riesgos de seguridad.

Métodos de manejo de materiales. Al seleccionar un método adecuado de manejo de materiales para una operación específica de manufactura, se tienen que considerar diversos factores:

1. Forma, peso y características de las partes.
2. Tipos y distancias de movimientos, posición y orientación de las partes durante el movimiento y al final de su destino.
3. Condiciones de la trayectoria a lo largo de la cual se transportan las partes.
4. Grado de automatización, nivel de control deseado e integración con otros sistemas y equipo.
5. Habilidad requerida del operador.
6. Consideraciones económicas.

En caso de operaciones de manufactura de lotes pequeños, las materias primas y partes se pueden manejar y transportar en forma manual, pero por lo común este método es costoso. Además, debido a que comprende la participación humana, esta práctica puede ser impredecible y poco confiable. Incluso sería insegura para el operador debido al peso y la forma de las partes a mover y los factores ambientales (como calor y humo) en fundidoras y plantas de forja. Es usual que en las plantas de manufactura automatizadas se implante el flujo de material y partes controlado por computadora. Estos cambios producen una mejor repetibilidad y, por supuesto, menores costos de mano de obra.

Equipo. Se pueden utilizar diversos tipos de equipo para mover materiales, como transportadores o bandas transportadoras, rodillos, monorrieles con impulso propio, carros, montacargas y diversos dispositivos y manipuladores mecánicos, eléctricos, magnéticos, neumáticos e hidráulicos. Los *manipuladores* se pueden diseñar para que los controle directamente el operador, o bien automatizarlos para operaciones repetitivas (como la carga y descarga de partes en máquinas herramienta, prensas y hornos). Los manipuladores tienen la capacidad de sujetar y mover partes pesadas y orientarlas según se requiera entre las operaciones de manufactura y ensamble. Con frecuencia, las máquinas se usan en una secuencia, de manera que las piezas de trabajo se transfieren en forma directa de máquina a máquina. A las combinaciones de maquinaria que tienen la capacidad de transportar partes sin el uso de aparatos adicionales de manejo de materiales se les llama *dispositivos integrales de transferencia*.

El manejo y movimiento flexible de materiales con control de tiempo real se ha convertido en una parte integral de la manufactura moderna. Los robots industriales, tarimas (*pallets*) especialmente diseñadas, y los **vehículos guiados automáticamente** (AGV, por sus siglas en inglés) se utilizan en gran medida en los sistemas flexibles de manufactura para mover partes y orientarlas según se requiera (fig. 37.16).

Los vehículos guiados automáticamente (que son el último desarrollo en el movimiento de materiales en plantas) operan de manera automática a lo largo de trayectorias con cableado en el piso (o con cintas para reconocimiento óptico) sin intervención del operador. Este sistema de transporte tiene alta flexibilidad y la capacidad de distribuir en forma aleatoria a diferentes estaciones de trabajo. Optimiza el movimiento de materiales y partes en casos de congestión alrededor de las estaciones de trabajo, descompostura de máquinas (tiempo muerto) o la falla de una sección del sistema.

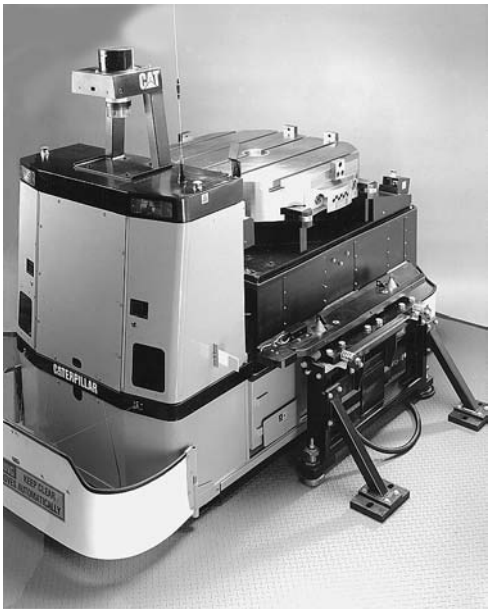


FIGURA 37.16 Vehículo autoguiado (Caterpillar Modelo SGC-M) que porta una tarima (*pallet*) de maquinado. El vehículo se alinea junto a una plataforma en el piso. En lugar de seguir una trayectoria de cable o cinta en el piso de la fábrica, este vehículo calcula su propia trayectoria y corrige automáticamente cualquier desviación. *Fuente*: Cortesía de Caterpillar Industrial, Inc.

Los movimientos de los AGV se planean de manera que se combinen con los **sistemas de almacenamiento y recuperación** (AS/AR, por sus siglas en inglés) para utilizar el espacio del almacén de manera eficiente y reducir los costos de mano de obra. Sin embargo, en la actualidad, estos sistemas se consideran inconvenientes debido al enfoque actual en pos del inventario mínimo y los métodos de producción *justo a tiempo* (ver sección 39.5.)

A continuación se resumen los sistemas de codificación que se han desarrollado para localizar e identificar partes por medio del sistema de manufactura y transferirlas a sus estaciones apropiadas:

- Los **códigos de barras** son el sistema más utilizado y el menos costoso.
- Las **cintas magnéticas** constituyen el segundo sistema de codificación más común.
- Las **etiquetas de RF** (radiofrecuencia) son populares. Aunque costosas, no necesitan la clara línea de visión que requieren los dos sistemas anteriores, tienen un amplio alcance y se pueden reescribir.
- Otros sistemas de identificación se basan en **ondas acústicas**, **reconocimiento de caracteres ópticos** y **sistemas mecánicos de visión.**

37.6 Robots industriales

En 1920, el autor checo K. Capek acuñó el término **robot** en su obra *R.U.R.* (Robots Universales de Rossum). Se deriva de la palabra checa *robota*, que significa "trabajador". La International Organization for Standardization (ISO) describe a un **robot industrial** como una "máquina formada por un mecanismo que incluye varios grados de libertad,

que a menudo tiene la apariencia de uno o varios brazos que terminan en una muñeca con la capacidad de sujetar una herramienta, una pieza de trabajo, o un dispositivo de inspección". En particular, su unidad de control debe utilizar un dispositivo de memorización y en algunas ocasiones puede usar dispositivos de detección o adaptación a fin de considerar el ambiente y las circunstancias. Por lo general, estas máquinas de propósito múltiple están diseñadas para realizar una función repetitiva y se pueden adaptar a otras operaciones.

Los primeros robots industriales se introdujeron a principios de la década de 1960. Los robots controlados por computadora se comercializaron una década después y el primer robot controlado por una microcomputadora apareció en 1974. Los robots industriales se utilizaron por primera vez en operaciones de riesgo (para el manejo de materiales tóxicos y radioactivos, por ejemplo) y la carga y descarga de piezas de trabajo calientes de hornos y en fundidoras. Aplicaciones simples, empíricas de robots son las "tres D" (por sus siglas en inglés, *dull, dirty and dangerous*: tareas *aburridas, sucias* y *peligrosas*, incluyendo *degradantes*, pero necesarias) y las tres H (por sus siglas en inglés, *hot, heavy and hazardous*: *calientes*, *pesadas* y *riesgosas*).

Los robots industriales se han convertido en componentes básicos en los procesos y sistemas de manufactura. Han ayudado a mejorar la productividad y calidad de los productos y han reducido de manera significativa los costos de mano de obra. Algunos robots modernos son *los antropomorfos*, lo que significa que se asemejan a los humanos en cuanto a forma y movimiento. Estos mecanismos complejos se hacen posibles mediante poderosos procesadores de computadoras y motores rápidos que pueden mantener el equilibrio de un robot y el control preciso de los movimientos.

37.6.1 Componentes de un robot

Para apreciar las funciones de los componentes de un robot y sus capacidades, se pueden observar de manera simultánea la flexibilidad y capacidad de diversos movimientos de nuestro propio brazo, muñeca, mano y dedos para alcanzar y sujetar un objeto en un estante, para utilizar una herramienta manual o para operar un automóvil o una máquina. A continuación se describen los componentes básicos de un robot industrial (fig. 37.17).

Manipulador. También conocido como **brazo y muñeca**, el *manipulador* es una unidad mecánica que proporciona movimientos (trayectorias) similares a las de un brazo y mano humanos. El extremo de la muñeca puede alcanzar un punto en el espacio que tiene un conjunto específico de coordenadas y en una orientación específica. La mayoría de los robots tienen seis articulaciones giratorias. También existen con siete grados de libertad o robots *redundantes* para aplicaciones especiales.

Efector final. El extremo de la muñeca en un robot está equipado con un *efector final*, que también se conoce como *herramienta de extremo del brazo*. Dependiendo del tipo de operación, los efectores finales convencionales pueden equiparse con lo siguiente (fig. 37.18):

- Sujetadores (*grippers*), ganchos, paletas, electroimanes, copas de vacío y dedos adhesivos para manejo de materiales.
- Pistolas de rocío de pintura.
- Accesorios para soldadura por puntos y por arco y para corte por arco.
- Herramientas de potencia (como taladros, llaves de tuercas y rebabeadoras).
- Instrumentos de medición.

Por lo general, los efectores finales se fabrican a la medida para satisfacer requisitos específicos de manejo. Es más común utilizar sujetadores mecánicos, que están equipados con dos o más dedos. Se usan *efectores finales compatibles* para manejar materiales frágiles o facilitar el ensamble. Estos efectores finales pueden emplear mecanismos elásticos para limitar la fuerza que es posible aplicar a la pieza de trabajo, o diseñarse con la rigidez

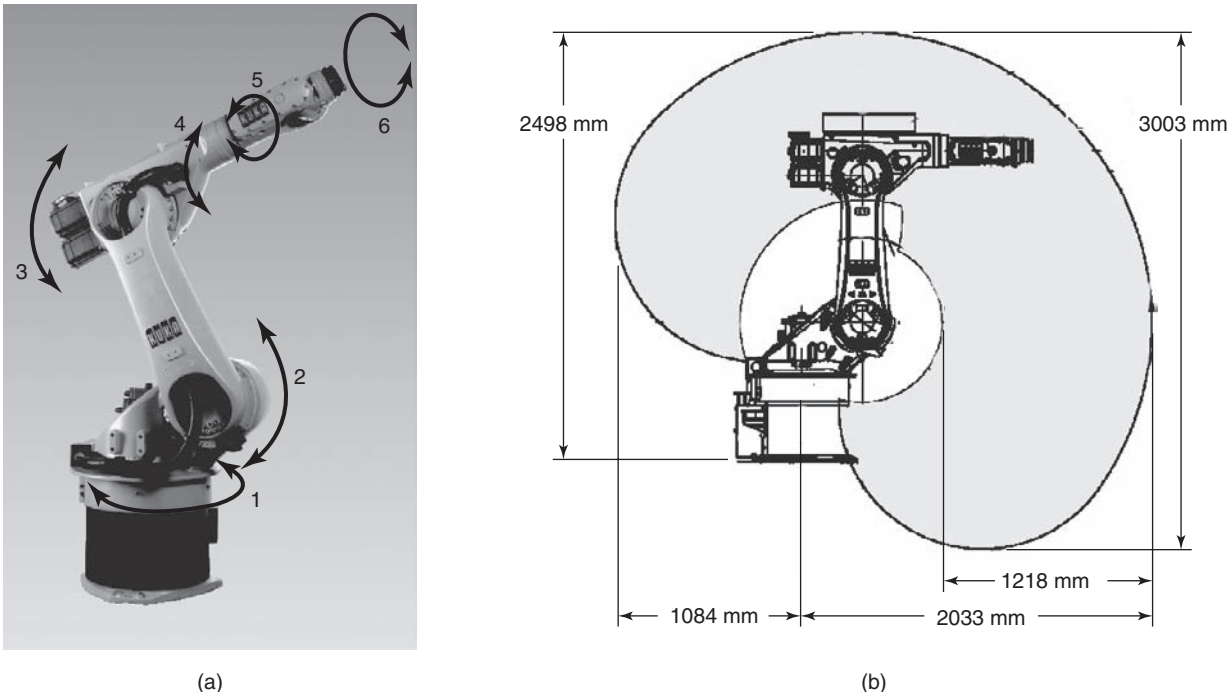


FIGURA 37.17 *(a)* Esquema de un robot de 6 ejes KR-30 KUKA. La carga útil en la muñeca es de 30 kg y la repetibilidad es ±0.15 mm (±0.006 pulg). El robot tiene frenos mecánicos en todos sus ejes, que se acoplan directamente. *(b)* Envolvente del robot, vista lateral. *Fuente*: Cortesía de KUKA Robotics Corp.

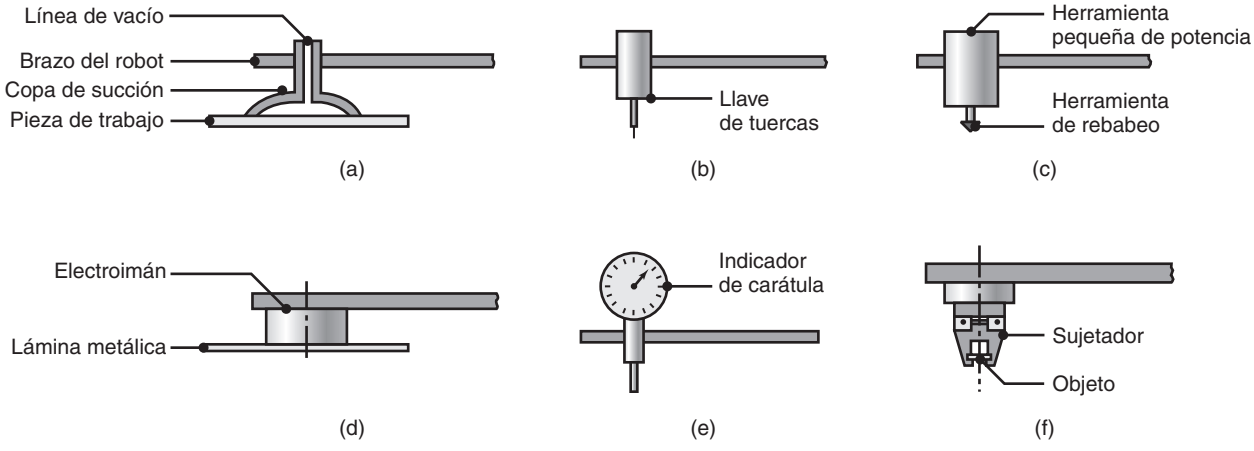


FIGURA 37.18 Tipos de dispositivos y herramientas sujetos a efectores finales para realizar una variedad de operaciones.

deseada. La selección de un efector final apropiado para una aplicación específica depende de factores como la carga útil, el ambiente, la confiabilidad y el costo.

Fuente de potencia. Cada movimiento del manipulador (lineal o rotacional) se controla y regula mediante actuadores independientes que utilizan una fuente de potencia eléctrica, neumática o hidráulica. Cada fuente de energía y cada tipo de motor tiene sus propias características, ventajas y limitaciones.

Sistema de control. También conocido como *controlador,* el sistema de control es el sistema de comunicaciones y procesamiento de información que proporciona comandos para los movimientos del robot. Se trata del cerebro del robot y almacena datos para iniciar y terminar movimientos del manipulador. El sistema de control también funciona como *nervios* del robot; sirve de interfaz con las computadoras y otros equipos, como celdas de manufactura y sistemas de ensamble.

Los *dispositivos de retroalimentación* (como los transductores) son parte importante del sistema de control. Los robots con una serie fija de movimientos tienen *control de lazo abierto*. En este sistema, se proporcionan comandos y el brazo del robot realiza los movimientos. A diferencia de la retroalimentación en los *sistemas de lazo cerrado*, no se supervisa la precisión de los movimientos. Por consiguiente, este sistema no tiene capacidad de autocorrección.

Como en las máquinas de control numérico, los tipos de control en robots industriales son punto a punto o de trayectoria continua. Dependiendo de la tarea en particular, la repetibilidad del posicionamiento requerido puede ser hasta de 0.050 mm (0.002 pulgada), como en operaciones de ensamble para circuitos impresos electrónicos. Los robots especializados pueden alcanzar dicha precisión. La precisión y repetibilidad varían en gran medida con la carga útil y la posición dentro del envolvente de trabajo y, como tales, son difíciles de cuantificar para la mayoría de los robots.

37.6.2 Clasificación de los robots

Los robots se pueden clasificar por tipo básico de la siguiente manera (fig. 37.19):

a. Cartesiano o rectilíneo.
b. Cilíndrico.
c. Esférico o polar.
d. Articulado, de revolución, de geometría unida, o antropomorfo.

Los robots se pueden sujetar de manera permanente al piso de la planta de manufactura, moverse a lo largo de rieles aéreos (*robots de pórtico o gantry robots*), o equiparse con ruedas para moverlos por el piso de la fábrica (*robots móviles*). Sin embargo, una clasificación más amplia de robots actualmente en uso es la más útil para nuestro propósito aquí, como se describe a continuación.

Robots de secuencia fija y variable. El robot de secuencia fija (también conocido como *robot de selección y colocación, pick and place robot*) se programa para una secuencia específica de operaciones. Sus movimientos son de punto a punto y el ciclo se repite de manera continua. Estos robots son simples y relativamente poco costosos. El robot de secuencia variable puede programarse para una secuencia específica de operaciones, pero también es posible reprogramarlo para formar otra secuencia de operaciones.

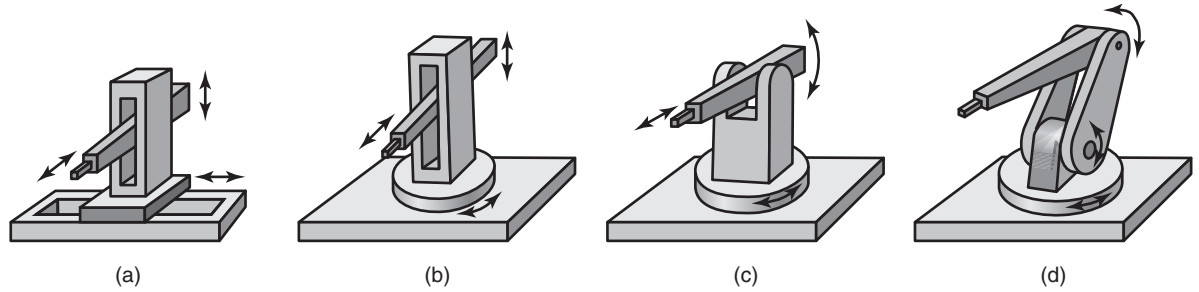


FIGURA 37.19 Cuatro tipos de robots industriales: *(a)* cartesiano (rectilíneo); *(b)* cilíndrico; *(c)* esférico (polar), y *(d)* articulado (de revolución, geometría unida, o antropomorfo).

Robot reproductor de movimientos. Un operador conduce o hace que un robot reproductor de movimientos y su efector final recorran la trayectoria deseada; en otras palabras, el operador enseña al robot mostrándole qué hacer. El robot registra la trayectoria y la secuencia de movimientos y puede repetirlos de manera continua sin ninguna otra acción o guía por parte del operador. Otro tipo es el de **terminal de control remoto** (*teach pendant*), el cual utiliza botoneras manuales que se conectan al tablero de control; se usan para controlar y guiar al robot y sus herramientas a través del trabajo por realizar. Después, estos movimientos se registran en la memoria del controlador y el robot los ejecuta de manera automática siempre que se requiere.

Robot controlado numéricamente. El robot controlado numéricamente se programa y acciona más como una máquina controlada numéricamente. El robot se servocontrola mediante datos digitales y se puede cambiar su secuencia de movimientos con relativa facilidad. Como en las máquinas NC, existen dos tipos básicos de controles: punto a punto y trayectoria continua.

Los robots de *punto a punto* se pueden controlar con facilidad y tienen mayor capacidad de transporte de carga y un **envolvente de trabajo** más grande, que es la máxima extensión o alcance de la mano del robot o herramienta de trabajo en todas las direcciones (fig. 37.20). Los robots de trayectoria continua tienen mayor precisión que los que son punto a punto, pero su capacidad de transporte de carga es menor. Los robots avanzados tienen un sistema complejo de control de trayectoria, ejecutando movimientos de alta velocidad con mayor precisión.

Robot inteligente (sensorial). El robot inteligente tiene la capacidad de efectuar algunas de las funciones y tareas realizadas por humanos. Está equipado con varios sensores con capacidades *visuales* (*visión por computadora*) y *táctiles o de contacto* (ver sección 37.7). De manera muy similar a los humanos, el robot observa y evalúa el ambiente inmediato y su proximidad a otros objetos, en particular maquinaria, por percepción y reconocimiento de patrones. Después toma las decisiones apropiadas para el siguiente movimiento y procede en forma apropiada. Debido a que su operación es más compleja, se requieren computadoras poderosas para controlar este tipo de robot.

Algunos desarrollos en robots inteligentes incluyen:

- Comportarse como humanos, efectuar tareas como moverse entre una variedad de máquinas y equipo en el piso de un taller y evitar colisiones.

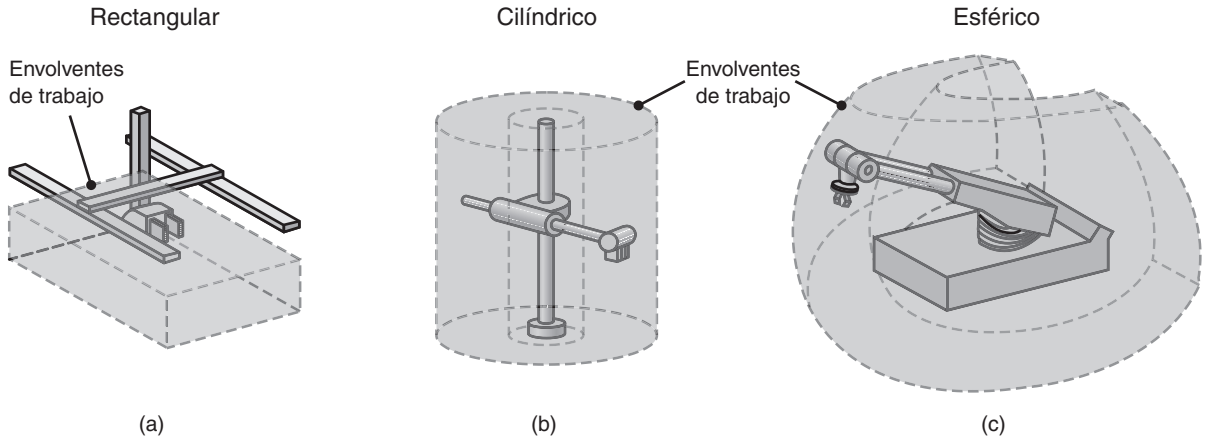


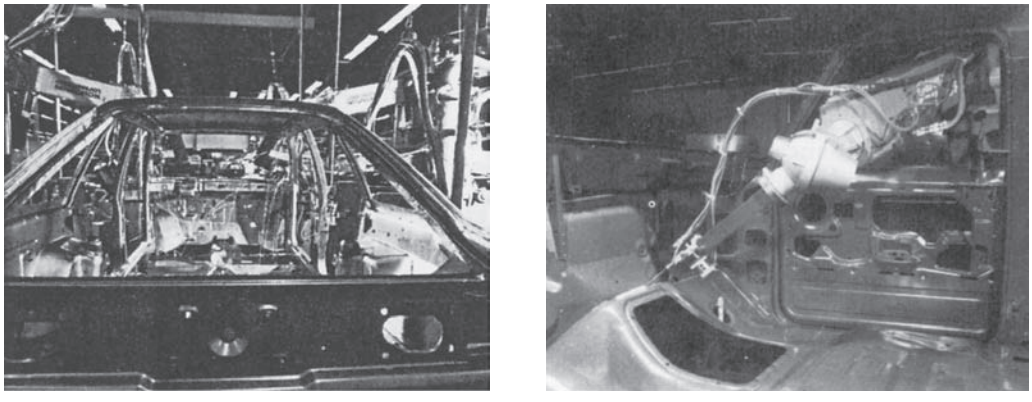
FIGURA 37.20 Envolventes de trabajo de tres tipos de robots. La elección depende de la aplicación específica. (Ver también fig. 37.17b.)

- Reconocer, seleccionar y sujetar apropiadamente la materia prima o pieza de trabajo correcta.
- Transportar la parte a una máquina para procesamiento adicional o inspección.
- Ensamblar los componentes como subensambles o un producto final.

37.6.3 Aplicaciones y selección de robots

Las principales aplicaciones de los robots industriales incluyen las siguientes:

- Manejo de materiales, consistente en la carga, descarga y transferencia de piezas de trabajo en las instalaciones de manufactura. Estas operaciones se pueden realizar de manera confiable y repetida con robots, mejorando así la calidad y reduciendo pérdidas por desperdicios. Algunos ejemplos son: (*a*) operaciones de fundición y moldeado en las que el metal fundido, las materias primas, los lubricantes y las partes en diversas etapas de terminación se manejan sin la interferencia del operador; (*b*) operaciones de tratamiento térmico, en las que las partes se cargan y descargan de los hornos y baños de enfriamiento; (*c*) operaciones de formado, en las que las partes se cargan y descargan de prensas y muchos otros tipos de maquinaria para trabajo mecánico.
- La soldadura por puntos une carrocerías para automóviles y camiones, produciendo soldaduras de buena calidad (fig. 37.21a). Los robots también efectúan otras operaciones similares, como soldadura por arco, corte por arco y remachado.
- Se pueden realizar operaciones como rebabeo, rectificado y pulido utilizando herramientas apropiadas sujetas a los efectores finales.
- Aplicación de adhesivos y selladores, como en el chasis automovilístico mostrado en la figura 37.21b.
- Las operaciones de limpieza y pintado por rociado (en particular de formas complejas) son aplicaciones frecuentes, porque los movimientos de una pieza se repiten de manera precisa para la siguiente pieza.
- Ensamble automatizado (fig. 37.22).
- Inspección y calibración a velocidades mucho más altas que las que pueden lograr los humanos.



(a) (b)

FIGURA 37.21 Ejemplos de aplicaciones de robots industriales. *(a)* Soldadura por puntos de carrocerías automotrices con robots industriales. *(b)* Uniones de sellado de una carrocería automotriz con un robot industrial. *Fuente*: Cortesía de Cincinnati Milacron, Inc.

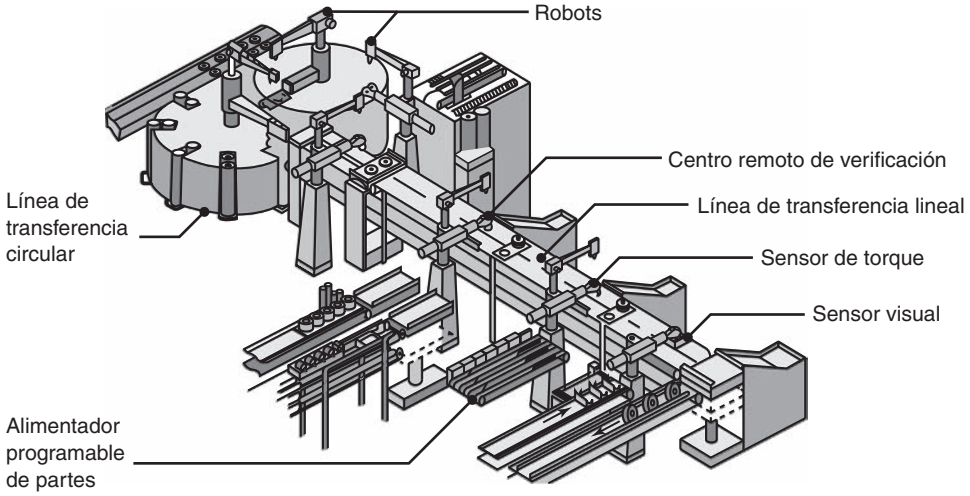


FIGURA 37.22 Operaciones de ensamble automatizado utilizando robots industriales y líneas de transferencia circulares y lineales.

Selección de robots. Los factores que influyen en la selección de robots en la manufactura son los siguientes:

- Capacidad de transporte de carga.
- Velocidad de movimiento.
- Confiabilidad.
- Repetibilidad
- Configuración de los brazos.
- Grados de libertad.
- Sistema de control.
- Memoria del programa.
- Envolvente o volumen de trabajo (ver fig. 37.17b).

Economía. Además de los factores técnicos, las consideraciones de costos y beneficios también son aspectos significativos en la selección y el uso de robots. La capacidad y confiabilidad crecientes y los costos reducidos de robots sofisticados e inteligentes han tenido un impacto económico importante en las operaciones de manufactura. Dichos robots están desplazando gradualmente la mano de obra humana.

Seguridad del robot. Dependiendo del tamaño del envolvente de trabajo, la velocidad y la proximidad del robot a los humanos, son importantes las consideraciones de seguridad en el ambiente del robot, sobre todo para los programadores y el personal de mantenimiento que se encuentran en interacción física directa con los robots. Además, el movimiento del robot respecto de otra maquinaria exige un alto nivel de confiabilidad para evitar colisiones y daños al equipo. Sus actividades de manejo de materiales requieren el aseguramiento apropiado de las materias primas y partes en el sujetador (*gripper*) del robot en diversas etapas en la línea de producción.

37.7 Tecnología de sensores

Un *sensor* es un dispositivo que produce una señal en respuesta a su detección, o medición, de una propiedad, como posición, fuerza, torque, presión, temperatura, humedad,

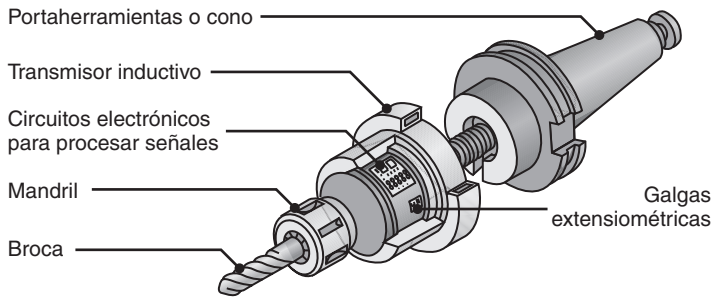


FIGURA 37.23 Portaherramientas equipado con sensores de fuerza de empuje y torque (portaherramientas inteligente), con la capacidad de supervisar de manera continua la operación de corte. Dichos portaherramientas son necesarios para el control adaptable de operaciones de manufactura. *Fuente*: Cortesía de Cincinnati Milacron, Inc.

velocidad, aceleración, o vibración. Tradicionalmente, se han utilizado sensores (como actuadores e interruptores) para establecer límites en el desempeño de las máquinas. Ejemplos comunes son (*a*) los topes en las máquinas herramienta para restringir los movimientos de la mesa de trabajo; (*b*) los calibradores de presión y temperatura con características de paro automático, y (*c*) gobernadores de motores para evitar exceso de velocidad en la operación. La tecnología de los sensores se ha vuelto un aspecto importante de los procesos y sistemas de manufactura. Es fundamental para la adquisición apropiada de datos y la supervisión, comunicación y control por computadora de máquinas y sistemas (fig. 37.23).

Debido a que convierten una cantidad a otra, con frecuencia a los sensores se les llama *transductores*. Los *sensores analógicos* producen una señal, como voltaje, que es proporcional a la cantidad medida. Los *detectores digitales* tienen salidas numéricas o digitales que se pueden transferir directamente a las computadoras. Existen **convertidores analógicos a digitales** (ADC, por sus siglas en inglés) para interfaces de sensores analógicos con computadoras.

37.7.1 Clasificación de los sensores

En general, los sensores que son de interés en la manufactura se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Los sensores **mecánicos** miden cantidades como posición, forma, velocidad, fuerza, torque, presión, vibración, deformación y masa.
- Los sensores **eléctricos** miden voltaje, corriente, carga y conductividad.
- Los sensores **magnéticos** miden campo magnético, flujo y permeabilidad.
- Los sensores **térmicos** miden temperatura, flujo, conductividad y calor específico.
- Otros tipos son los *acústicos, ultrasónicos, químicos, ópticos, de radiación, láser y fibra óptica.*

Dependiendo de su aplicación, un sensor puede constar de materiales metálicos, no metálicos, orgánicos o inorgánicos, además de fluidos, gases, plasmas o semiconductores. Utilizando las características especiales de estos materiales, los sensores convierten la cantidad o propiedad medida a salida analógica o digital. Por ejemplo, la operación de un termómetro ordinario de mercurio se basa en la diferencia entre la dilatación térmica de ese metal y la del vidrio.

De manera similar, se puede detectar parte de una máquina, una obstrucción física o una barrera en un espacio, rompiendo el haz de luz cuando se capta por medio de una celda fotoeléctrica. Un *sensor de proximidad* (que detecta y mide la distancia entre éste y un objeto o miembro móvil de una máquina) se puede basar en la acústica, magnetismo, capacitancia, u óptica. Otros actuadores entran en contacto con el objeto y toman la

acción apropiada (por lo general, medios electromecánicos). Los sensores son fundamentales para controlar los robots inteligentes y se están desarrollando con capacidades que se asemejan a las de los humanos (*sensores inteligentes*, ver lo siguiente).

Detección táctil. La detección táctil es la detección continua de fuerzas variables de contacto, por lo común mediante una variedad de sensores. Dicho sistema es capaz de funcionar dentro de un espacio arbitrario tridimensional. Se pueden manejar partes frágiles (como botellas de vidrio y dispositivos electrónicos) mediante robots con *efectores finales compatibles* (*inteligentes*) (fig. 37.24). Estos efectores pueden detectar la fuerza aplicada al objeto que se está manejando mediante dispositivos piezoeléctricos, calibradores de deformación, inducción magnética, sistemas ultrasónicos y ópticos de fibras ópticas y diodos emisores de luz.

La fuerza detectada se supervisa y controla mediante dispositivos de retroalimentación de lazo cerrado. Los sujetadores compatibles que tienen retroalimentación de fuerza y percepción sensorial son complicados y requieren computadoras poderosas. Los *efectores finales antropomorfos* están diseñados para simular la mano y los dedos humanos y tener la capacidad de detectar el tacto, la fuerza y el movimiento. El detector táctil ideal también debe percibir el *deslizamiento*; una capacidad de los dedos y la mano humanos que tiende a pasarse por alto.

Detección visual. (*visión de la máquina, visión de la computadora*). En la detección visual, las cámaras detectan ópticamente la presencia y forma del objeto (fig. 37.25). Después un microprocesador procesa la imagen (por lo general, en menos de un segundo), la mide y las mediciones se digitalizan (**reconocimiento de imágenes**). Existen dos sistemas básicos de visión de la máquina: arreglo lineal y arreglo matricial.

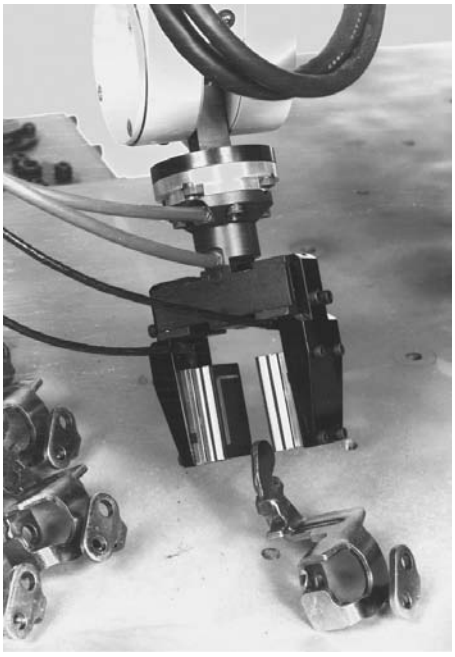


FIGURA 37.24 Sujetador robótico con detectores táctiles o de contacto. A pesar de sus capacidades, los detectores táctiles o de contacto se utilizan con menos frecuencia debido a su alto costo y baja durabilidad en ambientes industriales. *Fuente*: Cortesía de Lord Corporation.

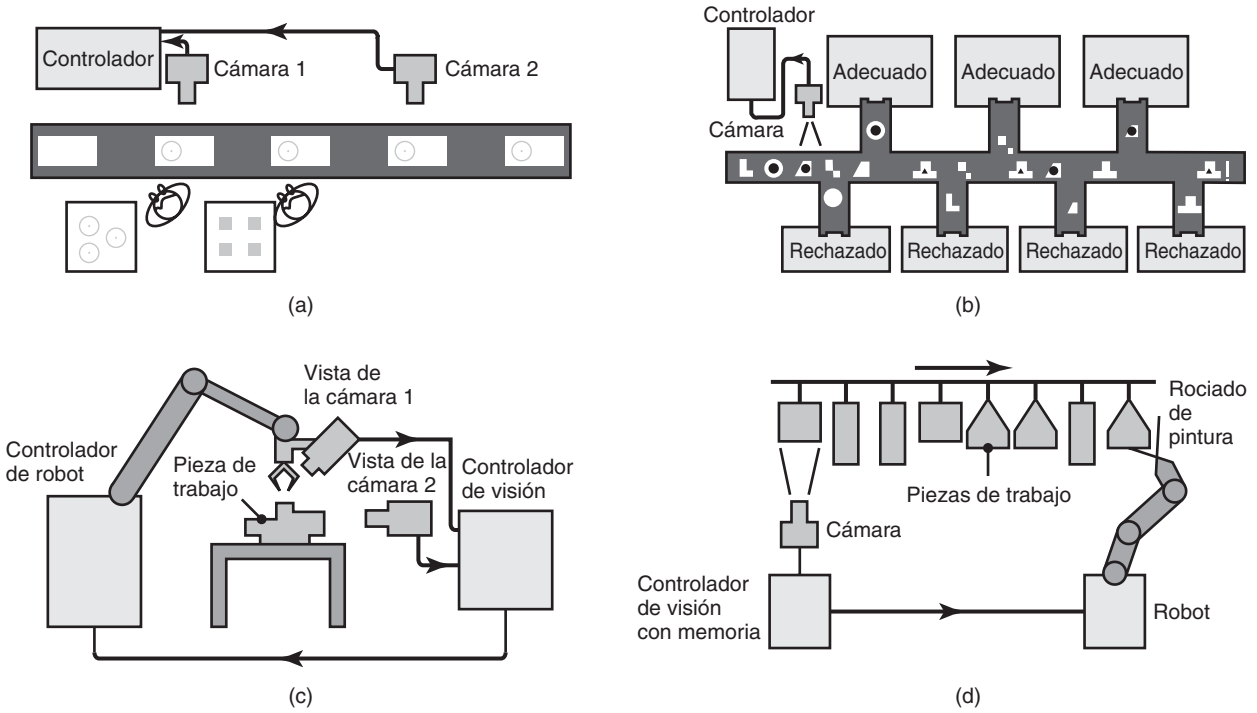


FIGURA 37.25 Ejemplos de aplicaciones de visión de una máquina. *(a)* Inspección en línea de las partes. *(b)* Identificación de partes con diversas formas e inspección y rechazo de partes defectuosas. *(c)* Uso de cámaras para proporcionar la posición inicial a un robot en relación con la pieza de trabajo. *(d)* Pintado de partes que tienen diferentes formas por medio de la entrada de una cámara. La memoria del sistema permite que el robot identifique la forma específica a pintar y proceda con los movimientos correctos de rociado de pintura sujeto al efector final.

En el *arreglo lineal*, sólo se detecta (sensa) una dimensión, como la presencia de un objeto o algún rasgo sobre su superficie. Los *arreglos matriciales* detectan dos o incluso tres dimensiones, por ejemplo, un componente insertado de manera apropiada en un circuito impreso o una unión de soldadura realizada en forma adecuada (verificación de ensamble). Cuando se utilizan en sistemas de inspección automatizados, estos sensores también pueden detectar grietas y defectos.

La visión de la máquina es adecuada sobre todo para partes inaccesibles, en ambientes de manufactura hostiles, a fin de medir una gran cantidad de pequeños rasgos y en situaciones en las que el contacto físico con la parte puede provocar daño. Las aplicaciones de visión de la máquina incluyen: (*a*) inspección en línea de tiempo real en líneas de estampado de lámina metálica, y (*b*) sensores para máquinas herramienta que pueden detectar la compensación de la herramienta y la ruptura de la misma, verificar la colocación y fijación de las partes y supervisar el acabado superficial.

La visión de la máquina tiene la capacidad de identificación en línea e inspección de partes y de rechazo de las defectuosas. En la figura 37.25 se muestran diversas aplicaciones de visión de la máquina en la manufactura. Con capacidades de detección visual, los efectores finales tienen la habilidad de recoger partes y sujetarlas en la orientación y ubicación apropiadas.

La selección de un sensor para una aplicación específica depende de factores como (*a*) la cantidad específica a medir o detectar; (*b*) la interacción del sensor con otros componentes en el sistema; (*c*) la vida de servicio esperada; (d) el nivel requerido de sofisticación; (*e*) las dificultades asociadas con su uso; (*f*) la fuente de alimentación, y (*g*) costo. Una consideración importante en la selección de sensores es el ambiente en que se van a utilizar. Se han desarrollado *sensores robustos* para soportar extremos de temperatura, impacto y vibración, humedad, corrosión, polvo y diversos contaminantes, fluidos, radiación electromagnética y otras interferencias.

Sensores inteligentes. Estos sensores tienen la capacidad de efectuar una función lógica, para realizar comunicación de dos vías, tomar decisiones y emprender las acciones apropiadas. La entrada necesaria y el conocimiento requerido para tomar una decisión pueden incorporarse en un sensor inteligente. Por ejemplo, es posible programar chips de computadora con sensores para apagar una máquina herramienta en caso de falla en la herramienta de corte. De manera similar, un sensor inteligente puede evitar que un robot móvil o un brazo de robot entre en contacto por accidente con un objeto o personas detectando cantidades como distancia, calor y ruido.

37.7.2 Fusión de sensores

La *fusión de sensores* comprende básicamente la integración de múltiples sensores, de manera que los datos individuales de cada uno de ellos (como fuerza, vibración, temperatura y dimensiones) se combinan para proporcionar un mayor nivel de información y confiabilidad. Una aplicación común de la fusión de sensores ocurre cuando alguien bebe una taza de café caliente. Aunque se considera como un suceso diario, puede verse de inmediato que este proceso comprende la entrada de datos de los ojos, labios, lengua y manos de la persona. A través de nuestros sentidos básicos de vista, oído, olfato, gusto y tacto, existe una supervisión de tiempo real de movimientos, posiciones y temperaturas relativas. Por lo tanto, si el café está demasiado caliente, el movimiento que realiza la mano para llevar la taza hacia los labios se controla y ajusta de manera adecuada.

Las primeras aplicaciones de fusión de sensores ocurrieron en el control de movimientos de robots, rastreo de vuelos de misiles y aplicaciones militares similares, principalmente debido a que estas actividades comprenden movimientos que imitan el comportamiento humano. Otro ejemplo de fusión de sensores es una operación de maquinado en la que una serie de sensores diferentes pero integrados supervisa: (*a*) las dimensiones y el acabado superficial de la pieza de trabajo, (*b*) las fuerzas, vibraciones y desgaste de las herramientas, (*c*) las temperaturas en diversas regiones del sistema de herramienta y pieza de trabajo, y (*d*) la potencia del husillo.

Un aspecto importante en la fusión de sensores es la *validación de sensores*. La falla de un sensor específico se detecta de manera que el sistema de control mantiene una alta confiabilidad. Para esta aplicación, es fundamental la recepción de datos redundantes de diferentes sensores. La recepción, integración y procesamiento de todos los datos de diversos sensores puede ser un problema complejo.

Con los avances en el tamaño, la calidad y la tecnología de los sensores y el desarrollo progresivo en los sistemas de control por computadora, la inteligencia artificial, los sistemas expertos y las redes neuronales artificiales (todo lo cual se describe en el capítulo 39), la fusión de sensores se ha vuelto práctica y disponible a un costo relativamente bajo.

EJEMPLO 37.2 Aplicaciones especiales de los sensores

En este ejemplo se describen tres aplicaciones especiales de los sensores.

1. Se están desarrollando sensores de fibra óptica para motores de turbinas de gas. Del tamaño de la cabeza de un alfiler, estos sensores se colocan en instalaciones críticas y supervisan las condiciones en el interior del motor, como temperatura, presión y flujo de gases. La supervisión continua de las señales de estos sensores ayuda a detectar posibles problemas de los motores y proporciona los datos necesarios para mejorar su eficiencia. *Fuente:* Cortesía de Prime Research.
2. Se ha determinado que, en Estados Unidos, más de la cuarta parte de las llantas de los vehículos de pasajeros se encuentran infladas de manera deficiente; una condición que puede producir la separación de la llanta y que ésta se ponche. Se han desarrollado e instalado sensores remotos de presión de llantas en algunos automóviles. Las llantas con poco aire pueden calentarse debido a la flexión y fricción interna excesivas. Con base en esta observación, se ha desarrollado un hule especial

que cambia su color de negro a rojo cuando su temperatura aumenta arriba de 77°C (170°F). Por lo tanto, puede integrarse una pequeña cinta de este material en las paredes laterales de las llantas, que sería visible como un anillo rojo cuando la llanta se torna demasiado caliente. *Fuente:* F. Kelley y B. Rosenbaum.

3. Se han desarrollado sensores electrónicos para distinguir sabores básicos, como la acidez de la leche y cuán amargos son los medicamentos. Sin embargo, el café tiene variaciones sutiles de sabor que son difíciles de detectar mediante estos sensores, incluyendo características de detección como acidez, acritud, amargura y nivel de cafeína. Cada año se venden hasta $70 mil millones de dólares de café alrededor del mundo y, tradicionalmente, catadores humanos son lo que verifican y garantizan la calidad de los granos de café.

   Un nuevo detector es "una lengua electrónica" desarrollada en forma conjunta por la Universidad de Pennsylvania y la Agencia de Investigación Embrapa en Brasil. El sensor consta de 10 electrodos de oro cubiertos con películas delgadas de un polímero conductor eléctrico. Se sumerge en café líquido y estas películas absorben diversas moléculas del mismo, cambiando sus propiedades eléctricas. Se dice que el sensor es 1000 veces más sensible y el costo es de la mitad de otros disponibles.

   Fuente: L. H. Mattoso y *Technology Review*.

37.8 Soportes flexibles

Al describir los *dispositivos de sujeción de piezas* (*también llamados portapiezas*) para las operaciones de manufactura en este libro, se han utilizado con frecuencia las palabras prensa, plantilla y soporte fijo de manera intercambiable y en algunas ocasiones en pares, como plantillas y soportes fijos. Las **prensas** son dispositivos de sujeción de piezas multifuncionales y las **plantillas** tienen diferentes superficies y puntos de referencia para alineación precisa de partes y herramientas. Por lo general, los **soportes fijos** están diseñados con propósitos específicos. Otros dispositivos de sujeción de piezas también incluyen *chucks o plato de sujeción*, *boquillas* y *mandriles*, muchos de los cuales se accionan manualmente. Los dispositivos de sujeción de piezas también están diseñados y operados a diversos niveles de mecanización y automatización (como los *chucks* de potencia) y se accionan por medios mecánicos, hidráulicos o eléctricos.

Por lo general, los dispositivos de sujeción de piezas tienen intervalos específicos de capacidad. Por ejemplo, (*a*) una boquilla específica puede aceptar barras sólo dentro de cierto intervalo de diámetros; (*b*) los *chucks* de cuatro mordazas pueden aceptar piezas de trabajo cuadradas o prismáticas que tienen ciertas dimensiones, y (*c*) muchos otros dispositivos y soportes fijos están diseñados y fabricados para formas y dimensiones específicas de piezas de trabajo y para tareas específicas, conocidos como *soportes fijos dedicados*. Si la parte tiene superficies curvadas, es posible formar las propias superficies de contacto de las mordazas maquinándolas (*mordazas maquinables*) para que se adapten a las superficies de la pieza de trabajo.

El surgimiento de los sistemas flexibles de manufactura ha necesitado del diseño y uso de dispositivos y soportes de sujeción o portapiezas que tienen una *flexibilidad incorporada*. Existen diversos métodos de *soportes flexibles* con base en diferentes principios que también se conocen como **sistemas inteligentes de fijación**. Estos dispositivos tienen la capacidad de aceptar con rapidez una gama de formas y dimensiones de partes sin necesidad de grandes cambios, ajustes o que requieran intervención del operador, lo que afectaría la productividad de manera adversa.

Soportes modulares. Con frecuencia se utilizan soportes modulares para tamaños de lotes pequeños o moderados, en particular cuando el costo de los soportes dedicados y el tiempo requerido para producirlos son difíciles de justificar. Las piezas de trabajo complejas

pueden localizarse dentro de las máquinas mediante soportes producidos rápidamente a partir de componentes estándar y se pueden desensamblar cuando se termina una corrida de producción. Los soportes modulares suelen basarse en placas o bloques de herramientas configurados con orificios de rejilla o ranuras T sobre los cuales se construye un soporte.

Se pueden montar varios componentes estándar (como pasadores de localización, topes ajustables, soportes de la pieza de trabajo, bloques en V, prensas y resortes) en la placa o bloque base para producir con rapidez un soporte. Mediante la planeación de soportes fijos asistida por computadora para aplicaciones específicas, dichos soportes se pueden ensamblar y modificar utilizando robots industriales. En comparación con los soportes dedicados, se ha demostrado que los soportes modulares son de bajo costo, tienen menor tiempo de entrega, es más fácil reparar componentes dañados y poseen más flexibilidad intrínseca de aplicación.

Dispositivo de cama de clavos. Este soporte consta de una serie de pasadores accionados por aire que se adaptan a la forma de las superficies externas de la parte. Cada pasador se mueve según sea necesario para adaptarse a la forma en su punto de contacto con la parte. Después los pasadores se bloquean mecánicamente contra la parte. El dispositivo es compacto, tiene alta rigidez y es reconfigurable.

Prensa de fuerza ajustable. En la figura 37.26 se muestra un esquema de dicho sistema. La galga extensiométrica montada en la prensa detecta la magnitud de la fuerza de sujeción. Después el sistema ajusta esta fuerza para mantener la pieza de trabajo firmemente sujeta para la aplicación específica. También puede evitarse el exceso de fuerzas de sujeción que, de otra manera, podría dañar la superficie de la pieza de trabajo, en particular si es blanda o delgada.

Materiales de cambio de fase. Existen dos métodos mediante los cuales es posible sostener piezas de trabajo de formas irregulares o curvadas en un medio distinto a los herramentales duros. En el primero y más antiguo, se utiliza un *metal con punto de fusión bajo* como medio de sujeción. Por ejemplo, una pieza de trabajo de forma irregular se sumerge en plomo fundido y se deja solidificar (como una varita de madera en una paleta; un proceso similar al *moldeo de insertos*). Después de solidificarse, el bloque de plomo se sujeta en un soporte simple. Debe considerarse el efecto posiblemente adverso de dichos materiales, como el plomo sobre la pieza de trabajo a sujetar (*fragilización líquido-metal*).

En el segundo método, el medio de soporte es un *fluido magnetoreológico* (MR) o *electroreológico* (ER). En la aplicación MR, las partículas son ferromagnéticas o paramagnéticas, de μm de tamaño, así como utilizando nanopartículas y en un fluido no magnético. Se agregan tensoactivos para evitar que las partículas se sedimenten. Luego de sumergir la pieza de trabajo en el fluido, se aplica un campo magnético externo, por medio

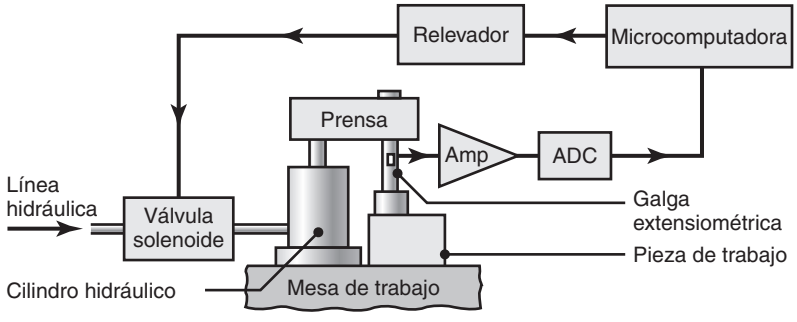


FIGURA 37.26 Esquema de un sistema de sujeción de fuerza ajustable. La fuerza de sujeción se detecta mediante una galga extensiométrica y el sistema ajusta automáticamente esta fuerza. *Fuente*: P. K. Wright.

del cual las partículas se polarizan y el comportamiento del fluido cambia de líquido a sólido. Después, la pieza se retrae retirando el campo magnético externo. El proceso es apropiado sobre todo para partes metálicas no ferrosas. En la aplicación de ER, el fluido es una suspensión de partículas dieléctricas finas en un líquido de constante dieléctrica baja. Tras la aplicación de un campo eléctrico, el líquido se vuelve sólido.

ESTUDIO DE CASO 37.1 Desarrollo de un soporte fijo modular

En la figura 37.27 se muestra una carcasa redonda de hierro fundido que requiere un soporte fijo para fresar el plano de dicha carcasa, el contramandrinado del orificio central, el taladrado de cuatro orificios en las esquinas y el maquinado del área circular de montaje. Estas operaciones se realizan en tamaños de lotes moderados en una fresadora CNC; por lo tanto, se requiere un soporte fijo que localice de manera precisa y consistente la pieza de trabajo. La dimensión del lote no es suficientemente grande para justificar el diseño y la fabricación de soportes fijos dedicados; en consecuencia, se construye un soporte modular a partir de los componentes ilustrados en la figura 37.28.

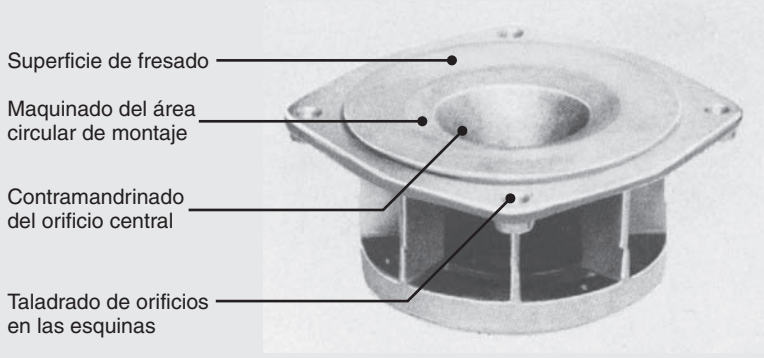


FIGURA 37.27 Carcasa de hierro fundido y operaciones requeridas de maquinado.

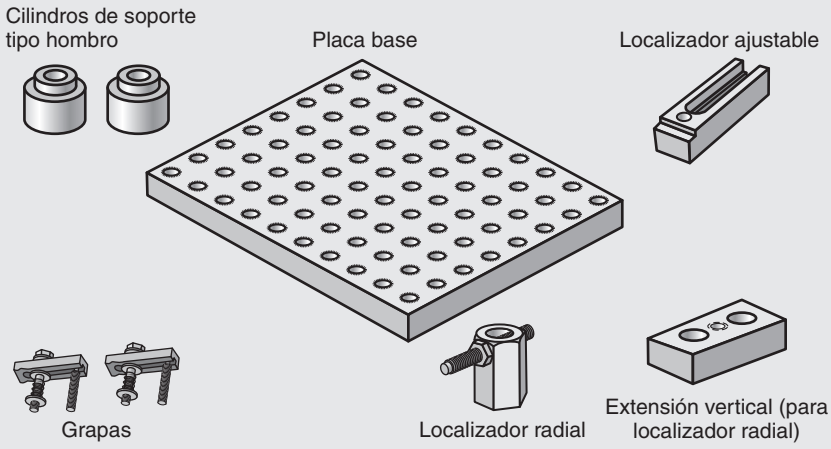


FIGURA 37.28 Componentes modulares utilizados para construir el soporte para maquinado CNC de la carcasa de hierro fundido ilustrada en la figura 37.27.

El primer paso en el diseño de dicho soporte es seleccionar una placa de herramientas. Las placas de herramientas con ranuras T u orificios en rejilla son las opciones más comunes para los soportes modulares. En este caso, se selecciona una placa rectangular con orificios en rejilla, que tiene un área superficial suficientemente grande para aceptar la pieza de trabajo y los elementos de fijación.

La pieza de trabajo no debe sujetarse en la superficie que se va a maquinar; sin embargo, existe una brida inferior que es adecuada para la sujeción. Por lo general, esta sujeción se logra ejerciendo una fuerza con una prensa contra un botón de localización. Por razones de estabilidad, esta pieza de trabajo redonda debe localizarse en la brida inferior en tres puntos y espaciarse a unos 120° de distancia. Los primeros elementos de localización seleccionados son cilindros de soporte tipo hombro. La brida descansa sobre los hombros y los cilindros soportan el diámetro de la pieza de trabajo y también elevan ésta por encima de la placa de herramientas. Este método tiene la ventaja de eliminar los efectos adversos de las virutas (del maquinado) en la placa de herramientas que puede interferir en la orientación de la pieza de trabajo.

Los cilindros de soporte se montan en la placa de herramientas utilizando tornillos de localización. Después se monta un soporte de extensión ajustable a la placa de herramientas en una posición en la que se establezca el diámetro correcto entre los tres localizadores. El soporte de extensión se posiciona para contactar sólo el borde inferior de la pieza de trabajo y se permite espacio suficiente de manera que el localizador no quede en contacto con la carcasa en el diámetro de localización.

La pieza de trabajo debe orientarse de manera consistente para mantener las tolerancias dimensionales requeridas en los orificios de las esquinas. Se utiliza un tope ajustable para localizar la pieza de trabajo. Este tope emplea un botón roscado localizado, el cual se ajusta para orientar la pieza de trabajo. Se usa un soporte de extensión de manera que el tope se localice en forma vertical, directamente debajo de la superficie a maquinar.

Después se utilizan grapas para sujetar la pieza de trabajo en su lugar. Los resortes y las rondanas en el espárrago de sujeción permiten que la grapa se eleve en forma automática al soltarse, de modo que la prensa no caiga al extraer la pieza de trabajo. En la figura 37.29 se muestra el soporte modular con la pieza de trabajo en su lugar. Obsérvese que las localizaciones planares, concéntricas y radiales se definen de manera precisa mediante el soporte.

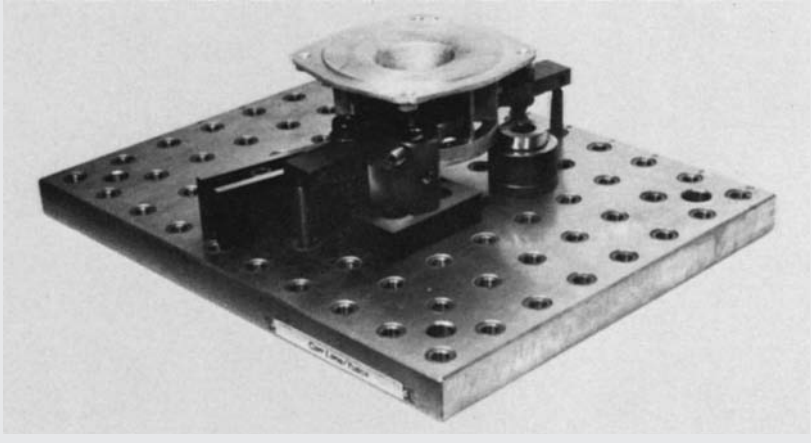


FIGURA 37.29 Soporte modular terminado con la carcasa de hierro fundido en su lugar, como se ensamblaría para uso en un centro de maquinado o fresadora CNC. *Fuente*: Cortesía de Carr Lane Manufacturing Company.

37.9 Sistemas de ensamble

Las partes y los componentes individuales producidos por diversos procesos de manufactura se **ensamblan** como artículos terminados mediante diversos métodos. Algunos productos son simples y sólo tienen dos o tres componentes a ensamblar. Las operaciones que se pueden realizar con relativa facilidad son un lápiz ordinario con goma de borrar, una sartén con mango o una lata de aluminio para bebidas. Sin embargo, la mayoría de los productos constan de diversas partes y su ensamble requiere considerable planeación.

Tradicionalmente, el ensamble comprende mucho trabajo manual y, por lo tanto, ha contribuido de manera significativa al costo de los productos. En general, la operación total de ensamble se divide en operaciones individuales de ensamble (*subensambles*) con un operador asignado para realizar cada paso. Los costos de ensamble son comúnmente de 25% a 50% del costo total de manufactura, con el porcentaje de trabajadores comprendidos en las operaciones de ensamble que van de 20% a 60%. En las industrias de la electrónica, suele pagarse de 40% a 60% de los salarios totales a trabajadores de ensamble.

Al aumentar los costos de producción y las cantidades de los productos a ensamblar, la necesidad de ensamble automatizado se vuelve obvia. Iniciando con el ensamble manual de mosquetes a finales del siglo XVIII y principios del XIX, con *partes intercambiables*, los métodos de ensamble se han mejorado en gran medida con los años. La primera aplicación de un ensamble eficiente a gran escala fue el ensamble del magneto volante (*flywheel*) para el modelo Ford T. Esta experiencia condujo al final a la producción en masa de todo el automóvil. La elección de un método y sistema de ensamble depende de la capacidad de producción requerida, la cantidad total a producir, el ciclo de vida del producto, la disponibilidad de mano de obra y el costo. El **ensamble automatizado** puede reducir de manera efectiva el costo total del producto.

Como hemos visto, las partes se manufacturan dentro de ciertos intervalos de tolerancias dimensionales. Si tomamos los rodamientos de bolas como ejemplo, se sabe que aunque todos tienen las mismas dimensiones nominales, algunas bolas en un lote son más pequeñas que otras por una magnitud muy pequeña. De igual manera, algunas pistas de rodamientos son más pequeñas que otras en el lote. Existen dos métodos de ensamble para productos de alto volumen: aleatorio y selectivo.

En el **ensamble aleatorio**, los componentes se unen seleccionándolos al azar de los lotes producidos. En el **ensamble selectivo**, las bolas y pistas se clasifican por grupos de tamaños (de más pequeños a más grandes). Después se seleccionan las partes para acoplarlas en forma apropiada. Así, las bolas de diámetro más pequeño se acoplan con pistas interiores que tienen el diámetro exterior más grande y, de igual manera, con pistas exteriores que tienen los diámetros internos más pequeños.

Métodos y sistemas de ensamble. Existen tres métodos básicos de ensamble: manual, automático de alta velocidad y robótico. Estos métodos se pueden utilizar por separado o, como en el caso de la mayoría de las aplicaciones en la práctica, en combinación. Primero debe hacerse un análisis del diseño de los productos (fig. 37.30) respecto del método apropiado y económico de ensamble.

1. El **ensamble manual** utiliza herramientas relativamente simples y, por lo general, es económico para lotes pequeños. Debido a la agilidad de la mano y los dedos humanos y su capacidad de retroalimentación a través de los diferentes sentidos, los trabajadores pueden ensamblar en forma manual partes incluso complejas sin mucha dificultad. A pesar del uso de mecanismos sofisticados, robots y controles por computadora, la alineación y colocación de una simple espiga cuadrada dentro de un orificio también cuadrado que comprende holguras pequeñas puede ser difícil en el ensamble automatizado, mientras que la mano humana tiene la capacidad de hacer esta simple operación con relativa facilidad.

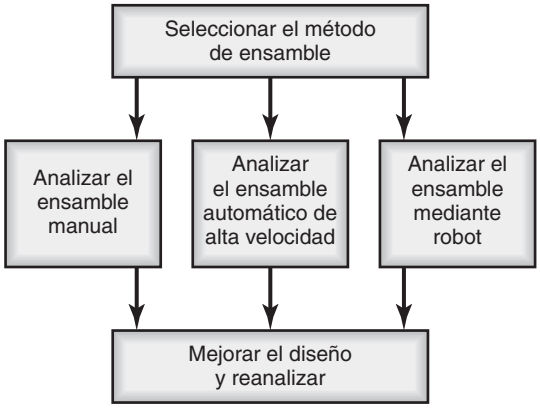


FIGURA 37.30 Etapas en el análisis de diseño para ensamble. *Fuente*: G. Boothroyd y P. Dewhurst.

2. El **ensamble automatizado de alta velocidad** utiliza *mecanismos de transferencia* diseñados especialmente para el ensamble. En la figura 37.31 se muestran dos ejemplos de dicho ensamble, en el que el ensamble individual se realiza en productos que se indexan para posicionarlos de manera adecuada durante el ensamble.
3. En el **ensamble robótico**, uno o dos robots de propósito general operan en una sola estación de trabajo (fig. 37.32), o los robots operan en un sistema de ensamble de estaciones múltiples.

Existen tres tipos básicos de sistemas de ensamble: síncronos, asíncronos y continuos.

Sistemas síncronos. También conocidos como *de indexación*, las partes y componentes individuales se suministran y ensamblan a una velocidad constante en estaciones individuales fijas. La rapidez de movimiento se basa en la estación que consume el mayor tiempo en completar su porción del ensamble. Este sistema se utiliza principalmente en el ensamble de alto volumen y alta velocidad de productos pequeños. Los sistemas de transferencia mueven los ensambles parciales de una estación de trabajo a otra por varios medios mecánicos. En la figura 37.32 se muestran dos sistemas comunes de transferencia (*indexación rotatoria* e *indexación en línea*). Estos sistemas pueden operar en un modo totalmente automático o semiautomático. Sin embargo, una descompostura en una estación detiene toda la operación de ensamble.

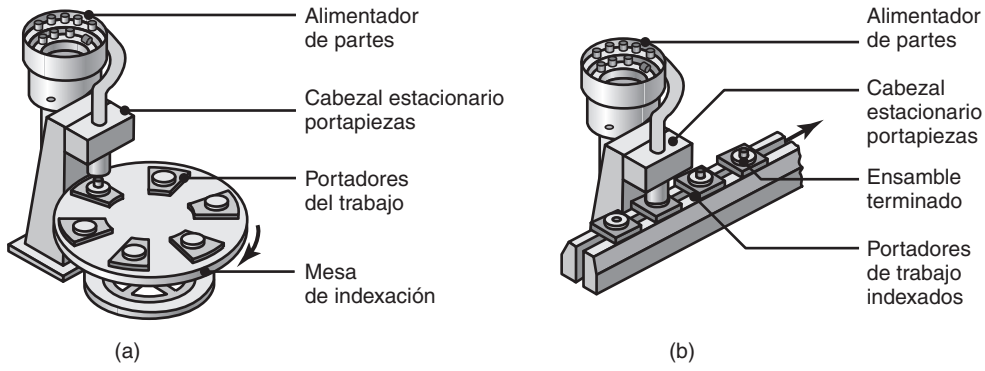


FIGURA 37.31 Sistemas de transferencia para ensamble automatizado: *(a)* máquina rotatoria de indexación, y *(b)* máquina de indexación en línea. *Fuente*: G. Boothroyd.

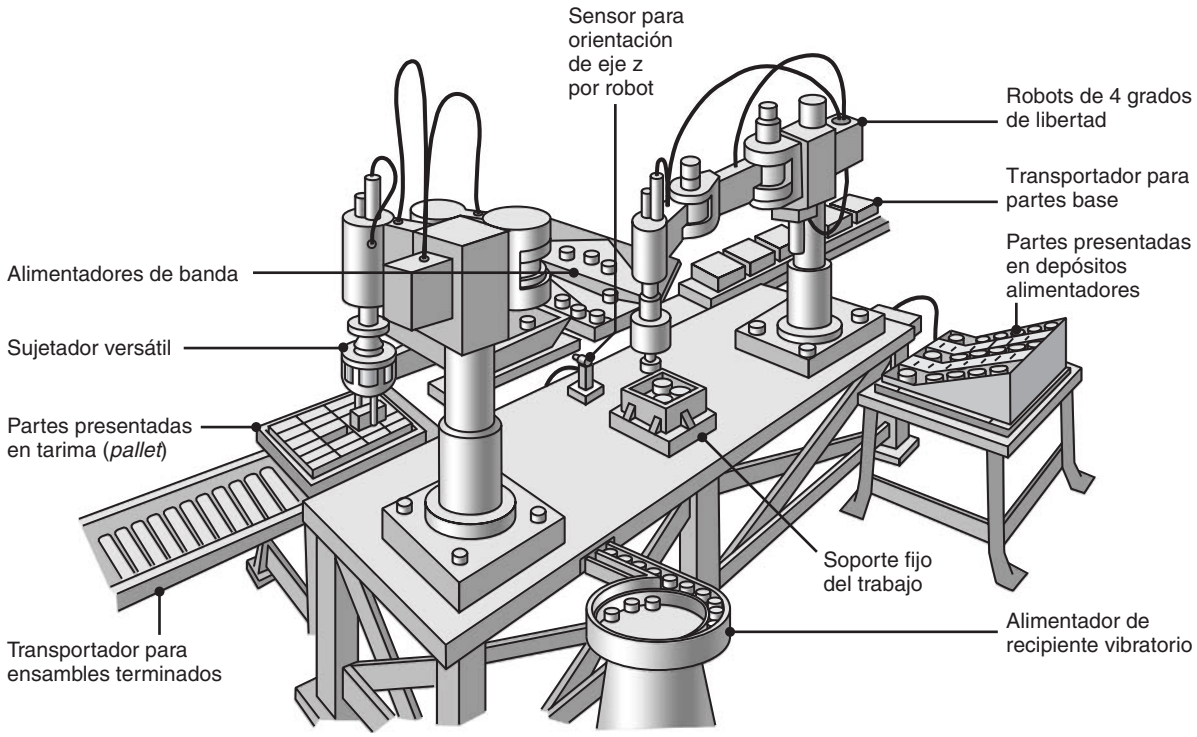


FIGURA 37.32 Estación de ensamble de robot de dos brazos. *Fuente*: *Product Design for Assembly*, edición de 1989, de G. Boothroyd y P. Dewhurst. Reproducida con permiso.

Los alimentadores de partes suministran las partes individuales a ensamblar y las colocan en otros componentes, que se sujetan en carros de trabajo o soportes fijos. Los alimentadores mueven dichas partes por medios vibratorios u otros, a través de tolvas de entrega y aseguran su orientación apropiada por varios medios ingeniosos (fig. 37.33). Es fundamental orientar las partes de manera adecuada y evitar congestionamientos en todas las operaciones de ensamble automatizadas.

Sistemas asíncronos. Cada estación opera de manera independiente y cualquier desequilibro se ajusta en el almacenaje (*acumulador intermedio*) entre estaciones. La estación continúa operando hasta que el siguiente acumulador intermedio está lleno o el acumulador intermedio anterior está vacío. Además, si una estación deja de funcionar por alguna razón, la línea de ensamble sigue operando hasta que se hayan utilizado todas las partes en el acumulador intermedio. Los sistemas asíncronos son adecuados para ensambles grandes con muchas partes a ensamblar. Si los tiempos requeridos para las operaciones individuales de ensamble varían de manera significativa, la producción se ve restringida por la estación más lenta.

Sistemas continuos. El producto se ensambla mientras se mueve a una velocidad constante sobre tarimas (*pallets*) o portadores similares de la pieza de trabajo. Las partes a ensamblar se llevan al producto mediante varios cabezales de trabajo y sus movimientos se sincronizan con el movimiento continuo del producto. Aplicaciones comunes de este sistema ocurren en las plantas de embotellado y empacado, aunque también se ha utilizado el método de líneas de producción en masa para los automóviles y los aparatos eléctricos.

Sistemas flexibles de ensamble. Por lo general, se instalan sistemas de ensamble para una línea específica de producción. Sin embargo, pueden modificarse para aumentar la flexibilidad y ensamblar líneas de producción que tienen una amplia variedad de

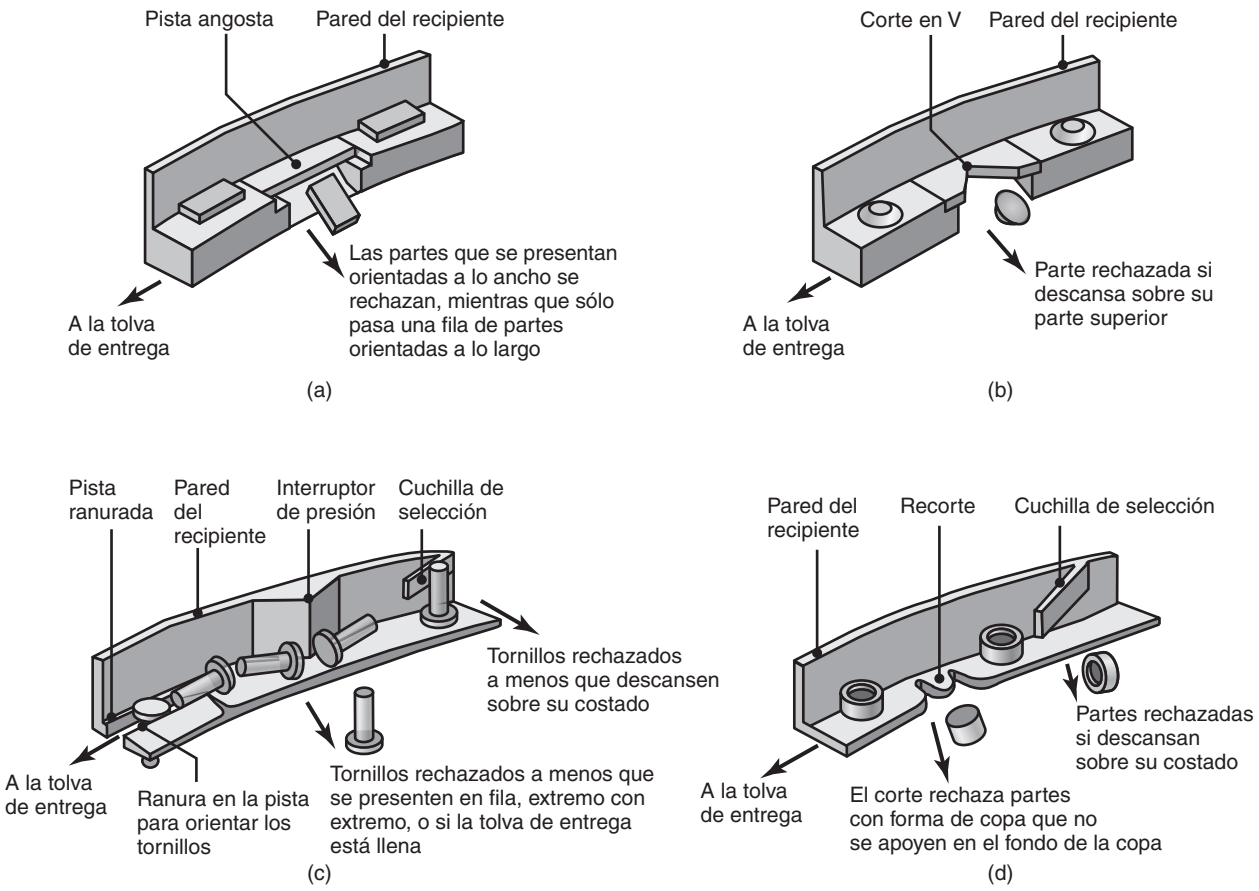


FIGURA 37.33 Ejemplos de guías para asegurar que las partes estén orientadas apropiadamente para ensamble automatizado. *Fuente*: G. Boothroyd.

modelos de productos. Dichos *sistemas flexibles de ensamble* (FAS, por sus siglas en inglés) utilizan controles computarizados, cabezales intercambiables y programables y dispositivos de avance, tarimas (*pallets*) codificadas y dispositivos guiados automáticamente. Por ejemplo, la planta de General Motors para el automóvil subcompacto Saturn está diseñada con un sistema flexible de ensamble, el cual tiene la capacidad de ensamblar hasta una docena de diferentes combinaciones de transmisiones, motores, dirección hidráulica y unidades de aire acondicionado.

37.10 Consideraciones de diseño para soportes fijos, ensamble, desensamble y servicio

Como en muchos aspectos de los procesos y sistemas de manufactura, también el diseño es una parte integral de los temas descritos en este capítulo. Estos temas requieren consideraciones especiales de diseño, como se describe a continuación.

37.10.1 Diseño de soportes fijos

El diseño, la construcción y la operación apropiados de los dispositivos flexibles sujetadores de piezas o portapiezas y soportes fijos es fundamental para la operación y eficiencia de los sistemas avanzados de manufactura. A continuación se describen los principales aspectos de diseño correspondientes.

- Los dispositivos sujetadores de piezas o portapiezas deben posicionar la pieza de trabajo de manera automática y precisa; mantener su localización con exactitud y con la suficiente fuerza de sujeción para soportar la operación específica de manufactura. Los soportes fijos también deben ser capaces de aceptar partes de manera repetitiva en la misma posición.
- Los soportes fijos deben tener suficiente rigidez para resistir (sin excesiva distorsión) los esfuerzos normales y de cizallado desarrollados en las interfaces de la pieza de trabajo y el soporte fijo.
- La presencia de virutas sueltas y otros desechos entre las superficies de localización de la pieza de trabajo y el soporte fijo puede ser un problema grave. Es muy probable que las virutas de las operaciones de maquinado y rectificado estén presentes en los casos en que se utilizan fluidos de corte, ya que tienden a adherirse a las superficies húmedas debido a las fuerzas de tensión superficial.
- Un soporte fijo flexible debe aceptar partes a fabricar mediante diferentes procesos, unos con dimensiones y características superficiales que varían de parte a parte. Estas consideraciones son incluso más importantes cuando la pieza de trabajo (*a*) es frágil o está hecha de un material quebradizo; (*b*) está hecha de un material relativamente blando y flexible (como partes de plástico o goma), o (*c*) tiene un recubrimiento casi blando en sus superficies de contacto.
- Las prensas y los soportes fijos deben tener perfiles bajos para evitar una colisión con las herramientas de corte. Evitar la colisión también es un factor importante en las trayectorias de programación de las herramientas en las operaciones de maquinado.
- Los soportes fijos flexibles también deben cumplir requisitos especiales de las celdas y los sistemas flexibles de manufactura. Por ejemplo, el tiempo necesario para cargar y descargar partes en la maquinaria moderna debe ser mínimo para reducir el tiempo de los ciclos.
- Deben diseñarse piezas de trabajo que permitan la localización y sujeción dentro del soporte fijo; incorporarse salientes, planos u otras superficies de localización en el diseño para simplificar el diseño de los soportes fijos y ayudar a la transferencia de partes a la maquinaria.

37.10.2 Diseño para ensamble, desensamble y servicio

Diseño para ensamble. Aunque durante algún tiempo las funciones de un producto y su diseño para la manufactura han sido aspectos de interés principal, el *diseño para ensamble* (DFA, por sus siglas en inglés) ha atraído atención especial (en particular el diseño para ensamble automatizado), debido a la necesidad de reducir los costos de ensamble. En el **ensamble manual**, una ventaja importante es que los humanos pueden escoger con facilidad las partes correctas similares o diferentes del montón (como de un cubo cercano) y los sentidos humanos pueden guiar las manos para obtener el ensamble apropiado. Sin embargo, en el **ensamble automatizado de alta velocidad**, el manejo automático requiere por lo general que las partes se separen del montón, se transporten con tolvas o alimentadores vibratorios (ver fig. 37.31) y se ensamblen en sus localizaciones y orientaciones apropiadas.

A continuación se resumen los lineamientos generales del diseño para ensamble:

1. Reducir la cantidad y variedad de partes en un producto. Simplificar el diseño del producto e incorporar múltiples funciones en una sola parte. Utilizar partes comunes tanto como sea posible. Considerar los subensambles que servirían como módulos.
2. Las partes deben tener un alto grado de simetría (redonda o cuadrada) o un alto grado de asimetría (oval o rectangular) de manera que no puedan instalarse incorrectamente o no requieran localización, alineación o ajuste. Diseñar partes para facilitar su inserción.
3. Los diseños deben permitir que las partes se ensamblen sin obstrucciones. Tiene que haber una línea directa de visión. Los ensambles no deben voltearse para insertar partes.

4. Considerar métodos como montajes instantáneos y evitar la necesidad de sujetadores como tornillos, tuercas y pernos. Si se utilizan, debe minimizarse la variedad de sujetadores y espaciarse y localizarse de manera que las herramientas puedan usarse sin obstrucción.
5. Los diseños de partes deben considerar factores como tamaño, forma, peso, flexibilidad, abrasión y posible enredo con otras partes.
6. Las partes deben insertarse desde una sola dirección, de preferencia verticalmente (desde arriba) a fin de aprovechar la gravedad. Puede ser difícil ensamblar en dos o más direcciones.
7. Se deben diseñar productos o rediseñar los ya existentes de manera que no existan obstrucciones físicas al libre movimiento de las partes durante el ensamble. Por ejemplo, es necesario reemplazar las esquinas puntiagudas internas y externas con chaflanes, conos o radios.
8. Deben utilizarse códigos de colores en las partes que parezcan similares pero que sean diferentes.

Ensamble robótico. Los lineamientos de diseño para el ensamble robótico incluyen los siguientes:

- Las partes deben diseñarse de manera que se puedan sujetar y manipular mediante un sujetador o efector final (*gripper*) del robot. Dicho diseño evita la necesidad de diferentes sujetadores. Las partes deben quedar disponibles para el sujetador en la orientación apropiada.
- El ensamble que comprende sujetadores roscados (pernos, tuercas y tornillos) puede ser difícil para los robots. Una excepción es el uso de tornillos de autorroscado para láminas metálicas, plásticos y partes de madera. Además, considérese que los robots pueden manejar con facilidad montajes instantáneos de presión, remaches, soldaduras y adhesivos.

El desarrollo de efectores finales compatibles y manipuladores diestros ha hecho que el ensamble robótico sea aún más atractivo.

Diseño para desensamble. La manera y facilidad con que un producto se puede separar para darle mantenimiento o para reemplazar sus partes es otra consideración importante en el diseño de los productos. Por ejemplo, nótese las dificultades que se tienen para extraer ciertos componentes debajo del cofre de algunos automóviles. Existen dificultades similares en el desensamble de muchos otros productos. El enfoque general del diseño para desensamble exige la consideración de factores similares a los ya indicados para el ensamble. En general, el análisis de modelos por computadora o físicos de productos y sus componentes respecto del desensamble indica algún problema potencial, como obstrucciones, tamaño de conductos, falta de línea de visión y dificultad para sujetar y guiar con firmeza los objetos.

Un aspecto importante del diseño para desensamble es cómo, después de su ciclo de vida, se separa un producto para *reciclaje*, en particular los componentes más valiosos. Por ejemplo, considérese que dependiendo de (*a*) su diseño y localización; (*b*) el tipo de herramientas utilizadas, y (*c*) si se emplean herramientas manuales o de potencia, es posible que se requiera más tiempo para retirar los remaches que los tornillos o montajes de presión, y que una capa unida de material valioso en un componente sería muy difícil (si no es que imposible) de retirar para reciclaje o reutilización. Es obvio que cuanto más tiempo tarde la separación de los componentes, más elevado será el costo de hacerlo. Así que, es posible que este costo se vuelva prohibitivo. En consecuencia, se ha estudiado y medido el tiempo requerido para desensamble. Aunque depende de la manera en que se realiza, algunos ejemplos son: corte de cable en 0.25 segundos; desconexión de cable en 1.5 segundos; montajes instantáneos de presión y *clips* en 1 a 3 segundos; y tornillos y pernos en 0.15 a 0.6 segundos por revolución.

Diseño para servicio. El diseño para ensamble y desensamble incluye tomar en cuenta la facilidad con que se puede dar servicio a un producto y, si es necesario, repararlo. Básicamente, el diseño para servicio estriba en el concepto de que los elementos que tienen más probabilidad de requerir servicio estén en las capas exteriores del producto. De esta manera, las partes individuales son más fáciles de alcanzar y dar servicio sin necesidad de extraer muchas otras para hacerlo.

Evaluación de la eficiencia del ensamble. Se han dirigido esfuerzos significativos hacia el desarrollo de herramientas analíticas y basadas en computadoras para calcular la eficiencia de las operaciones de ensamble. Estas herramientas proporcionan una base para comparaciones de diseños y la selección objetiva de atributos de diseño que hacen que el ensamble sea más fácil.

Para valorar la eficiencia del ensamble, se evalúan las características de cada uno de sus componentes que puedan afectar dicho ensamble, así como un tiempo estimado de línea base requerido para incorporar la parte al ensamble. (Esto también se puede aplicar a los productos ya existentes). La eficiencia del ensamble, η, se obtiene mediante:

$$\eta = \frac{Nt}{t_{\text{tot}}} \tag{37.1}$$

donde N es el número de partes, t_{tot} el tiempo total de ensamble y t el tiempo de ensamble ideal de una parte pequeña que no presenta dificultades en el manejo, orientación o ensamble y comúnmente se considera como tres segundos. Utilizando la ecuación 37.1, los diseños en competencia pueden evaluarse respecto del diseño para ensamble. Debe observarse que, en general, los productos que necesitan ser rediseñados para facilitar el ensamble tienen una eficiencia de ensamble de alrededor de 5% a 10%, en tanto que las partes bien diseñadas poseen eficiencias de ensamble de alrededor de 25%. Cabe destacar que, en la práctica, existen pocas probabilidades de obtener eficiencias de ensamble aproximadas al 100%.

37.11 Consideraciones económicas

Como se describe con más detalle en el capítulo 40, y como ya vimos a lo largo de muchos capítulos en este libro, existen diversas consideraciones comprendidas en la determinación de la economía general de las operaciones de producción. Debido a que todos los sistemas de producción son fundamentalmente una combinación de máquinas y personas, algunos factores importantes que influyen en las decisiones finales incluyen el tipo y costo de maquinaria, equipo y herramental; costo de las operaciones; nivel de experiencia y la cantidad de mano de obra requerida, y el total de producción. Ya se vio que el tamaño del lote y la capacidad de producción influyen en gran medida en la economía de la producción.

En los talleres se pueden manufacturar cantidades pequeñas al año. Sin embargo, en general, el tipo de maquinaria existente en los talleres requiere mano de obra calificada para la operación; además, la cantidad y capacidad de producción son bajas. Como resultado, el costo por parte puede ser elevado. En el otro extremo, existe la producción de partes en cantidades muy grandes utilizando líneas de flujo convencionales y líneas de transferencia, que comprenden maquinaria de propósito especial, equipo, herramental especializado y sistemas de control computarizado. Aunque todos estos componentes constituyen inversiones importantes, tanto el nivel requerido de mano de obra calificada como los costos de ésta son relativamente bajos debido al alto nivel de automatización incorporada. Sin embargo, estos sistemas de producción se organizan para un tipo específico de producto y, por lo tanto, carecen de flexibilidad.

Debido a que la mayoría de las operaciones de manufactura se encuentran entre estos dos extremos, es necesario tomar una decisión apropiada en relación con el nivel conveniente de automatización a implantar. En muchas situaciones, se ha encontrado que la automatización selectiva, y no la automatización total de una instalación, es efectiva en costo. Por lo general, cuanto mayor es el nivel de habilidad disponible en la fuerza de

trabajo, menor será la necesidad de automatización, siempre que se justifiquen costos de mano de obra superiores y que existan suficientes trabajadores calificados disponibles. Por el contrario, si ya se ha automatizado una instalación de manufactura, el nivel de habilidad requerido es relativamente más bajo.

Además, algunos productos tienen gran componente de mano de obra; por lo tanto, su producción es intensiva. Éste es particularmente el caso con productos que requieren mucho ensamble. Ejemplos de productos intensivos en mano de obra son: aeronaves, *software*, bicicletas, pianos, mobiliario, juguetes, zapatos, textiles y prendas de vestir. Ésta es la razón principal por la que hoy en día tantos productos domésticos y de alta tecnología se fabrican o ensamblan en países donde los costos de mano de obra son bajos, como China, India, México y los países de la Cuenca del Pacífico (ver tabla I.4). Sin embargo, en Estados Unidos, por ejemplo, la mejora en los diseños de productos y la disponibilidad, confiabilidad, costo reducido y uso de robots industriales están teniendo un impacto económico importante en las operaciones de manufactura, reduciendo de manera significativa la necesidad de mano de obra.

RESUMEN

- La automatización se ha implantado en procesos de manufactura, manejo de materiales, inspección, ensamble y empaque en proporciones crecientes. Existen diversos niveles de automatización, que van de la automatización simple de máquinas hasta celdas de manufactura sin atención del personal.
- La verdadera automatización se inició con el control numérico de las máquinas, que tiene la capacidad de flexibilizar la operación, reducir los costos y facilitar la fabricación de diferentes partes con menos habilidad del operador. La cantidad y capacidad de producción son factores importantes en la determinación de los niveles económicos de la automatización.
- Las operaciones de manufactura se optimizan aún más (en calidad y costo) mediante técnicas de control adaptable, que supervisan de manera continua la operación y hacen los ajustes necesarios en los parámetros de procesamiento.
- Se han realizado avances importantes en el manejo de materiales, en particular con la implantación de robots industriales y vehículos guiados automáticamente.
- Los sensores son fundamentales en la implantación de estas modernas tecnologías; se ha desarrollado e instalado una amplia variedad de sensores basados en diversos principios.
- Otros avances incluyen los soportes fijos flexibles y las técnicas de ensamble automatizado, que reducen la necesidad de intervención del trabajador y disminuyen los costos de manufactura. La implantación efectiva y económica de estas técnicas requiere que el diseño para ensamble, desensamble y servicio se reconozca como un factor importante en el proceso total de diseño y manufactura.
- La eficiencia e implementación económica de esas técnicas requiere esos diseños para ensamblar y desensamblar, y el servicio es reconocido como un factor importante en los procesos de diseño y manufactura.

TÉRMINOS CLAVE

Acumulación intermedia
Automatización
Automatización por *software*
Automatización rígida
Automatización selectiva
Contorneado
Control adaptable
Control de lazo abierto
Control de lazo cerrado
Control numérico
Control numérico computarizado
Controlador lógico programable
Controles de cableado
Detección táctil
Detección visual

Efector final
Efectores finales compatibles
Ensamble
Ensamble aleatorio
Ensamble selectivo
Envolvente o volumen de trabajo
Fusión de sensores
Interpolación
Lenguaje de programación
Líneas de transferencia
Manejo de materiales
Manipuladores
Mantenimiento total productivo
Máquinas autónomas
Máquinas dedicadas
Mecanización
Posicionamiento
Precisión de repetición
Productividad
Programación de partes
Resolución
Retroalimentación
Robot
Robot industrial
Robot inteligente
Sensores
Sensores inteligentes
Sistemas de control
Sistemas flexibles de ensamble
Soportes flexibles
Trayectoria continua
Unidades de producción de cabezal de potencia
Vehículo guiado automáticamente
Visión de computadora
Visión de máquina

BIBLIOGRAFÍA

Amic, P. J., *Computer Numerical Control Programming*, Prentice Hall, 1996.

Asfahl, C. R., *Robots and Manufacturing Automation*, 2a. ed., Wiley, 1992.

Astrom, K. J. y Wittenmark, B., *Adaptive Control*, 2a. ed., Addison-Wesley, 1994.

Bolhouse, V., *Fundamentals of Machine Vision*, Robotic Industries Association, 1997.

Boothroyd, G., *Assembly Automation and Product Design*, Marcel Dekker, 1989.

Boothroyd, G., Dewhurst, P. y Knight, W., *Product Design for Manufacture and Assembly*, 2a. ed., Marcel Dekker, 2001.

Brooks, R. R. y Iyengar, S., *Multi-Sensor Fusion*: *Fundamentals and Applications with Software*, Prentice Hall, 1997.

Burke, M., *Handbook of Machine Vision Engineering*, Chapman & Hall, 1999.

Busch-Vishniac, I., *Electromechanical Sensors and Actuators*, Springer, 1999.

Chow, W., *Assembly Line Design: Methodology and Applications*, Marcel Dekker, 1990.

Coiffet, P. y Chizouze, M., *Introduction to Robot Technology*, McGraw-Hill, 1993.

Fraden, J., *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*, 2a. ed., Springer-Verlag, 1996.

Galbiati, L. J., *Machine Vision and Digital Image Processing Fundamentals*, Prentice Hall, 1997.

Gibbs, D. y Crandell, T., *CNC: An Introduction to Machining and Part Programming*, Industrial Press, 1991.

Ioannu, P. A., *Robust Adaptive Control*, Prentice Hall, 1995.

Jain, R. (ed.), *Machine Vision*, Prentice Hall, 1995.

Lynch, M., *Computer Numerical Control for Machining*, McGraw-Hill, 1992.

Molloy, 0., Warman, E. A. y Tilley, S., *Design for Manufacturing and Assembly: Concepts, Architectures and Implementation*, Kluwer, 1998.

Myler, H. R., *Fundamentals of Machine Vision*, Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 1998.

Nanfara, F., Uccello, T. y Murphy, D., *The CNC Workbook: An Introduction to Computer Numerical Controls*, Addison-Wesley, 1995.

Nof, S. Y. (ed.), *Handbook of Industrial Robotics*, Wiley, 1999.

Nof, S. Y., Wilhelm, W. E. y Warnecke, H.-J., *Industrial Assembly*, Chapman & Hall, 1998.

Rampersad, H. K., *Integral and Simultaneous Design for Robotic Assembly*, Wiley, 1995.

Rehg, J. A., *Introduction to Robotics in CIM Systems*, 5a. ed., Prentice Hall, 2002.

Sandler, B.-Z., *Robotics: Designing the Mechanisms for Automated Machinery*, 2a. ed., Prentice Hall, 1999.

Seames, W, *Computer Numerical Control: Concepts and Programming*, 3a. ed., Delmar, 1995.

Soloman, S., *Sensors Handbook*, McGraw-Hill, 1997.

Stenerson, J. y Curran, K. S., *Computer Numerical Control: Operation and Programming*, 2a. ed., Prentice Hall, 2000.

Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4a. ed., Vol. 4, *Assembly, Testing, and Quality Control*, Society of Manufacturing Engineers, 1986.

_____, Vol. 9, *Material and Part Handling in Manufacturing*, Society of Manufacturing Engineers, 1998.

Valentino, J. V. y Goldenberg, J., *Introduction to Computer Numerical Control*, 2a. ed., Regents/Prentice Hall, 1999.

Williams, D. J., *Manufacturing Systems*, 2a. ed., Chapman & Hall, 1994.

Zuech, N., *Understanding and Applying Machine Vision*, 2a. ed., Marcel Dekker, 1999.

PREGUNTAS DE REPASO

37.1 Describa las diferencias entre mecanización y automatización. Proporcione varios ejemplos específicos de cada una.
37.2 ¿Por qué la automatización se considera generalmente como evolutiva en lugar de revolucionaria?
37.3 ¿Existen actividades en las operaciones de manufactura que no se puedan automatizar? Explique su respuesta.
37.4 Explique la diferencia ente automatización rígida y por *software*. ¿Por qué se llaman así?
37.5 Describa el principio de control numérico de las máquinas. ¿Qué factores condujeron a la necesidad y desarrollo del control numérico?
37.6 Describa los circuitos de control de lazo abierto y lazo cerrado.
37.7 Describa el principio y los propósitos del control adaptable.
37.8 ¿Qué factores han conducido al desarrollo de vehículos guiados automáticamente? ¿Tienen alguna desventaja? Explique sus respuestas.
37.9 Describa los rasgos de un robot industrial. ¿Por qué son necesarios estos rasgos?
37.10 Comente los principios de diversos tipos de sensores.
37.11 Describa el concepto de diseño para ensamble. ¿Por qué se ha convertido en un factor importante en la manufactura?
37.12 ¿Es posible tener automatización parcial en el ensamble? Explique su respuesta.
37.13 ¿Cuáles son las ventajas de los soportes fijos flexibles?
37.14 ¿Cómo se programan los robots para seguir cierta trayectoria?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

37.15 Dando ejemplos específicos, comente sus observaciones en relación con la figura 37.2.
37.16 ¿Cuáles son las ventajas y limitaciones relativas de los dos arreglos de cabezales de potencia mostrados en la figura 37.4?
37.17 Comente los métodos de calibrado en línea de los diámetros de una pieza de trabajo en operaciones de torneado, distintos del mostrado en la figura 37.15.
37.18 ¿El taladrado y el troquelado son las únicas aplicaciones para el sistema punto a punto mostrado en la figura 37.10a? Explique su respuesta.
37.19 ¿Qué determina el número de robots en una línea de ensamble automatizada como la mostrada en las figuras 37.22 y 37.32?
37.20 Describa situaciones en las que la forma y el tamaño del envolvente de trabajo de un robot (fig. 37.20) pueden ser críticos.
37.21 Explique las funciones de cada uno de los componentes de un robot industrial.
37.22 Explique la diferencia entre un vehículo guiado automáticamente y un vehículo autoguiado.
37.23 Dé cinco ejemplos específicos por los cuales sería conveniente un sistema de control: (*a*) de lazo abierto, y (*b*) de lazo cerrado.
37.24 Explique por qué los sensores se han vuelto tan fundamentales en el desarrollo de sistemas automatizados de manufactura.
37.25 ¿Por qué existe la necesidad de soportes fijos flexibles para sujetar piezas de trabajo? ¿Existe alguna desventaja? Explique su respuesta.
37.26 En la tabla 37.2 se muestran algunos ejemplos de productos comunes para cada categoría. Agregue otros ejemplos diferentes a esta lista.
37.27 Describa aplicaciones de la visión de máquina para partes específicas que son similares a los ejemplos mostrados en la figura 37.25.
37.28 Dibuje el espacio o volumen de trabajo (envolvente) de cada uno de los robots de la figura 37.19.

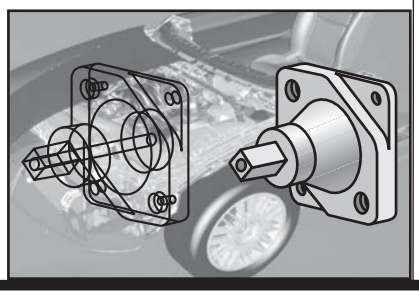
SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

37.29 Proporcione un ejemplo de una operación de formado metálico que sea apropiada para control adaptable.
37.30 Liste y comente los factores que deben considerarse en la elección de un sistema adecuado de manejo de materiales para una instalación específica de manufactura.
37.31 Describa posibles aplicaciones de robots industriales no consideradas en este capítulo.
37.32 Diseñe dos diferentes sistemas de sujetadores mecánicos (*grippers*) para aplicaciones muy diferentes.

37.33 Proporcione algunas aplicaciones de los sistemas mostrados en la figura 37.25a y c.
37.34 Para un sistema similar al mostrado en la figura 37.26, diseñe una instalación de soporte fijo flexible para un mandril (*chuck*) de torno.
37.35 Piense en otras formas de partes que puedan guiarse como las mostradas en la figura 37.33.
37.36 Dé ejemplos de productos que sean adecuados para los tres tipos de producción mostrados en la figura 37.3.
37.37 Dé ejemplos en los que los sensores táctiles o de contacto no serían apropiados. Explique por qué.
37.38 Describa situaciones en las que la visión de máquina no pueda aplicarse de manera apropiada y confiable. Explique por qué.
37.39 Elija una máquina de las partes II a la IV y diseñe un sistema en el que la fusión de sensores pueda usarse de manera efectiva.
37.40 ¿Por qué el nivel de automatización en la instalación de manufactura debe depender de la cantidad de producción y la capacidad de producción?
37.41 Piense en un producto y diseñe una línea de transferencia para éste que sea similar a la mostrada en la figura 37.5. Especifique los tipos y la cantidad de máquinas requeridas.
37.42 Opine sobre la utilidad y aplicaciones de los soportes modulares que constan de diversas prensas, pasadores, soportes y accesorios montados individuales sobre una placa base.
37.43 Inspeccione diversos productos domésticos y describa la manera en la que se ensamblaron. Comente cualquier cambio de diseño del producto que haría de manera que el ensamble, desensamble y servicio sean más sencillos y rápidos.
37.44 Revise la tabla 37.1 sobre la historia de la automatización y opine sobre qué nuevos desarrollos podrían posiblemente agregarse al final de la lista en el futuro próximo.
37.45 Diseñe un sujetador (*gripper*) de robot que recoja y coloque lo siguiente: (*a*) huevos, sin romperlos; (*b*) un objeto hecho de hule muy blando; (*c*) una esfera metálica con una superficie muy lisa y pulida; (*d*) un periódico, y (*e*) cubiertos de mesa, como cuchillos, cucharas y tenedores.
37.46 Revise las especificaciones de diversas máquinas de control numérico y liste sus números característicos para (*a*) su precisión de posicionamiento; (*b*) su precisión de repetición, y (*c*) resolución. Comente sus observaciones.
37.47 Consiga un tostador viejo y desensámblelo. Explique cómo lo ensamblaría mediante ensamble automático.
37.48 Investigue en la bibliografía y determine cómo funciona un aparato ordenador de bolos para boliche. Explique cómo los bolos nunca se colocan cabeza abajo en una línea del boliche.

Manufactura asistida por computadora

CAPÍTULO 38



En este capítulo se describe cómo influyen las computadoras en los procesos de diseño y manufactura de productos. Se muestra cómo ha ayudado el *software* de las computadoras a los ingenieros en las siguientes tareas:

- El diseño asistido por computadora, en la descripción gráfica de las partes.
- El uso de computadoras, en el control directo de los procesos de manufactura y en la manufactura asistida por computadora.
- La manera en que las computadoras pueden simular procesos y sistemas de manufactura.
- Los métodos de la tecnología de grupos para permitir la rápida recuperación de la experiencia previa sobre diseños y manufactura, y para aplicar la información de manera directa a nuevas situaciones.

38.1 Introducción 1191
38.2 Sistemas de manufactura 1191
38.3 Manufactura integrada por computadora 1192
38.4 Diseño e ingeniería asistidos por computadora 1195
38.5 Manufactura asistida por computadora 1203
38.6 Planeación de procesos asistidos por computadora 1204
38.7 Simulación por computadora de procesos y sistemas de manufactura 1206
38.8 Tecnología de grupos 1208

EJEMPLO:

38.1 Simulación de manufactura a escala real en una planta 1207

ESTUDIO DE CASO:

38.1 Desarrollo de modelos CAD para componentes automovilísticos 1199

38.1 Introducción

En el capítulo 36 se hace énfasis en la importancia de la calidad de los productos y en la necesidad de que la administración de una compañía se comprometa con el control de la calidad total. Recuérdese las premisas de que *la calidad debe integrarse en el producto*, que *la alta calidad no necesariamente significa costo más elevado* y que *de hecho, la comercialización de productos de calidad deficiente puede tener un costo muy alto para el fabricante*. Se ha demostrado que es mucho más fácil obtener mayor calidad a menor costo si las actividades de diseño y manufactura se integran de manera adecuada, en lugar de que se traten como entidades por separado.

La integración se puede realizar con éxito y de manera efectiva mediante el uso *de la computadora en el diseño, la ingeniería, manufactura, planeación de procesos* y *simulación de procesos y sistemas*, como se describe a lo largo de este capítulo. La disponibilidad generalizada de procesadores de alta velocidad y *software* muy desarrollado ha permitido que las computadoras proliferen en todas las áreas de la manufactura. Se utilizan para efectuar una amplia variedad de tareas que van desde la elaboración de proyectos de partes individuales hasta el modelado de procesos y sistemas de manufactura, así como la administración de bases de datos.

38.2 Sistemas de manufactura

El término *sistema* se deriva de la palabra griega *systema*, que significa "combinar". El sistema ha llegado a significar el arreglo de entidades físicas con parámetros de interacción

identificables y cuantificables. Como ya se vio en diversos capítulos, la manufactura conlleva una gran cantidad de actividades interdependientes que constan de distintas entidades, de ahí que pueda tratarse como un sistema.

La manufactura es un sistema complejo porque consta de muy diversos elementos físicos y humanos, algunos de los cuales son difíciles de predecir y controlar. Entre estas dificultades figuran factores como el suministro y costo de materias primas, cambios de mercados nacionales y globales, el impacto de tecnologías en constante desarrollo, así como el comportamiento y desempeño humanos. En términos ideales, un sistema de manufactura debe representarse mediante modelos matemáticos y físicos que muestren la naturaleza y el grado de interdependencia de todas las variables comprendidas. De esta manera, se pueden analizar los efectos de un cambio o perturbación ocurrido en cualquier parte del sistema y realizarse los ajustes necesarios.

Por ejemplo, el suministro de una materia prima en particular puede reducirse de manera significativa debido a, digamos, demandas globales, guerras, huelgas o geopolítica. Como consecuencia, el costo de la materia prima aumentaría y quizá tuvieran que buscarse y elegirse materiales alternativos. Esta selección debe realizarse después de considerar con cuidado diversos factores, ya que dicho cambio puede tener efectos adversos sobre la calidad del producto, la capacidad de producción y los costos de manufactura. Por ejemplo, es posible que no sea tan fácil dar forma, maquinar o soldar el material seleccionado, o que la integridad del producto sufra daños durante su procesamiento.

En un mercado en constante cambio, la demanda de un producto puede fluctuar aleatoria y rápidamente por diversas razones. Como ejemplos, considérese la disminución de dimensiones de los automóviles durante la década de 1980 en respuesta a la escasez de combustible y, en contraste, la reciente popularidad de los vehículos deportivos y el interés actual en los híbridos de gas y eléctricos. Así, el sistema debe tener la capacidad de producir el producto modificado en un tiempo de entrega relativamente corto y de reducir al mínimo los gastos en maquinaria y herramientas.

Tal vez sea difícil analizar y modelar un sistema tan complejo debido a la falta de información amplia o confiable sobre todas las variables comprendidas. Tampoco es fácil predecir ni controlar de manera correcta algunas de estas variables. Por ejemplo: (*a*) las características de las máquinas herramienta, su desempeño y su respuesta a alteraciones externas aleatorias no pueden modelarse con precisión; (*b*) es complicado predecir con precisión los costos de la materia prima, y (*c*) es difícil modelar el comportamiento y desempeño humanos. A pesar de las dificultades, se han realizado muchos avances en el modelado y la simulación de los sistemas de manufactura.

38.3 Manufactura integrada por computadora

Los diversos niveles de automatización en las operaciones de manufactura (que se describen en el capítulo 37) se han ampliado aún más con la inclusión de *funciones de procesamiento de información* y el uso de una amplia red de computadoras interactivas. Esto ha conducido a la *manufactura integrada por computadora* (CIM, por sus siglas en inglés), que describe la integración computarizada de todos los aspectos de diseño de productos, planeación de procesos, producción y distribución, así como la administración y operación de toda la organización de manufactura.

La manufactura integrada por computadora es más una *metodología* que un ensamble de máquinas, equipo y computadoras. La eficacia de la CIM depende en gran medida del uso de un *sistema de comunicaciones integrado a gran escala,* que comprenda computadoras, máquinas y sus controles (como se describe en la sección 39.7). Como la CIM idealmente debería comprender la operación total de una organización, tendría que poseer una amplia base de datos que viera los aspectos técnicos y empresariales de la operación. En consecuencia, si se planea todo a la vez, la CIM puede tener un costo exorbitante, en particular para pequeñas y medianas empresas.

La implantación de CIM en plantas ya existentes puede iniciar con módulos en diversas fases de la operación total. En el caso de plantas de manufactura nuevas, es fundamental una vasta planeación estratégica de largo plazo, que cubra todas las fases de la operación, para beneficiarse totalmente de la CIM. Dicha planeación debe tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Misión, objetivos y cultura de la organización.
- Disponibilidad de recursos financieros, técnicos y humanos.
- Tecnologías existentes y emergentes en las áreas de los productos por manufacturar.
- Nivel de integración requerido.

Subsistemas de CIM. Los sistemas de manufactura integrados por computadora están constituidos por subsistemas que se integran en su totalidad. Estos subsistemas constan de lo siguiente (ver fig. 38.1):

- Planeación y soporte empresarial.
- Diseño de productos.

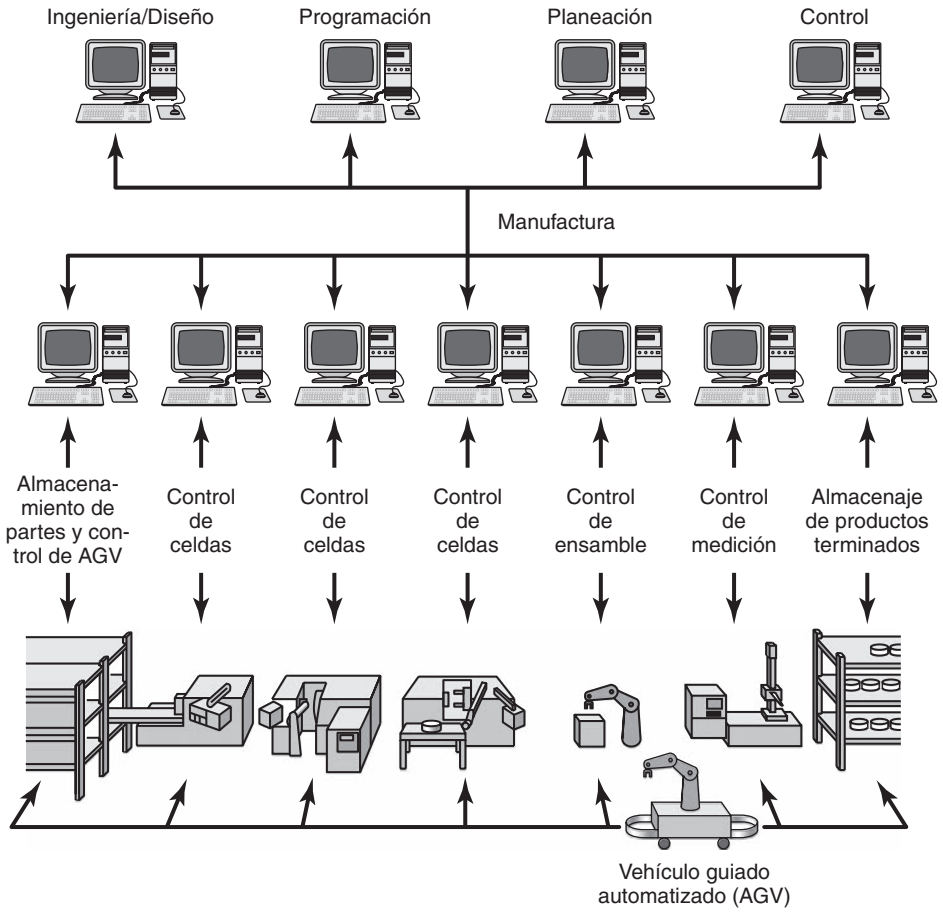


FIGURA 38.1 Esquema de un sistema de manufactura integrado por computadora. En la sección 39.2 se describen las celdas de manufactura y sus controles mostrados en la parte inferior izquierda. *Fuente*: U. Rembold.

- Planeación del proceso de manufactura.
- Automatización y control del proceso.
- Sistemas de supervisión de producción.

Los subsistemas se diseñan, desarrollan e implantan de manera que la salida de uno sirva como la entrada de otro. En términos de organización, estos subsistemas se dividen generalmente en dos funciones:

- **Funciones de planeación empresarial o comercial:** incluyen actividades como predicción, calendarización, planeación de los requerimientos de materiales, facturación y contabilidad.
- **Funciones de ejecución empresarial o comercial:** incluyen control de producción y procesos, manejo de materiales, ensayos e inspección del sistema.

Los beneficios principales de la CIM son:

- Énfasis en la calidad y uniformidad del producto, que se implanta mediante un mejor control del proceso.
- Uso eficiente de materiales, maquinaria y personal, así como reducción importante del inventario de trabajo en proceso, todo lo cual mejora la productividad y reduce el costo de los productos.
- Control total de la producción, calendarización y administración de la operación de manufactura.
- Respuesta a ciclos más cortos de vida de los productos, a cambios de las demandas del mercado y a la competencia global.

38.3.1 Base de datos

Un sistema eficiente de manufactura integrado por computadora requiere una *base de datos* simple que comparta toda la organización de manufactura. Las bases de datos consisten en información actualizada, detallada y precisa, relacionada con los productos, diseños, máquinas, procesos, materiales, producción, finanzas, compras, ventas y comercialización. Este vasto grupo de datos se almacena en la memoria de la computadora, y los individuos en la organización, o el propio sistema CIM, los recuperan o modifican según sea necesario, mientras está controlando diversos aspectos de diseño y producción.

Por lo general, una base de datos consta de los siguientes elementos, algunos de los cuales se clasifican como técnicos y otros como no técnicos:

- **Datos del producto:** forma, dimensiones y especificaciones de las partes.
- **Atributos de la administración de datos:** nivel de revisión y número de partes.
- **Datos de producción:** procesos de manufactura utilizados.
- **Datos operacionales:** calendarización, tamaño de lotes y requisitos de ensamble.
- **Datos de recursos:** capital, maquinaria, equipo, herramental, personal y sus capacidades.

Las bases de datos son construidas por individuos mediante diversos sensores en la maquinaria y equipo de producción. Un **sistema de adquisición de datos** (DAS, por sus siglas en inglés) recaba los datos en forma automática y puede informar sobre el número de partes que se producen por unidad de tiempo, su precisión dimensional, acabado superficial, peso y otras características, a velocidades especificadas de muestreo.

Los componentes de DAS incluyen microprocesadores, transductores y convertidores analógicos a digitales (ADC). Los sistemas de adquisición de datos también tienen la capacidad de analizar los datos y transferirlos a otras computadoras para su análisis estadístico, presentación y predicción de demanda de productos.

En el uso e implantación de bases de datos son importantes diversos factores:

1. Deben ser oportunas, precisas, de acceso rápido, fáciles de compartir y de uso amigable.
2. Debido a que se utiliza para diversos propósitos y por muchas personas, la base de datos tiene que ser flexible y dar respuesta a las necesidades de diferentes usuarios.
3. Diseñadores, ingenieros de manufactura, planeadores de procesos, funcionarios financieros y la administración de la compañía pueden tener acceso a los sistemas de CIM utilizando *códigos de acceso* apropiados. Por supuesto, las empresas deben proteger la información contra la manipulación indebida o el uso no autorizado.
4. Si existen problemas con la precisión de la información, deben recuperarse y restaurarse los datos correctos.

38.4 Diseño e ingeniería asistidos por computadora

El *diseño asistido por computadora* (CAD, por sus siglas en inglés) comprende el uso de computadoras para crear planos de diseño y modelos de productos (ver fig. I.2 en la Introducción General). Por lo común, el diseño asistido por computadora se asocia con **gráficos interactivos por computadora**, conocidos como **sistema CAD**. Los sistemas de diseño asistido por computadora son herramientas poderosas y se utilizan en el diseño y modelado geométrico de componentes y productos.

Los planos se generan en **estaciones de trabajo** y el diseño se muestra de modo continuo en el monitor con diferentes colores para los distintos componentes. El diseñador puede conceptualizar con facilidad la parte a diseñar en las pantallas de gráficos y considerar propuestas alternativos o modificar con rapidez un diseño específico que satisfaga requisitos particulares. Con el uso de *software* poderoso como CATIA (siglas en inglés de aplicaciones interactivas tridimensionales asistidas por computadora), el diseño puede someterse al análisis de ingeniería e identificar problemas potenciales, como exceso de carga, deflexión o interferencia en superficies de contacto durante el ensamble. También se almacena información (listas de materiales, especificaciones e instrucciones de manufactura) en la base de datos de CAD. Utilizando esta información, el diseñador puede analizar la economía de manufactura de diseños alternativos.

La **ingeniería asistida por computadora** (CAE, por sus siglas en inglés) permite que diversas aplicaciones compartan la información en la base de datos. Estas aplicaciones incluyen (*a*) el análisis de elementos finitos de esfuerzos, deformaciones, deflexiones y distribución de temperatura en estructuras y miembros de soporte de carga; (*b*) la generación, el almacenaje y la recuperación de datos de NC, y (*c*) el diseño de circuitos integrados y de diversos dispositivos electrónicos.

38.4.1 Especificaciones de intercambio

Debido a la disponibilidad de varios sistemas de CAD con diferentes características suministradas por distintos proveedores, es fundamental la comunicación efectiva y el intercambio de datos entre estos sistemas. El **formato de intercambio de planos** (DFX, por sus siglas en inglés) se desarrolló para usarse con *Autodesk* y básicamente se ha vuelto un estándar debido al éxito de largo plazo de este *software*. DFX sólo se limita a la transferencia de información de geometría. De manera similar, se utilizan formatos de es*t*ereo*l*itografía (STL, por sus siglas en inglés) a fin de exportar geometrías tridimensionales; en sus inicios, sólo para sistemas de producción rápida de prototipos (capítulo 20), pero recientemente se ha convertido en un formato de intercambio de datos entre diferentes sistemas de CAD.

Hoy en día, la **especificación inicial de intercambio de gráficas** (IGES, por sus siglas en inglés) cubre sobre todo la necesidad de un formato simple y neutral para tener una mejor compatibilidad y para la transferencia de mayor información, además de la de geometría. Esta especificación se utiliza para traducir en dos direcciones (hacia dentro

y hacia fuera de un sistema) y también se usa ampliamente para traducir datos tridimensionales de líneas y superficie. Debido a que IGES se encuentra en evolución, existen disponibles muchas variantes.

Otro formato útil es un patrón basado en un modelo sólido conocido como **Especificación de Intercambio de Datos de Productos** (PDES, por sus siglas en inglés), que se basa en el Estándar para el Intercambio de Datos del Modelo de Productos (STEP, por sus siglas en inglés), desarrollado por la International Standards Organization. La PDES permite transferir información sobre la forma, diseño, manufactura, aseguramiento de calidad, pruebas, mantenimiento, etc., entre sistemas CAD.

38.4.2 Elementos de los sistemas CAD

El proceso de diseño en un sistema CAD consiste en cuatro etapas que se describen en esta sección.

Modelado geométrico. En el modelado geométrico, un objeto físico o cualquiera de sus partes se describe matemática o analíticamente. Primero, el diseñador construye un modelo geométrico proporcionando comandos que creen o modifiquen líneas, superficies, sólidos, dimensiones y texto. En su conjunto, éstos presentan una representación precisa y completa bidimensional o tridimensional del objeto. Los resultados de estos comandos se muestran y se mueven en la pantalla y se puede agrandar cualquier sección deseada para ver detalles. Estos datos se almacenan en la base de datos contenida en la memoria de la computadora.

Los modelos en un sistema CAD se pueden presentar de tres diferentes maneras.

1. En la **representación lineal** (**estructura de alambres**, fig. 38.2), todos los bordes del modelo son visibles como líneas sólidas. Sin embargo, esta imagen puede ser ambigua, en particular para formas complejas, por lo que suelen utilizarse diversos colores para diferentes partes del objeto, a fin de facilitar su visualización.

   Los tres tipos de representaciones de alambres son de dos, dos y media, y tres dimensiones. Una imagen bidimensional muestra el perfil del objeto. Una imagen de dos y media dimensiones se puede obtener mediante barrido traslacional, es decir, moviendo el objeto bidimensional a lo largo del eje *z*. En el caso de los objetos redondos, es posible generar un modelo de dos y media dimensiones simplemente rotando un modelo bidimensional alrededor de su eje.

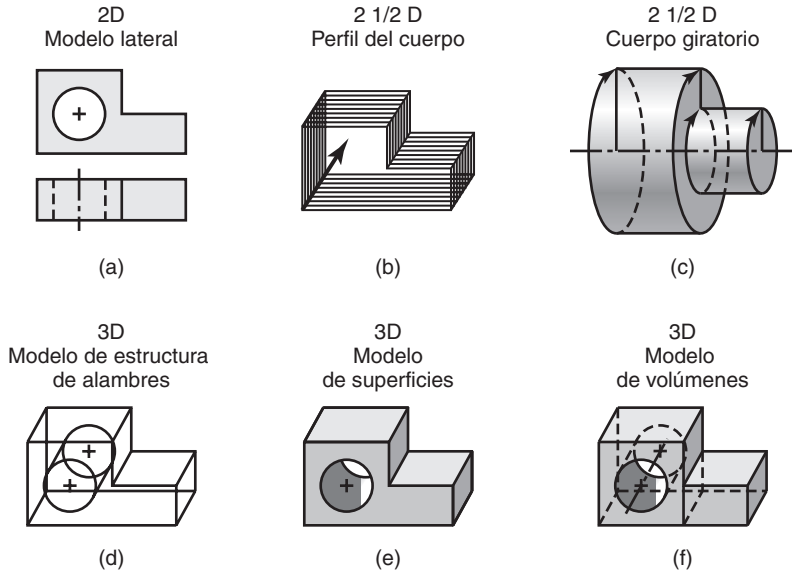


FIGURA 38.2 Diversos tipos de modelado para CAD.

2. En el **modelo de superficies**, se muestran todas las superficies visibles en el modelo. Los modelos de superficies definen los rasgos superficiales y los bordes de los objetos. Los programas modernos de CAD utilizan curvas de Bezier, *B-splines* (reglas flexibles) (NURBS), o B-*splines* racionales no uniformes para el modelado de superficies. Cada uno de ellos utiliza puntos de control para definir una curva o superficie polinomial. Una curva de Bezier pasa a través del primero y del último vértices y emplea los otros puntos de control para generar una curva combinada.

   La desventaja de las curvas de Bezier es que la modificación de un punto de control afecta toda la curva. La B-*spline* es la curva polinomial de una pieza doblada, en la que la modificación de un punto de control sólo afecta la curva en el área de modificación. En la figura 38.3 se muestran ejemplos de curvas de Bezier y B-*splines* bidimensionales. Una NURBS (siglas en inglés de B-*spline* racional *n*o *u*niforme) es una clase especial de B-*spline* en la que cada punto de control tiene un peso asociado a ella.

3. En el **modelo de sólidos** se muestran todas las superficies, pero los datos describen el volumen interior. Se pueden construir modelos de sólidos a partir de "volúmenes barridos" (figs. 38.2b y c) o mediante las técnicas mostradas en la figura 38.4. En la **representación de límites** (B-*rep*), se combinan superficies para desarrollar un modelo de sólidos (fig. 38.4a). En la **geometría constructiva de sólidos** (CSG, por sus siglas en inglés) se combinan formas simples como esferas, cubos, bloques, cilindros y conos (conocidos como **primitivos de sólidos**) para desarrollar un modelo de sólidos (fig. 38.4b).

   Existen programas mediante los cuales el usuario selecciona cualquier combinación de estos primitivos y sus tamaños y los combina en el modelo de sólidos deseado. Aunque los modelos de sólidos tienen ciertas ventajas (como la facilidad de análisis de diseño y la de preparación para manufactura de la parte), requieren más memoria de la computadora y tiempo de procesamiento que los modelos de estructuras de alambre y de superficies mostrados en la figura 38.2.

Un tipo especial de modelo de sólidos es un **modelo paramétrico**, en el que una parte se almacena no sólo en términos de definición de B-*rep* o CSG, sino que se deriva de las dimensiones y restricciones que definen los rasgos (fig. 38.5). Cada que se hace un cambio, la parte se recrea a partir de sus definiciones. Esto permite actualizaciones simples y directas y cambios en los modelos.

En la figura 38.6 se muestra la **representación "octree"** de un objeto sólido; es una figura tridimensional análoga a píxeles en una pantalla de televisión. Así como cualquier área se puede dividir en cuadrantes, cualquier volumen puede dividirse en octantes, que se identifican como sólidos, huecos o parcialmente llenos. Los *voxeles* (de p*íxeles* de *vol*umen) parcialmente llenos se fraccionan en octantes más pequeños y se reclasifican. Con resolución creciente, se logra un detalle excepcional de la parte. Este proceso puede parecer

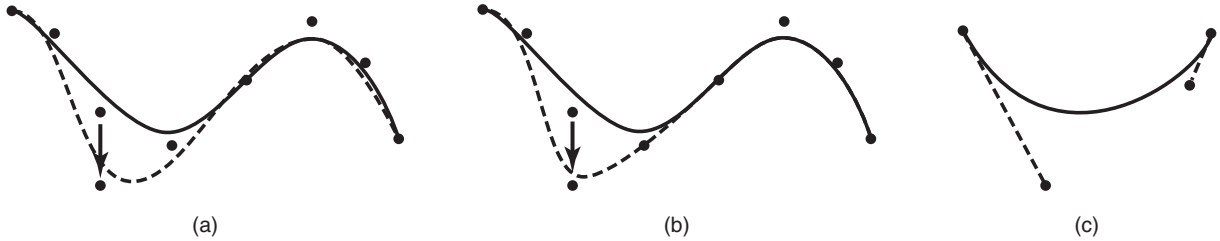


FIGURA 38.3 Tipos de "splines". *(a)* Una curva de Bezier pasa por el primero y último punto de control, pero genera una curva a partir de los demás puntos. El cambio de un punto de control modifica toda la curva. *(b)* Una "B-spline" se construye por piezas de manera que el cambio de un vértice afecta la curva sólo en la proximidad del punto de control cambiado. *(c)* Curva de Bezier por piezas de tercer orden (cúbico) construida mediante dos puntos de control adyacentes con otros dos puntos de control que definen la pendiente de la curva en los puntos extremos. Una curva de Bezier por piezas de tercer orden es continua, pero su pendiente puede ser discontinua.

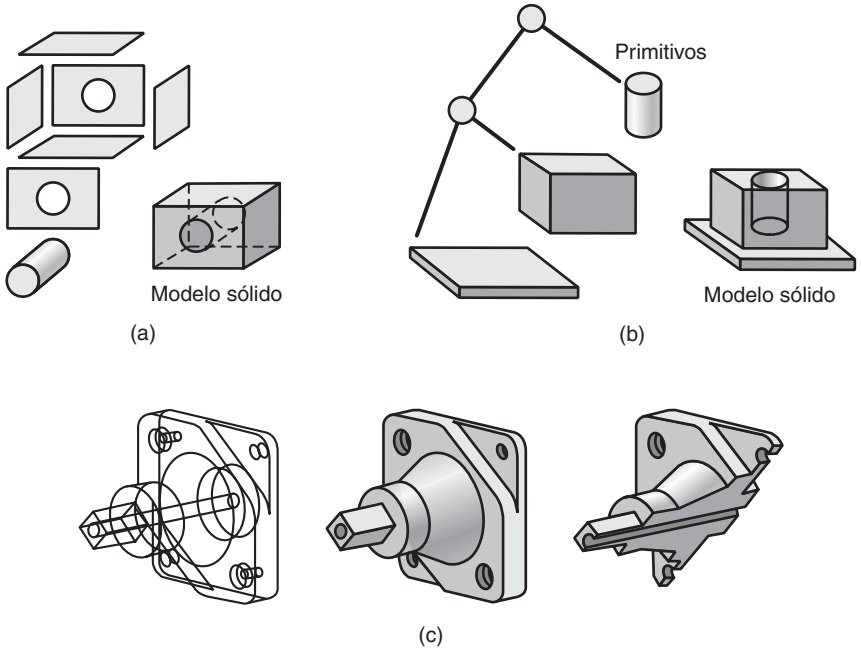


FIGURA 38.4 *(a)* Representación de límites de sólidos que muestran las superficies envolventes del modelo de sólido y el modelo de sólidos generado. *(b)* Modelo de sólidos representado como composiciones de primitivos sólidos. *(c)* Tres representaciones de la misma parte con CAD. *Fuente*: P. Ranky.

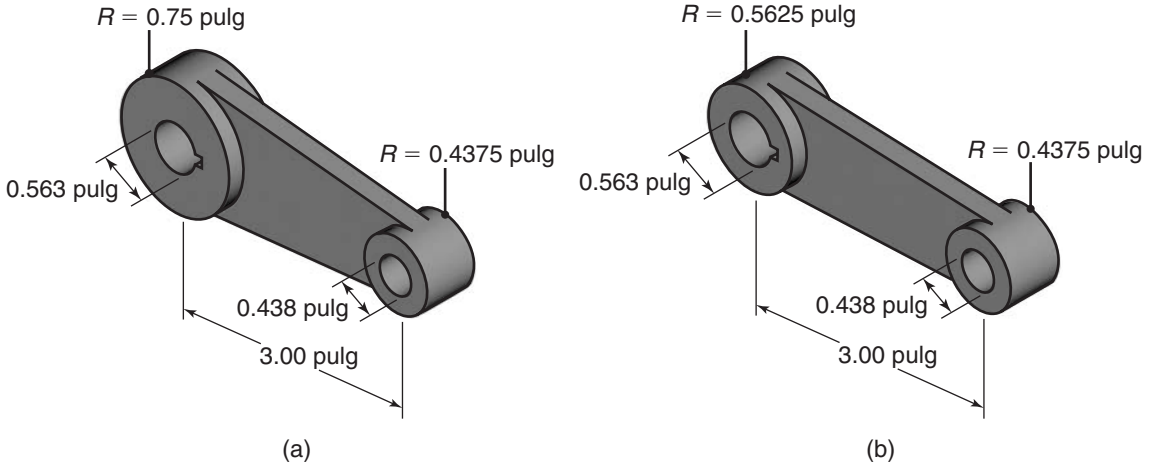


FIGURA 38.5 Ejemplo de diseño paramétrico. Las dimensiones de las características de una parte se pueden modificar con facilidad para obtener rápidamente un modelo de sólidos actualizado.

de alguna manera engorroso, pero permite la descripción exacta de superficies complejas. Se utiliza sobre todo en aplicaciones biomédicas, como en el caso del modelado de geometrías óseas.

Por lo común, se utiliza un **esqueleto** (fig. 38.7) para el análisis cinemático de partes o ensambles. Un esqueleto es la familia de líneas, planos y curvas que describen una parte sin el detalle de los modelos de superficies. Conceptualmente, un esqueleto se puede construir adaptando el círculo más grande (o esfera para objetos tridimensionales)

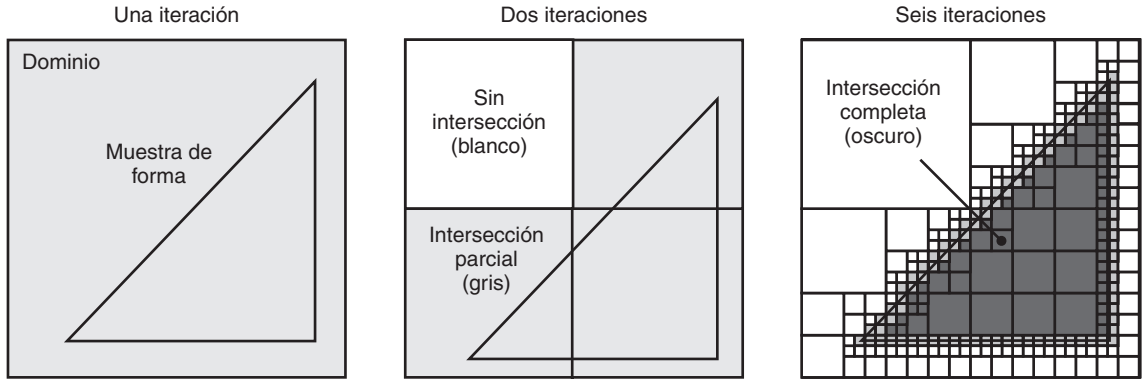


FIGURA 38.6 Representación octree de un objeto sólido. Cualquier volumen se puede dividir en octantes, que después se identifican como sólidos, huecos o parcialmente llenos. Se muestra una versión bidimensional (o *quadtree*) para la representación de formas en un plano.

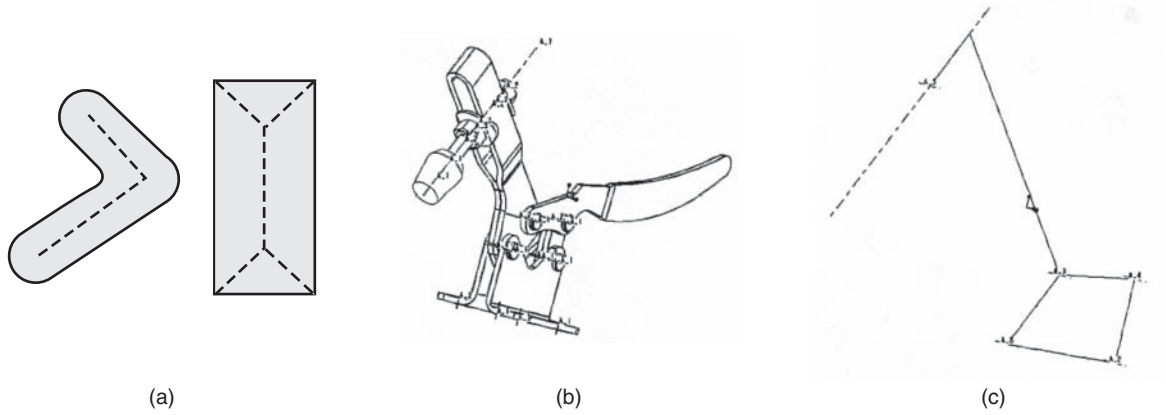


FIGURA 38.7 *(a)* Ilustración de la estructura de datos del esqueleto para objetos sólidos. El esqueleto es la línea punteada en el interior del objeto. *(b)* Modelo de esqueleto utilizado para análisis cinemático de una prensa. *Fuente*: S. D. Lockhart y C. M. Jonson, *Engineering Design Communication*, Prentice Hall, 2000.

dentro de la geometría. El esqueleto es el conjunto de puntos que conectan los centros de los círculos o esferas. Un área actual de investigación comprende el uso de modelos de esqueleto en lugar de los modelos convencionales de superficies o de sólidos.

ESTUDIO DE CASO 38.1 Desarrollo de modelos CAD para componentes automovilísticos

Los modelos CAD se utilizan ampliamente para una gran variedad de tareas. Por ejemplo, en la industria automotriz, es muy importante poseer el modelo CAD de un componente específico en la base de datos de productos a fin de asegurar que todos los que trabajen en él tengan los datos que necesitan para realizar sus tareas. Debe tenerse mucho cuidado para construir modelos CAD muy precisos de los componentes automovilísticos que los pasajeros ven y con los que interactúan de manera regular, como los tableros exteriores de las carrocerías, las manijas, los asientos y los tableros de instrumentos (fig. 38.8). La calidad de las superficies *visibles* (clase I) tiene un efecto importante en la calidad general del vehículo y en la percepción del cliente sobre la apariencia y sensación del automóvil.

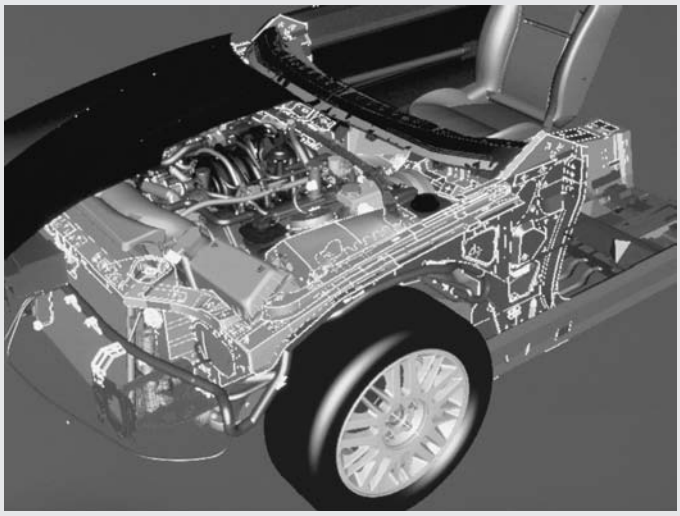


FIGURA 38.8 Cada componente de un vehículo, desde los tableros de la carrocería hasta las perillas en los tableros de instrumentos, tiene un modelo de sólidos asociado. *Fuente*: Cortesía de Ford Motor Company.

Bosquejos de conceptos bidimensionales

Los diseñadores con antecedentes y experiencia en diseño industrial o arte primero desarrollan conceptos bidimensionales mediante una serie de bosquejos que, la mayoría de las veces, se dibujan a mano, aunque puede utilizarse software, en especial si el diseñador empieza con una fotografía o un plano digitalizado que necesita modificación. Los bosquejos de conceptos proporcionan una sensación general para la estética del objeto, con frecuencia son muy detallados y muestran textura, color y dónde deben coincidir las superficies individuales en el vehículo.

La mayoría de las ocasiones se da a los diseñadores una serie de restricciones de empaque, como (a) la manera en que un componente debe ensamblarse con otros; (b) cuál debe ser el tamaño del componente, y (c) cuáles deben ser el tamaño y la forma de cualquier estructura que quede detrás de las superficies visibles. El tiempo comprendido en producir una serie de dichos bosquejos de conceptos para un componente individual o un grupo de componentes es por lo común desde unos cuantos días hasta varias semanas.

Modelo superficial tridimensional

Al revisar un concepto y refinarlo, se construyen diversos modelos de superficies muy precisos del componente. Para iniciar dichos modelos, un escáner óptico controlado por computadora explora un modelo de arcilla conceptualizado, produciendo una *nube de puntos* organizados a lo largo de las líneas de exploración. Dependiendo del tamaño del componente, la nube de puntos puede tener entre cientos de miles y millones de puntos. Esta nube se lee en el *software* de procesamiento de puntos (como Paraform[1] o ICEM Surf[2]) para organizar mejor los puntos y filtrar el ruido. La exploración puede tardar desde varias horas hasta un día para completarse. Sin embargo, si ya existe un modelo de arcilla tridimensional del componente, se convierte en una nube de puntos organizada en líneas de exploración sin necesidad de exploración física ni procesamiento posterior de nube de puntos.

[1]FreeForm es un producto de SensAble Technologies, Inc.
[2]Paraform es un producto de Paraform, Inc.

A continuación se utilizan las líneas de exploración de la nube de puntos para construir superficies matemáticas usando *software* como ICEM Surf[3] y Alias/Wavefront Studio Tools[4]. Para construir las superficies, primero se construyen las curvas de forma libre de NURBS que se interpolan o aproximan a las líneas de exploración. Después, se adapta un parche superficial de NURBS mediante las curvas. Un parche superficial individual modela una pequeña región de la superficie de un componente simple. Se construyen varios parches y se unen con cuidado en los bordes comunes para formar toda la superficie.

Las superficies se unen una a otra en los bordes comunes para modelar todo un componente. Se requiere mucha experiencia a fin de determinar cómo dividir una superficie en un grupo de parches que puedan adaptarse con las superficies de bajo orden más simples posibles y seguir coincidiendo perfectamente en los límites comunes. Un especialista en superficies realiza esta tarea junto con el diseñador para asegurar que las superficies sean de alta calidad y que capturan la intención de este último. El tiempo necesario para modelar un componente simple puede ser hasta de una semana.

Los modelos de superficies se pasan a los diversos departamentos que participan en el proceso para que se utilicen en el diseño del herramental, verificaciones de factibilidad, análisis y en el diseño de superficies *no visibles* (clase II). Conforme evoluciona el diseño, las tolerancias dimensionales en las superficies se hacen cada vez más cerradas.

Al diseñar tableros de carrocerías exteriores, una etapa importante es la finalización de lo que se conoce como *primera brida y filete*, que se muestra en la figura 38.9, en la que los bordes de los tableros de la carrocería se doblan o dobladillan (ver fig. 16.23c) para proveer una brida o saliente que conecte con el tablero interno (ver fig. 16.25). La forma de la brida y el filete afecta toda la estética y forma del tablero de la carrocería, por lo que es importante diseñarla con cuidado. Después de decidir la forma del filete y la brida, se pueden terminar los diseños del tablero interno.

Verificación superficial

Una vez terminado el modelo final de superficies, debe verificarse y evaluarse respecto de la calidad superficial y la estética. Las trayectorias de las herramientas NC se generan en forma automática a partir de las superficies, ya sea del *software* para la superficie interna o mediante *software* para maquinado especializado. Después se usan las trayectorias de las herramientas a fin de maquinar mediante CNC las superficies en arcilla. Si el componente es pequeño, en lugar de maquinar un modelo de arcilla puede generarse un archivo STL y es posible construir la maqueta en una máquina de fabricación rápida de prototipos (ver capítulo 20). En cualquier caso, tarda de varias horas a varios días maquinar un componente y efectuar cualquier acabado manual que pueda ser necesario.

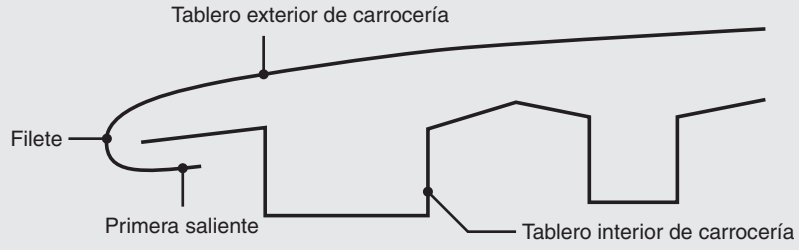


FIGURA 38.9 Primera saliente y filete.

[3]ICEM Surf es un producto de ICEM Technologies, Inc.
[4]Studio Tools es un producto de Alias/Wavefront.

Los modelos de arcilla pueden recubrirse con una capa delgada de látex y pintarse para hacerlos ver más realistas y ayudar a evaluar la calidad superficial. El recubrimiento se puede modificar a fin de mejorar la tersura superficial entre los parches o para cambiar la manera en que la luz se refleja sobre la superficie del modelo. Todos los cambios realizados en la arcilla deben trasladarse de nuevo al modelo digital de superficies, ya sea mediante escaneo, ajustando otra vez los parches de superficies o retocando la forma de los parches existentes. En esta etapa de la verificación superficial sólo pueden hacerse cambios mínimos, menores que $\pm$ 0.5 mm (0.04 pulgada).

Construcción del modelo de sólido

Después de concluir el modelo de superficies, éste se utiliza para desarrollar un modelo de sólido. Para componentes de lámina metálica (como tableros de carrocerías), los especialistas en carrocerías compensan las superficies para formar un sólido. Para otros componentes (como tableros de instrumentos, manijas de puertas o volantes), agregan características de manufactura al modelo de superficies (como bridas, soportes y varillas). Colaboran con los fabricantes a fin de determinar qué características deben añadirse y dónde deben colocarse para asegurar que el componente se pueda fabricar con los materiales deseados y al costo objetivo.

En el proceso de fabricación de un modelo de sólido, puede descubrirse que se debe modificar el modelo de superficies debido a: (*a*) cambios en las restricciones de empaque, (*b*) el componente no satisface los requisitos mínimos de manufactura, o (*c*) las superficies no coinciden apropiadamente en los bordes comunes con la suavidad o tersura adecuada. Estos cambios se comunican de nuevo al modelador de superficies y al diseñador para que puedan modificarlas y verificarlas otra vez. Por último, el modelo de sólido se introduce en una base de datos de productos, en la que proveedores e ingenieros pueden disponer de él para análisis adicional y manufactura.

Fuente: Cortesía de A. Marsan y P. Stewart, Ford Motor Company.

Análisis y optimización del diseño. Después de haber determinado las características geométricas de un diseño particular, éste se somete a un análisis de ingeniería. Esta fase puede consistir en examinar (por ejemplo) esfuerzos, deformaciones, deflexiones, vibraciones, transferencia de calor, distribución de temperaturas o tolerancias dimensionales. Existen diversos paquetes sofisticados, cada uno con las capacidades para calcular estas cantidades con precisión y rapidez.

Debido a la relativa facilidad con que se pueden realizar dichos análisis en la actualidad, los diseñadores tienen cada vez más interés en examinar un diseño con mayor detenimiento antes de pasarlo a producción. No obstante, es probable que se requieran experimentos y mediciones en el campo para determinar los efectos reales de cargas, temperatura y otras variables en los componentes diseñados.

Revisión y evaluación de diseños. Una etapa importante del diseño es la revisión y evaluación de diseños utilizada para verificar cualquier interferencia entre diferentes componentes. Esto se realiza para evitar dificultades durante el ensamble o uso de la parte y para determinar si los miembros móviles (como las articulaciones) van a funcionar como se pretende. Existe *software* con capacidades de animación para identificar problemas potenciales con miembros móviles y otras situaciones dinámicas. Durante la etapa de revisión y evaluación de diseños, se aplican las dimensiones y tolerancias con precisión en la parte al grado total requerido para manufacturarla.

Documentación y proyectos. Después de haber concluido las etapas anteriores, el diseño se reproduce por medio de máquinas automatizadas de proyectos para documentación y referencia. En esta etapa también se desarrollan e imprimen planos detallados y

de trabajo. El sistema CAD tiene asimismo la capacidad de desarrollar y dibujar vistas de sección de la parte, escalar los planos y efectuar transformaciones para presentar diversas vistas de la parte.

Base de datos. Muchos componentes son estándares, ya que se producen en masa de acuerdo con determinada especificación de diseño (como tornillos o engranes), o son idénticos a partes utilizadas en diseños anteriores. De ahí que los sistemas modernos CAD posean un sistema de administración de base de datos que permite a los diseñadores localizar, ver y adaptar partes de una biblioteca de partes en existencia. Éstas se pueden modelar paramétricamente a fin de permitir la actualización efectiva de costos de la geometría. Existen algunas bases de datos comerciales con amplias bibliotecas de partes; muchos proveedores ponen a disposición general sus bibliotecas en la red mundial.

38.5 Manufactura asistida por computadora

La *manufactura asistida por computadora* (CAM, por sus siglas en inglés) comprende el uso de computadoras para auxiliar en todas las fases de manufactura de un producto. Incluye muchas de las tecnologías descritas en el capítulo 37 y en éste. Debido a los beneficios conjuntos, a menudo el diseño asistido por computadora y la manufactura asistida por computadora se combinan en **sistemas CAD/CAM**. Esta combinación permite transferir información de la etapa de diseño a la etapa de planeación de manufactura sin necesidad de introducir manualmente los datos sobre la geometría de la parte otra vez. La CAM almacena y procesa la base de datos desarrollada durante el CAD con los datos e instrucciones necesarios para operar y controlar maquinaria de producción, equipo de manejo de materiales y ensayos e inspección automatizados para alcanzar la calidad de los productos. Los sistemas CAD/CAM también cuentan con la capacidad de codificar y clasificar partes en grupos que tienen formas similares utilizando codificación alfanumérica (ver *tecnología de grupos*, sección 38.8).

Un rasgo importante de CAD/CAM en las operaciones de maquinado es su capacidad para describir la *trayectoria de las herramientas* (ver figs. 23.11, 23.12, 24.2, 25.9, 26.12 y 26.20). Las instrucciones (programas) se generan en la computadora y el programador las puede modificar para optimizar la trayectoria de las herramientas. El ingeniero o técnico puede desplegar y verificar en forma visual la trayectoria de las herramientas en caso de posibles colisiones con las prensas de sujeción, soportes fijos u otras interferencias.

Al estandarizar el desarrollo de los productos y reducir el esfuerzo del diseño, pruebas y trabajo de los prototipos, CAD/CAM ha hecho posible reducir de modo significativo los costos de manufactura y ha mejorado la productividad. Por ejemplo, el avión de pasajeros Boeing 777 de dos motores se diseñó totalmente por computadora (**diseño sin documentos: *paperless design***), con 2000 estaciones de trabajo conectadas a ocho computadoras. El plano se construyó en forma directa del *software* de CAD/CAM desarrollado (un sistema CATIA mejorado) y no se construyeron prototipos ni maquetas, como se requirió para modelos anteriores. El costo de este desarrollo fue de $6 mil millones de dólares.

Algunas aplicaciones comunes de CAD/CAM son las siguientes:

- Programación de control numérico y robots industriales.
- Diseño de matrices o dados y moldes para fundición, por ejemplo, en los que se programan anticipadamente las tolerancias por contracción.
- Matrices o dados para operaciones de trabajo mecánico, como matrices complejas para formado de láminas y matrices progresivas para estampado.
- Diseño de herramental y soportes fijos, y electrodos EDM.

- Control de calidad e inspección, como las máquinas de medición por coordenadas programadas en una estación de trabajo de CAD/CAM.
- Planeación y programación de proceso.
- Distribución de planta.

38.6 Planeación de procesos asistidos por computadora

La *planeación de procesos* se relaciona con la selección de métodos de producción: herramientas, soportes fijos, maquinaria, secuencia de operaciones y ensamble. Todas estas actividades deben planearse, lo que tradicionalmente han hecho los planeadores de procesos. La secuencia de procesos y operaciones por realizar, las máquinas por emplear, el tiempo normal de cada operación e información similar se documentan en una **hoja de ruta** (fig. 38.10).

Cuando se hace en forma manual, esta tarea implica mano de obra intensa, consume mucho tiempo y se basa principalmente en la experiencia del planeador de procesos. La práctica moderna de las hojas de ruta consiste en guardar la información correspondiente en computadoras y adherir un *código de barras* (u otra identificación) a la parte. Después se pueden revisar los datos en un monitor dedicado.

HOJA DE RUTA

NOMBRE DEL CLIENTE: Midwest Valve Co. NOMBRE DE PARTE: Cuerpo de válvula

CANTIDAD: 15 PARTE No.: 302

Operación No.	Descripción de la operación	Máquina
10	Inspeccionar forja, verificar dureza	Máquina de ensayos de dureza Rockwell
20	Desbastar bridas de la máquina	Torno No. 5
30	Maquinar acabado a bridas	Torno No. 5
40	Mandrinar y contramandrinar orificio	Mandrinadora No. 1
50	Tornear ranuras internas	Mandrinadora No. 1
60	Taladrar y machuelear orificios	Taladradora No. 2
70	Rectificar caras frontales de la brida	Rectificadora No. 2
80	Rectificar orificio	Rectificadora interna No. 1
90	Limpiar	Desgrasadora de vapor
100	Inspeccionar	Probador ultrasónico

FIGURA 38.10 Ejemplo de una hoja de ruta simple. Estas *hojas de operación* pueden incluir información adicional sobre materiales, herramientas, tiempo estimado para cada operación, parámetros de procesamiento (como velocidades y avances de corte) y demás información. La hoja de ruta avanza con la parte de operación en operación. La práctica actual es almacenar todos los datos relevantes en computadoras y adherir un código de barras a la parte que sirve como clave para la base de datos de información de las partes.

La *planeación de procesos asistida por computadora* (CAPP, por sus siglas en inglés) realiza esta compleja tarea viendo la operación total como un sistema integrado, de manera que los pasos individuales comprendidos en la fabricación de cada parte se coordinan con otros y se realizan de manera eficiente y confiable. Aunque la CAPP requiere gran cantidad de *software* y buena coordinación con CAD/CAM (así como otros aspectos de sistemas integrados de manufactura comentados en el resto de este capítulo), es una herramienta poderosa para planear y programar de manera eficiente las operaciones de manufactura. La CAPP es muy efectiva en la producción de partes de bajo volumen y alta variedad.

38.6.1 Elementos de los sistemas CAPP

Existen dos tipos de sistemas de planeación de procesos asistida por computadora: *variante* y *generativo*.

Sistema variante También conocido como **sistema derivativo**, estos archivos de computadora contienen un plan de procesos estándar para la parte por manufacturar. Se investiga en la base de datos, mediante un número de código de la parte, para encontrar un plan estándar (basado en la forma y las características de manufactura de la parte). El plan se recupera, se muestra en pantalla para revisión y se imprime como hoja de ruta.

El plan de procesos variante incluye información como los tipos de herramientas y máquinas que se utilizarán, la secuencia de operaciones de manufactura por realizar, las velocidades, los avances y el tiempo requerido para cada secuencia. También se pueden efectuar modificaciones menores a un plan de procesos ya existente (que por lo general son necesarias). En el sistema variante, si el plan estándar de una parte específica no está en los archivos de la computadora, se recupera un plan que se aproxime a aquél (con un número de código similar y una hoja de ruta existente). Si dicha hoja no existe, se hace una para la nueva parte y se almacena en la memoria de la computadora.

Sistema generativo En éste se crea un plan de procesos automáticamente con base en los mismos procedimientos lógicos que seguiría un planeador tradicional de procesos en la fabricación de una parte específica. Sin embargo, el sistema generativo es complejo, porque debe contener información vasta y detallada de la forma y las dimensiones de la parte; capacidades del proceso; selección de los métodos de manufactura, maquinaria y herramientas, y la secuencia de operaciones por realizar. En la sección 39.8 se describen estas capacidades de las computadoras (conocidas como **sistemas expertos**).

El sistema generativo tiene la capacidad de crear un nuevo plan en lugar de utilizar y modificar uno existente (como debe hacer con el sistema variante). Aunque por lo general su uso es menos común que el del sistema variante, tiene ventajas como: (*a*) flexibilidad y consistencia de la planeación de procesos de nuevas partes, y (*b*) calidad general de planeación superior debido a la capacidad de la lógica de decisiones en el sistema para optimizar la planeación y usar tecnología actualizada de manufactura.

Las capacidades de planeación de procesos de las computadoras también se pueden integrar en la planeación y el control de los sistemas de producción. Estas actividades son un subsistema de la manufactura integrada por computadora, como se describe en la sección 38.3. Pueden realizarse diversas funciones, como **planeación de capacidades**, para que las plantas cumplan la calendarización de la producción, el control de inventario, las compras y la programación de la producción.

38.6.2 Planeación de requerimientos de materiales y planeación de recursos de manufactura

Los sistemas basados en computadora para manejar los inventarios y la calendarización de entrega de materias primas y herramientas se conocen como *planeación de requerimientos de materiales* (MRP, por sus siglas en inglés). Esta actividad (también llamada

método de *control de inventario*) comprende el mantenimiento de registros de inventarios de materiales, suministros, partes en diversas etapas de producción (conocido como trabajo en proceso o WIP, por sus siglas en inglés), órdenes, compras y programación.

Por lo general, en un programa maestro de producción participan diversos archivos y datos. Estos archivos pertenecen a las materias primas requeridas (*lista de materiales*), niveles de estructuras de productos (partidas individuales que componen un producto, como componentes, subensambles y ensambles) y programación.

La *planeación de recursos de manufactura* (MRP-II) controla todos los aspectos de la planeación de la manufactura mediante retroalimentación. Aunque el sistema es complejo, tiene la capacidad de programación final de la producción, supervisión de resultados reales en términos de desempeño y producción, y comparación de estos resultados contra el programa maestro de producción.

38.6.3 Planeación de recursos de las empresas

A principios de la década de 1990, la *planeación de recursos de las empresas* (ERP, por sus siglas en inglés) se volvió una tendencia importante. Es básicamente una extensión de la MRP-II, y aunque existen variaciones, también es un método para la planeación y el control efectivos de todos los recursos requeridos en una empresa a fin de tomar órdenes de productos, producirlos, enviarlos al cliente y darles servicio. La ERP intenta coordinar, optimizar e integrar de manera dinámica todas las fuentes de información y actividades técnicas y financieras tan diversas que hay en una organización de manufactura.

La implantación efectiva de ERP es una tarea difícil y desafiante debido a los siguientes factores:

- Las dificultades encontradas para la comunicación oportuna, efectiva y confiable entre todas las partes comprendidas, sobre todo en una empresa global; de ahí que el equipo de trabajo sea fundamental.
- La necesidad de prácticas cambiantes y evolutivas de negocios en una era en la que los sistemas de información y el comercio electrónico se han vuelto muy importantes para el éxito de organizaciones de negocios.
- El cumplimiento de requisitos amplios y específicos del equipo y el *software* para la ERP.

38.7 Simulación por computadora de procesos y sistemas de manufactura

Con la creciente sofisticación del equipo y *software* para computadoras, la *simulación por computadora* de los procesos y sistemas de manufactura ha avanzado con rapidez. La simulación tiene dos formas básicas:

- Es un modelo de operación específica que tiene el propósito de determinar la viabilidad de un proceso u optimizar o mejorar su desempeño.
- Modela múltiples procesos y sus interacciones para ayudar a los planeadores de procesos y diseñadores de plantas en la disposición de la maquinaria e instalaciones.

Se han modelado procesos individuales utilizando diversos esquemas matemáticos (ver fig. 10.17). De manera creciente, se ha aplicado el análisis de elementos finitos en los paquetes (**simulación de procesos**) disponibles comercialmente y son poco costosos. Los problemas comunes enfocados son la *viabilidad de los procesos* (como la formabilidad de la lámina metálica en cierta matriz o dado) y la *optimización del proceso* (como flujo del material en el forjado de una matriz determinada a fin de identificar defectos potenciales, o diseños de moldes en fundición para eliminar puntos calientes, promover un enfriamiento uniforme y minimizar los defectos).

La simulación de todo un sistema de manufactura que comprende procesos y equipos múltiples ayuda a los ingenieros de planta a organizar la maquinaria e identificar elementos críticos de la misma. Además, dichos modelos pueden ayudar a los ingenieros de manufactura con la programación y las rutas (mediante *simulación de eventos discretos*). Para estas simulaciones se utilizan paquetes de *software* disponibles comercialmente, pero también se pueden desarrollar programas de *software* escritos para una compañía específica.

EJEMPLO 38.1 Simulación de manufactura a escala real en una planta

La proliferación de sistemas de computadoras de bajo costo y alto desempeño y el desarrollo de *software* avanzado, han permitido la simulación de sistemas de manufactura a escala real en una planta y han conducido a la optimización de las operaciones de manufactura y ensamble.

Como un ejemplo, el *software* Envision, producido por Delmia Corporation, permite la simulación de procesos de manufactura en tres dimensiones (incluyendo maniquíes humanos) para identificar riesgos de seguridad, problemas de manufactura o congestionamientos; mejorar la precisión del maquinado; u optimizar la organización de las herramientas. Como la simulación se puede realizar antes de construir una línea de ensamble, es posible reducir de manera significativa el tiempo y costo de desarrollo. En la figura 38.11 se muestra la simulación de una línea robótica de soldadura en una planta automotriz, en la que se ha detectado una colisión entre un robot y un vehículo. Antes de poner en operación la línea, se puede modificar el programa del robot a fin de evitar dichas colisiones. En tanto que ésta es una demostración poderosa de la utilidad de la simulación de un sistema, la aplicación más común consiste en optimizar la secuencia de las operaciones y la organización de la maquinaria para reducir los costos de manufactura.

El *software* también tiene la capacidad de efectuar análisis ergonómicos de diversas operaciones e instalaciones de maquinaria y, por lo tanto, puede identificar

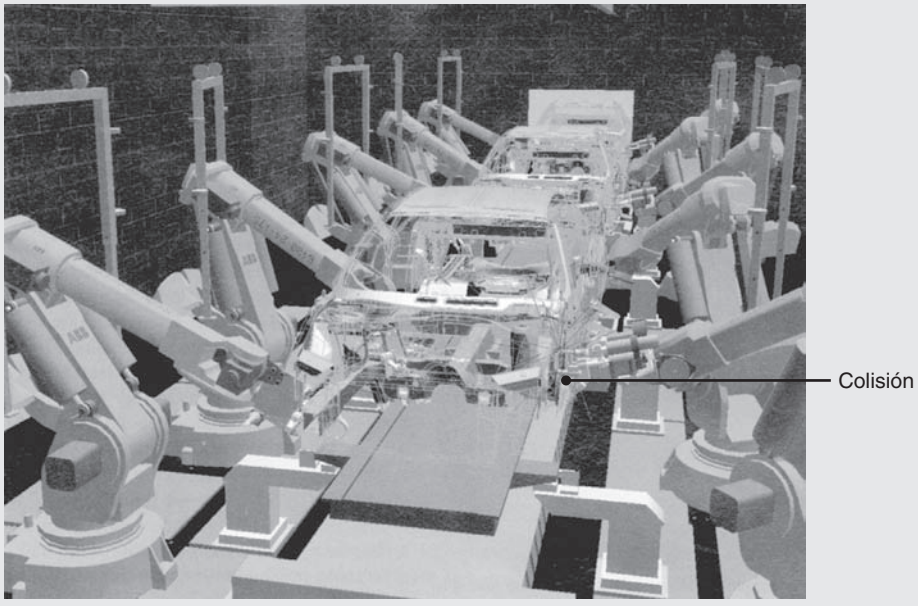


FIGURA 38.11 Simulación de una estación robótica de soldadura. Se ha detectado una colisión que los ingenieros de producción pueden corregir antes de construir la línea de ensamble, reduciendo así el tiempo y costo de desarrollo.

congestionamientos en el movimiento de las partes, el equipo o el personal. Después, el planeador de procesos puede liberar el congestionamiento ajustando los procedimientos automatizados o manuales en estos puntos. Mediante el uso de dichas técnicas, las instalaciones de Daimler-Chrysler en Rastatt, Alemania, tuvieron la capacidad de equilibrar sus líneas de producción de manera que cada trabajador estuviera ocupado en promedio de 85% a 95% del tiempo.

Otra aplicación de la simulación de sistemas es la planeación de las operaciones de manufactura para optimizar la producción y planear la producción justo a tiempo (sección 39.5). Por ejemplo, si un fabricante de automóviles necesita producir 1000 unidades en un determinado periodo, se puede optimizar la producción mediante ciertas estrategias (como la distribución de la cantidad de vehículos con quemacocos durante el día, o la agrupación de unidades por color), de modo que se minimice la cantidad de cambios de pintura en las cabinas. El *software* (como el producido por ILOG Corporation) puede planear y programar las operaciones de la planta con la antelación suficiente para ordenar el material según se requiera, eliminando así la acumulación de inventario.

La Nissan Corporation utilizaba *software* ILOG para ampliar la producción en sus instalaciones de Sunderland, Inglaterra. La planta ya estaba produciendo 7000 vehículos por semana cuando Nissan decidió aumentar la producción en 3000 unidades por semana. La solución convencional habría sido construir una línea de ensamble adicional con gran inversión de capital. Sin embargo, se observó que el *software* de programación existente (basado en la entrada de datos del gerente de la planta) no consideraba variables como la disponibilidad de partes y cambio de herramientas; la planta se estaba apegando a su programa sólo 3% del tiempo.

El *software* de ILOG optimiza la secuencia y el programa de manufactura y permite que los automóviles crucen de líneas de ensamble a líneas de pintura y de herramientas (según se requiera) para aumentar la producción. El resultado fue que la planta de Sunderland cumplió los objetivos de programación de vehículos en 85% del tiempo, eliminando gran parte de la laboriosa tarea de reprogramación de vehículos en los acumuladores intermedios de almacenamiento entre las secciones principales de la planta. Este método condujo a un aumento de la producción y el costo del *software* se recuperó en tres días de producción.

Fuente: Adaptado de *Mechanical Engineering*, marzo de 2001.

38.8 Tecnología de grupos

Muchas partes de los productos tienen ciertas similitudes en su forma y en su método de manufactura. La *tecnología de grupos* (GT, por sus siglas en inglés) es un concepto que busca aprovechar las *similitudes de diseño y procesamiento* entre las partes a producir. El término "tecnología de grupos" se utilizó por primera vez en 1959, pero no fue sino hasta que aumentó el uso de computadoras interactivas en la década de 1970 que esta tecnología se desarrolló de manera significativa.

La similitud en las características de partes similares (fig. 38.12) sugiere que se pueden obtener beneficios mediante la *clasificación* y *codificación* de estas partes en familias. Al desensamblar cada producto en sus componentes individuales e identificar las partes similares, una compañía descubrió que 90% de las 3000 partes fabricadas por una compañía entraban en sólo cinco familias principales.

Por ejemplo, una bomba puede dividirse en componentes básicos como motor, carcasa, eje, bridas y sellos. A pesar de la variedad de bombas manufacturadas, cada uno de estos componentes es el mismo en términos de diseño y características de manufactura. Por consiguiente, todos los ejes se pueden colocar en una misma *familia* y así sucesivamente. Además, se ha cuestionado por qué un producto en particular debe tener tantos tamaños diferentes de sujetadores.

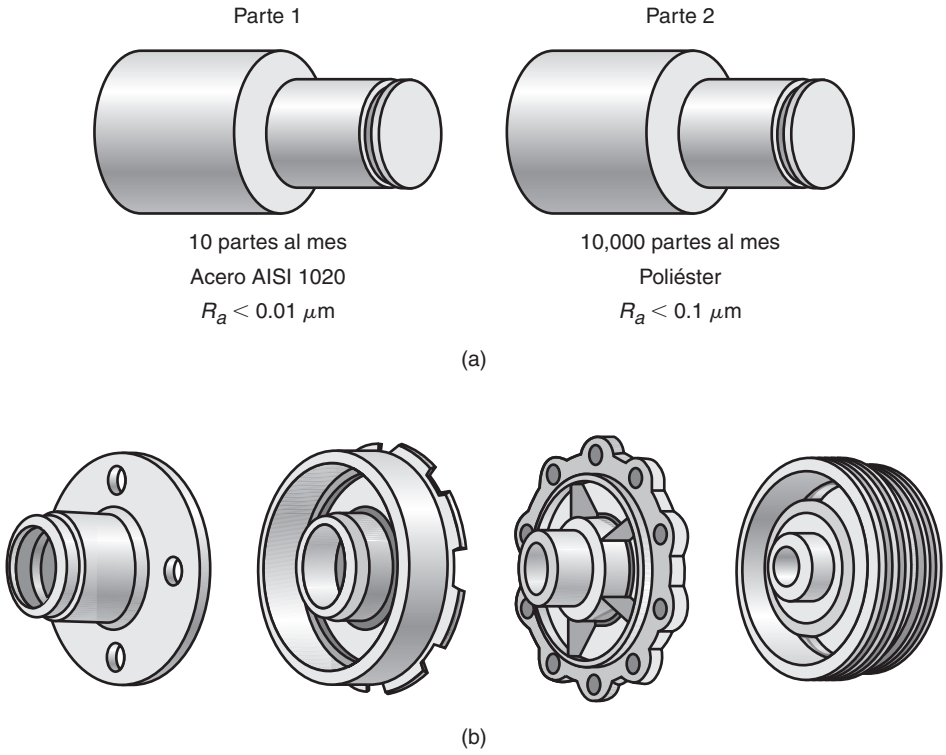


FIGURA 38.12 Agrupación de partes de acuerdo con *(a)* sus similitudes geométricas, y *(b)* atributos de manufactura.

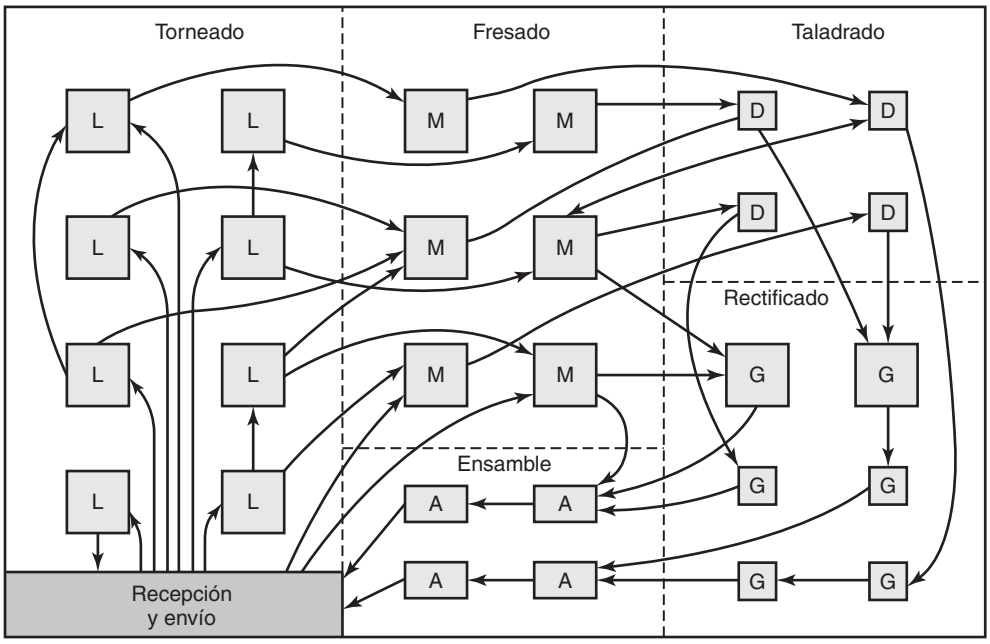
La tecnología de grupos se volvió muy atractiva debido a la variedad cada vez mayor de productos disponibles para el consumidor, que a menudo se producen en lotes. Dado que hoy en día casi 75% de la manufactura es producción en lote, se ha vuelto importante mejorar la eficiencia de dicha producción.

En la figura 38.13a se muestra el flujo tradicional de productos en la manufactura en lotes. Obsérvese que se ordenan máquinas del mismo tipo en grupos; es decir, grupos de tornos, fresadoras, taladradoras y rectificadoras. En dicha distribución (conocida como **distribución funcional**), por lo general existe considerable movimiento aleatorio, como lo muestran las flechas que indican movimiento de materiales y partes. Dicho arreglo no es eficiente, porque desperdicia tiempo y esfuerzos. Una línea de flujo de productos más eficiente para aprovechar la tecnología de grupos es el **arreglo o distribución de grupos** (fig. 38.13b). (Ver también *manufactura celular*, sección 39.2).

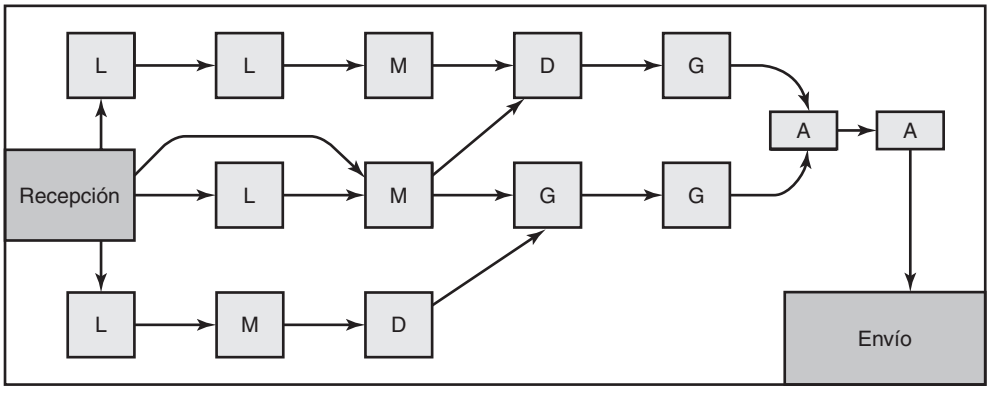
38.8.1 Ventajas de la tecnología de grupos

Las ventajas principales de la tecnología de grupos son las siguientes:

- Hace posible estandarizar el diseño de partes y minimizar la duplicación de diseños. Se pueden desarrollar nuevos diseños de partes utilizando diseños parecidos (incluso previamente usados), y así se puede ahorrar una cantidad significativa de tiempo y esfuerzo. El diseñador de productos puede determinar con rapidez si los datos de una parte similar ya existen en los archivos de la computadora.
- Los datos que reflejan la experiencia del diseñador y el planeador del proceso de manufactura se almacenan en la base de datos. Así, un ingeniero de nuevo ingreso se puede beneficiar rápidamente con dicha experiencia recuperando cualquiera de los diseños anteriores y planes de proceso.



(a)



(b)

FIGURA 38.13 *(a)* Arreglo funcional de máquinas herramienta en una planta tradicional. Las flechas indican el flujo de materiales y partes en diversas etapas de terminación. *(b)* Arreglo de tecnología de grupos (celular). *Leyenda*: L = Torno, M = Fresadora, D = Taladro, G = Rectificadora, A = Ensamble. *Fuente*: After M.P. Groover.

- Se pueden calcular con mayor facilidad los costos de manufactura y obtener estadísticas importantes sobre materiales, procesos, cantidad de partes producidas y otros factores, de manera más sencilla.
- Se estandarizan y calendarizan con más eficiencia los planes de procesos, se agrupan órdenes para producción más eficiente y se mejora el uso de las máquinas. Se reducen los tiempos de preparación y se producen partes de manera más eficaz, con producto de mejor calidad y más consistente. Se comparten herramientas, soportes fijos y maquinaria similares en la producción de una familia de partes. La programación NC se automatiza más plenamente.

- Con la implantación de CAD/CAM, manufactura celular y CIM, la tecnología de grupos tiene la capacidad de mejorar en gran medida la productividad y de reducir los costos en la producción en lote, acercándose a los beneficios de la producción en masa. Dependiendo del nivel de implantación, pueden existir ahorros potenciales de 5% a 75% en cada una de las diversas fases de diseño y manufactura.

38.8.2 Clasificación y codificación de las partes

En la tecnología de grupos, las partes se identifican y agrupan en familias mediante **sistemas de clasificación y codificación** (**C/C**). Este proceso es un primer paso crítico y complejo, y se realiza de acuerdo con los atributos de diseño y de manufactura de la parte. (Ver fig. 38.12).

Atributos de diseño. Se refieren a las similitudes de rasgos geométricos y consisten en lo siguiente:

- Formas y dimensiones externas e internas.
- Relaciones de aspecto (como longitud a anchura, o longitud a diámetro).
- Tolerancias dimensionales.
- Acabado superficial.
- Funciones de las partes.

Atributos de manufactura. Este sistema utiliza las similitudes en los métodos y la secuencia de las operaciones de manufactura realizados en la parte. Como hemos visto, la selección de un proceso (o procesos) de manufactura depende de muchos factores, entre los que se encuentran la forma, las dimensiones y otras características geométricas de la parte. Como consecuencia, se interrelacionan los atributos de manufactura y diseño. Los atributos de manufactura de una parte consisten en lo siguiente:

- Principales procesos utilizados.
- Procesos secundarios y de acabado empleados.
- Tolerancias dimensionales y acabado superficial.
- Secuencia de operaciones realizadas.
- Herramientas, dados, soportes y maquinaria empleada.
- Cantidad y capacidad de producción.

La codificación puede consumir mucho tiempo y se requiere considerable experiencia. Es posible realizar la codificación simplemente viendo las formas de las partes en forma genérica y clasificándolas después de manera apropiada (como partes que tienen simetría rotacional, partes con forma rectilínea y partes que poseen relaciones grandes de superficie a espesor). Las partes que se están revisando y clasificando deben ser representativas de las líneas de producción de la compañía. Un método más completo consiste en revisar todos los datos y planos relacionados con el diseño *y* manufactura de todas las partes.

Las partes también se pueden clasificar estudiando su flujo de producción durante el ciclo de manufactura, un enfoque conocido como **análisis de flujos de producción** (PFA, por sus siglas en inglés). Recuérdese que en la sección 38.6 las hojas de ruta muestran con claridad los planes de procesos y la secuencia de operaciones por realizar. Una desventaja del PFA es que una hoja de ruta particular no necesariamente indica que la operación total de manufactura sea la óptima.

38.8.3 Codificación

El código de partes se puede basar en el sistema propio de codificación de una compañía, o en uno de diversos sistemas de clasificación y codificación disponibles comercialmente.

Ya sea que se desarrolle de manera interna o que se compre, el sistema debe ser compatible con los demás sistemas de la compañía (como maquinaria NC y sistemas CAPP). En general, la estructura de codificación de las familias de partes consta de números, letras o una combinación de ambos. A cada componente específico de un producto se le asigna un código, que puede pertenecer sólo a atributos de diseño (por lo general, menos de 12 dígitos) o sólo a atributos de manufactura (aunque la mayoría de los sistemas avanzados incluyen ambos, utilizando hasta 30 dígitos).

Los tres *niveles de codificación* básicos varían en grado de complejidad.

Codificación jerárquica. En este código (también conocido como **monocódigo**), la interpretación de cada dígito sucesivo depende del valor del dígito anterior. Cada símbolo amplía la información contenida en el dígito anterior; por lo tanto, no se puede interpretar un dígito en el código de manera individual. La ventaja de este sistema es que un código corto puede contener una gran cantidad de información. Sin embargo, este método es difícil de aplicar en un sistema computarizado.

Policódigos. Cada dígito en este código (también conocido como **tipo cadena**) tiene su propia interpretación, que no depende del dígito anterior. Esta estructura tiende a ser relativamente larga, pero permite identificar atributos específicos de una parte y se adapta bien a la implantación por computadora.

Codificación de árbol de decisiones. Este sistema (también llamado **códigos híbridos**) es el más avanzado y combina atributos de diseño y manufactura (fig. 38.14).

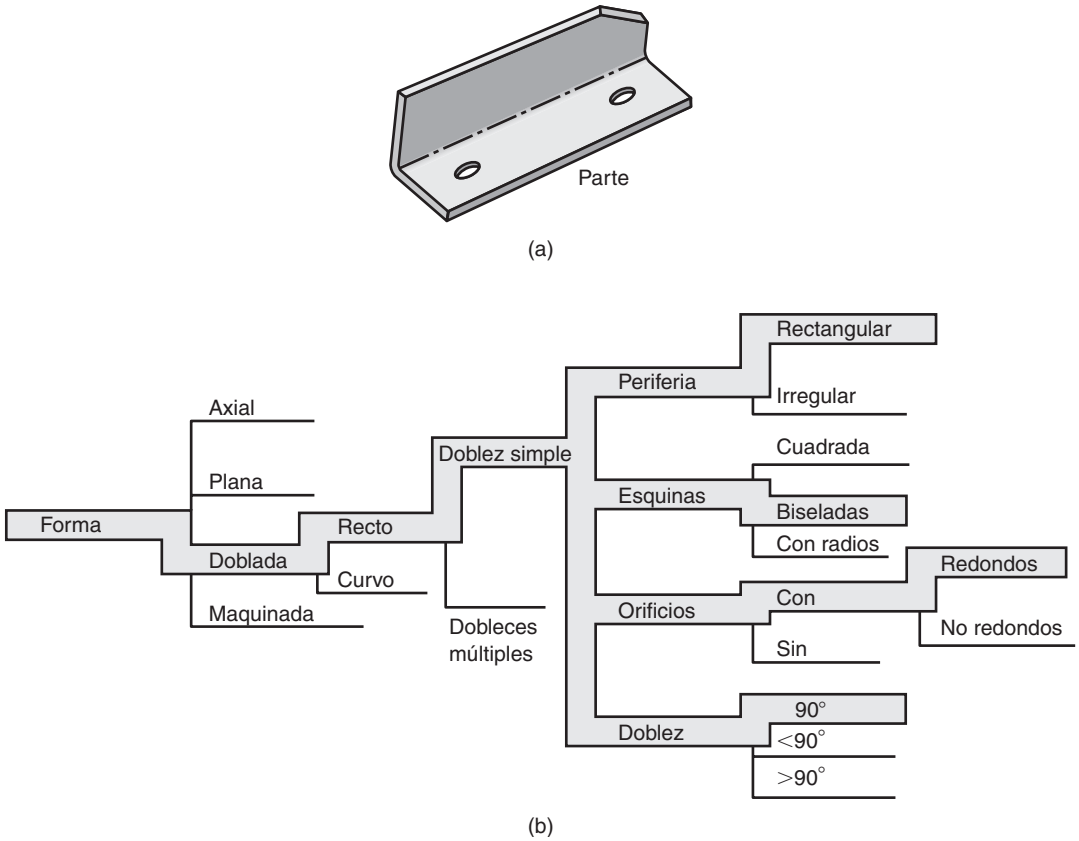


FIGURA 38.14 Clasificación de árbol de decisiones para una ménsula de lámina metálica. *Fuente*: G. W. Millar.

38.8.4 Sistemas de codificación

A continuación se describen tres sistemas importantes de codificación.

1. El **sistema Opitz** se desarrolló en la década de 1960 en Alemania por H. Opitz (1905-1977) y fue el primer sistema completo de codificación que se presentó. El código básico consta de nueve posiciones y utiliza los números dígitos (123456789), que representan datos de diseño y manufactura (fig. 38.15). Se pueden utilizar cuatro códigos adicionales (ABCD) para identificar el tipo y la secuencia de las operaciones de producción.

		Código de forma					**Código complementario**			
		1er. dígito Clase de parte	2º. dígito Forma principal	3er. dígito Maquinado de superficie rotacional	4º. dígito Maquinado de superficie plana	5º. dígito Orificios auxiliares, dientes de engranes, formado	Dígito 1	2	3	4
0	Partes rotacionales	$\frac{L}{D} \leqq 0.5$	Forma externa, elementos de forma externa	Forma interna, elementos de forma interna	Maquinado de superficie plana	Orificios auxiliares	Dimensión	Material	Forma original de materia prima	Precisión
1		$0.5 < \frac{L}{D} < 3$								
2		$\frac{L}{D} \geqq 3$				Dientes de engranes				
3		$\frac{L}{D} \leqq 2$ Con desviación	Forma principal	Maquinado rotacional, elementos de forma internos y externos		Orificios auxiliares, dientes de engranes y formado				
4		$\frac{L}{D} > 2$ Con desviación								
5		Especial								
6	Partes no rotacionales	$\frac{A}{B} \leqq 3, \frac{A}{C} \geqq 4$ Partes planas	Forma principal	Orificios principales	Maquinado de superficie plana	Orificios auxiliares, dientes de engranes y formado				
7		$\frac{A}{B} > 3$ Partes largas	Forma principal							
8		$\frac{A}{B} \leqq 3, \frac{A}{C} \geqq 4$ Partes cúbicas	Forma principal							
9		Especial								

FIGURA 38.15 Sistema de clasificación y codificación de acuerdo con Opitz, que consiste en un código de forma de cinco dígitos y un código complementario de forma de cuatro dígitos.

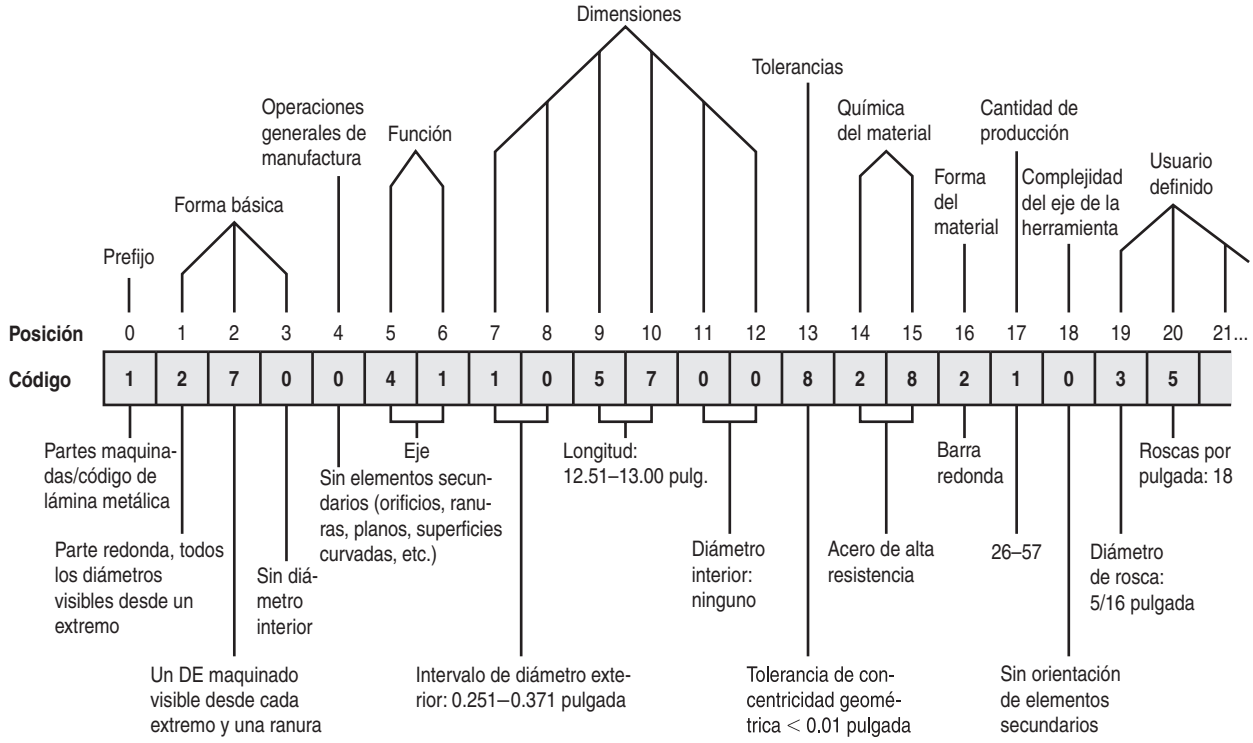


FIGURA 38.16 Código común multiClass para una parte maquinada. *Fuente*: Cortesía de Organization for Industrial Research.

Dígito	Artículos	(Componente rotacional)	
1	Nombre de las partes	Clasificación general	
2		Clasificación detallada	
3	Materiales	Clasificación general	
4		Clasificación detallada	
5	Dimensiones principales	Longitud	
6		Diámetro	
7	Formas primarias y relación de dimensiones principales		
8	Detalles de formas y tipos de procesos	Superficie externa	Superficie externa y forma primaria externa
9			Partes concéntricas con roscado de tornillo
10			Partes funcionales de corte
11			Partes con formas extraordinarias
12			Formado
13			Superficie cilíndrica
14		Superficie interna	Superficie interna
15			Superficie curvada interna
16			Superficie interna plana y cilíndrica
17		Superficie final	
18		Orificios no concéntricos	Orificios localizados regularmente
19			Orificios especiales
20		Proceso sin corte	
21	Precisión		

FIGURA 38.17 Estructura de un sistema KK-3 para componentes rotacionales. *Fuente*: Cortesía de Japan Society for the Promotion of Machine Industry.

Este sistema tiene dos desventajas: (a) es posible poseer diferentes códigos para partes con atributos similares de manufactura, y (b) numerosas partes con diferentes formas pueden tener el mismo código.

2. El **sistema multiClass** se desarrolló para ayudar a automatizar y estandarizar diversas funciones de diseño, producción y administración, y comprende hasta 30 dígitos (fig. 38.16). Se utiliza interactivamente con una computadora que hace al usuario muchas preguntas. Con base en las respuestas dadas, la computadora asigna en forma automática un número de código a la parte.
3. El **sistema KK-3** es un sistema de propósito general para partes que se van a maquinar o rectificar. Utiliza un sistema decimal de 21 dígitos. Este código es mucho más largo que los dos sistemas anteriores, pero clasifica dimensiones y relaciones dimensionales, como la longitud a diámetro de la parte. En la figura 38.17 se muestra la estructura de un sistema KK-3 de componentes rotatorios.

RESUMEN

- Para optimizar operaciones, mejorar la calidad de los productos y reducir los costos de producción, se implantan sistemas de manufactura integrada en diversos grados.
- Los procesos de manufactura integrada por computadora se han vuelto los medios más importantes para mejorar la productividad, responder a las demandas del mercado rápidamente cambiantes y mejorar el control de la manufactura y las funciones de administración de una organización.
- Un *software* avanzado y computadoras poderosas permiten la descripción de la geometría de las partes en diversos formatos, incluyendo estructuras de alambres, octree, modelos de superficies, modelos de sólidos, esqueletos y representaciones de límites.
- También se utilizan computadoras para simular las operaciones y los sistemas de manufactura, así como para ayudar en la selección de los procesos de manufactura.
- La tecnología de grupos es un enfoque poderoso que permite la rápida recuperación de diseños y experiencias de manufactura anteriores, codificando una parte con base en sus rasgos geométricos o consideraciones de manufactura. Existen muchos sistemas de codificación de tecnología de grupos.

TÉRMINOS CLAVE

Análisis de flujos de producción
Arreglo de grupos
Atributos de diseño
Atributos de manufactura
Base de datos
Codificación
Diseño e ingeniería asistidos por computadora
Diseño sin documentos
Distribución funcional
Especificaciones de Intercambio de Datos de Productos
Estructura de alambres
Hoja de ruta
Manufactura asistida por computadora
Manufactura integrada por computadora
Modelado
Modelo de sólidos
Modelo de superficies
Planeación de procesos
Planeación de procesos asistidos por computadora
Planeación de recursos de empresas
Planeación de recursos de manufactura
Planeación de requerimientos de materiales
Representación octree
Simulación por computadora
Sistema de adquisición de datos
Sistemas de clasificación y codificación
Tecnología de grupos

BIBLIOGRAFÍA

Amirouche, F. M. L., *Principles of Computer-Aided Design and Manufacturing*, 2a. ed., Prentice Hall, 2003.

Badiru, A. B., *Expert Systems Applications in Engineering and Manufacturing*, Prentice Hall, 1992.

Burbidge, J. L., *Production Flow Analysis for Planning Group Technology*, Oxford, 1997.

Chang, T.-C., Wysk, R. A. y Wang, H. P., *Computer-Aided Manufacturing*, 2a. ed., Prentice Hall, 1997.

Chorafas, D. N., *Expert Systems in Manufacturing*, Van Nostrand Reinhold, 1992.

Corbett, J., Dooner, M., Meleka, J. y Pym, C., *Design for Manufacture: Strategies, Principles and Techniques*, Addison-Wesley, 1991.

Famili, A., Nau, D. S. y Kim, S. H., *Artificial Intelligence Applications in Manufacturing*, American Association for Artificial Intelligence, 1992.

Foston, A. L., Smith, C. L. y Au, T., *Fundamentals of Computer-Integrated Manufacturing*, Prentice Hall, 1991.

Gu, P. y Norrie, D. H., *Intelligent Manufacturing Planning*, Chapman & Hall, 1995.

Higgins, P., Roy, L. R. y Tierney, L., *Manufacturing Planning and Control: Beyond MRP II*, Chapman & Hall, 1996.

Kusiak, A., *Concurrent Engineering: Automation, Tools, and Techniques*, Wiley, 1993.

_____, *Intelligent Design and Manufacturing*, Wiley, 1992.

_____, *Intelligent Manufacturing Systems*, Prentice Hall, 1990.

McMahon, C. y Browne, J., *CADCAM—From Principles to Practice*, Addison-Wesley, 1993.

Vajpayee, S. K., *Principles of Computer-Integrated Manufacturing*, Prentice Hall, 1998.

Williams, D. J., *Manufacturing Systems*, 2a. ed., Chapman & Hall, 1994.

Wu, J.-K., *Neural Networks and Simulation Methods*, Marcel Dekker, 1994.

PREGUNTAS DE REPASO

38.1 ¿De qué manera han tenido impacto las computadoras en la manufactura?

38.2 Comente los beneficios de las operaciones de manufactura integrada por computadora.

38.3 ¿Qué es una base de datos? ¿Por qué es necesaria? ¿Por qué la administración de una compañía debe tener acceso a bases de datos?

38.4 ¿Cuáles son las diferencias entre los términos "asistida por computadora" e "integrada por computadora"?

38.5 Explique cómo opera el sistema CAD.

38.6 ¿Cuáles son las ventajas de los sistemas CAD sobre los métodos tradicionales de diseño? ¿Existe alguna limitación?

38.7 Describa los propósitos de la planeación de procesos. ¿Cómo se utilizan las computadoras en dicha planeación?

38.8 Explique las características de dos tipos de sistemas CAPP.

38.9 Describa las características de una hoja de ruta. ¿Por qué es necesaria?

38.10 ¿Qué es la tecnología de grupos? ¿Por qué se desarrolló? Explique sus ventajas.

38.11 ¿Qué es un NURB?

38.12 Describa qué significa el término sistema de "manufactura".

38.13 ¿Qué significa clasificación y codificación en tecnología de grupos?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

38.14 Describa sus observaciones sobre la figura 38.1.

38.15 Dé ejemplos de primitivos de sólidos distintos a los mostrados en la figura 38.4a y b.

38.16 Describa su interpretación de la representación octree en la figura 38.6.

38.17 Explique la lógica de los arreglos mostrados en la figura 38.13b.

38.18 Describa sus observaciones en relación con la figura 38.2.

38.19 ¿Cuáles son las ventajas de la codificación jerárquica?

38.20 En relación con la figura 38.3, ¿cuáles son las ventajas de una curva de Bezier por piezas de tercer orden sobre una "B-spline" o una curva de Bezier convencional?

38.21 Describa situaciones que requerirían del cambio de diseño en el extremo mayor de la parte en la figura 38.5.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

38.22 Revise diversas partes manufacturadas que se describan en este libro y agrúpelas de manera similar a las mostradas en la figura 38.12.

38.23 Piense en un producto y hags una gráfica de decisiones de árbol similar a la mostrada en la figura 38.14.

38.24 Indique los beneficios de un sistema de manufactura, proporcionando ejemplos específicos.

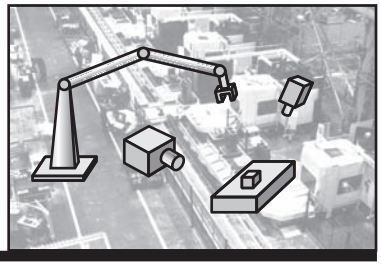
38.25 ¿Cómo describiría el principio de la manufactura asistida por computadora a un viejo trabajador de una instalación manufacturera que no está familiarizado con las computadoras?

38.26 Piense en un producto sencillo y elabore una hoja de ruta similar a la mostrada en la figura 38.10. Si la misma parte se proporciona a otra persona, ¿qué probabilidad existe de que la hoja de ruta desarrollada sea la misma? Explique su respuesta.

38.27 Revise la figura 38.10, después sugiera una hoja de ruta para uno de los siguientes: (a) biela automotriz; (b) aspa de compresor; (c) botella de vidrio; (d) matriz para moldeo por inyección, o (e) engrane cónico.

CAPÍTULO

39 Sistemas de manufactura integrados por computadora



39.1 Introducción 1218
39.2 Manufactura celular 1219
39.3 Sistemas flexibles de manufactura 1221
39.4 Manufactura holónica 1224
39.5 Producción justo a tiempo 1225
39.6 Manufactura esbelta 1227
39.7 Redes de comunicaciones en manufactura 1228
39.8 Inteligencia artificial 1230
39.9 Consideraciones económicas 1233

EJEMPLOS:

39.1 Celdas de manufactura en un taller de máquinas pequeño 1220
39.2 Sistemas flexibles de manufactura en compañías grandes y pequeñas 1223
39.3 Aplicaciones de JIT en la industria automotriz estadounidense 1227

En este capítulo se demuestra cómo los sistemas de computadora y las redes de comunicaciones influyen en el desarrollo y la manufactura de productos mediante la integración de todas sus actividades. En específico, se describen:

- Los principios de las celdas de manufactura atendidas y no atendidas y sus características.
- La manera en que las celdas se integran en sistemas flexibles de manufactura.
- El nuevo concepto de manufactura holónica y sus aplicaciones.
- Los principios de la manufactura justo a tiempo y la manufactura esbelta y sus beneficios.
- Importancia y características de los sistemas de comunicación en la manufactura.
- La manera en que se aplican la inteligencia artificial y los sistemas expertos en la manufactura.

39.1 Introducción

En varias ocasiones hemos descrito la implantación y los beneficios de la automatización y del control por computadora en diversas etapas de las operaciones de manufactura. Este capítulo se concentra en la **integración por computadora** de las **actividades de manufactura**. Integración significa que los procesos, las operaciones de manufactura y la administración se tratan como un sistema.

Una ventaja importante de dicho enfoque es que hoy en día las máquinas, herramentales y operaciones de manufactura adquieren una flexibilidad incorporada, llamada **sistemas flexibles de manufactura.** Como resultado, el sistema es capaz de responder con rapidez a cambios en los tipos de productos y a las demandas cambiantes, así como de asegurar la *entrega a tiempo* de los productos al cliente. El incumplimiento de una entrega a tiempo en un ambiente global altamente competitivo puede alterar los planes de administración y programas de producción y, en consecuencia, tener importantes efectos adversos en las operaciones de una compañía.

En este capítulo se describen los elementos clave que permiten ejecutar las funciones necesarias de un sistema flexible. Se inicia con la *manufactura celular*, que es la unidad básica de flexibilidad en la producción de bienes. Se muestra que las celdas de manufactura pueden ampliarse a *sistemas flexibles de manufactura*, con implicaciones importantes para las capacidades de producción de una operación. Después se describe la *manufactura holónica*, nuevo concepto de la manera en que pueden organizarse las unidades de manufactura a fin de mejorar la eficiencia de la operación.

Se describe el importante concepto de *producción justo a tiempo*, en el que se producen partes "justo a tiempo" para convertirlas en subensambles, ensambles y productos finales. Este método elimina la necesidad de inventarios (que pueden ser una carga financiera para la compañía), de ahí el ahorro significativo de espacio e instalaciones de almacenamiento. Debido a la necesidad y el amplio uso de controles por computadora, equipo y *software* en todas las actividades ya descritas, la planeación e implantación efectiva de *redes de comunicaciones* es un componente crítico de la operación en general.

Este capítulo concluye con una revisión de la *inteligencia artificial*, que consiste en sistemas expertos, procesamiento natural del lenguaje, visión de máquina, redes neuronales artificiales y lógica difusa. Se describe la manera en que estos desarrollos afectan las actividades de manufactura y su futuro.

39.2 Manufactura celular

El concepto de tecnología de grupos (que se describe en la sección 38.8) puede implantarse de manera efectiva en la *manufactura celular*. Una **celda de manufactura** es una pequeña unidad, que consta de una a varias estaciones de trabajo. Por lo general, una estación de trabajo contiene una máquina (conocida como *celda de una sola máquina*) o varias máquinas (llamada *celda de grupo de máquinas*), con cada una realizando una operación diferente sobre la parte. Es posible modificar las máquinas, cambiarles herramientas y reagruparlas para distintas líneas de producción dentro de la misma familia de partes.

La manufactura celular se utiliza sobre todo en las operaciones de maquinado y formado de láminas metálicas. Las máquinas herramienta que suelen usarse en las celdas son tornos, fresadoras, taladros, rectificadoras y máquinas de descarga eléctrica. En el caso del formado de láminas, el equipo consta por lo común de máquinas de cizallado, troquelado, doblado y formado. Este equipo puede incluir asimismo máquinas de propósitos especiales y máquinas CNC. Por lo general, el equipo automatizado de inspección y pruebas también es parte de esta celda.

En general, las capacidades de la manufactura celular comprenden las siguientes operaciones:

- Carga y descarga de materias primas y piezas de trabajo en las estaciones de trabajo.
- Cambio de herramientas en las estaciones de trabajo.
- Transferencia de piezas de trabajo y herramientas entre las estaciones de trabajo.
- Calendarización y control de la operación total en la celda.

En las celdas de maquinado atendidas (*manejadas por el hombre)*, el operador puede mover y transferir materiales manualmente (a menos que las partes sean demasiado pesadas y los movimientos muy peligrosos) o mediante un robot industrial localizado en el centro de la celda.

Celdas de manufactura flexible (FMC, por sus siglas en inglés). Las celdas de manufactura se pueden flexibilizar utilizando centros de maquinado, máquinas CNC y robots industriales, u otros sistemas mecanizados para el manejo de materiales y trabajo en proceso. En la figura 39.1 se muestra un ejemplo de una *celda de manufactura flexible (FMC), atendida* para operaciones de maquinado. Ésta es una celda atendida (dedicada), que consta de máquinas herramienta como tornos, fresadoras, una rectificadora y una estación de inspección y medición (como una máquina de medición por coordenadas). Esta celda puede ser atendida por un solo operador, o por dos si hay más de una máquina herramienta en la celda. Las celdas de manufactura flexible también se pueden diseñar y accionar con un *robot central*. El diseño y la operación de la celda son más exactos, ya que las máquinas, robots, efectores finales y sistemas de control deben funcionar apropiadamente.

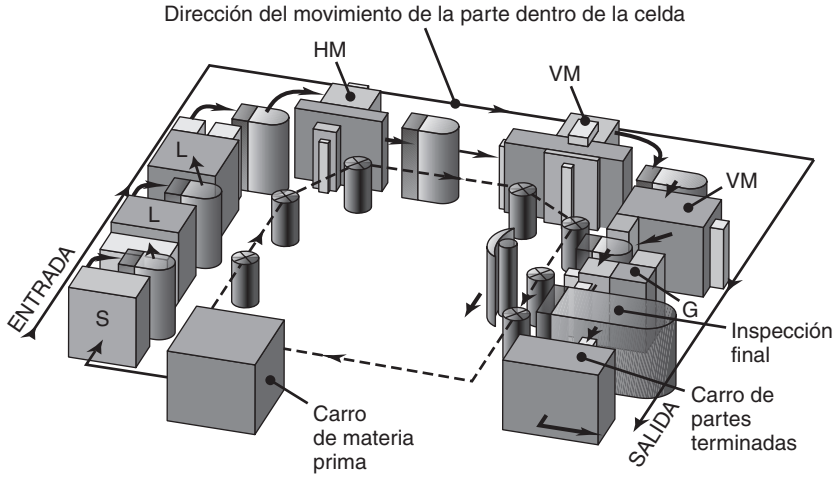


FIGURA 39.1 Esquema de una celda flexible de manufactura atendida que muestra diversas máquinas herramienta y una estación de inspección. S, sierra; L, torno; HM, fresadora horizontal; VM, fresadora vertical; G, rectificadora; x, posiciones de los trabajadores. *Fuente*: J. T. Black.

Diseño de las celdas. Debido a las características únicas de las celdas de manufactura, su diseño y colocación en las plantas tradicionales requieren que se reorganice la planta y se reacomoden las líneas de flujo de producción existentes. Las máquinas pueden disponerse a lo largo de una línea, en forma de U, en forma de L o en un lazo. La selección de la mejor máquina y el arreglo del equipo de manejo de materiales también comprende la consideración de factores como la capacidad de producción, el tipo de producto y su forma, tamaño y peso.

También debe considerarse la probabilidad de que haya un cambio significativo en la demanda de familias de partes durante el diseño de celdas para asegurar que las máquinas y el equipo involucrados tengan la flexibilidad y capacidad apropiadas. El costo de las celdas flexibles puede ser alto, pero esto se supera con el aumento de productividad, flexibilidad y capacidad de control.

EJEMPLO 39.1 Celdas de manufactura en un taller de máquinas pequeño

A continuación se presenta un ejemplo real de la aplicación del concepto de celdas de manufactura en un taller pequeño. La compañía A tiene sólo 10 empleados, 11 fresadoras y 11 centros de maquinado. Estas máquinas se instalan en celdas de fresado y celdas de torneado, y se arreglan para permitir que un operador maquine la parte de la manera más eficiente y precisa. Cada celda permite al operador supervisar el desempeño de las máquinas en la celda.

Con los años, se han producido alrededor de 1200 diferentes lotes de productos con cantidades que van desde una parte hasta 35,000 partes del mismo diseño. Las partes se inspeccionan mientras se producen. Cada empleado en el taller participa en la programación y el funcionamiento de las máquinas y en la inspección del proceso interno de las partes.

39.3 Sistemas flexibles de manufactura

Un *sistema flexible de manufactura* (FMS, por sus siglas en inglés) integra todos los elementos importantes de la manufactura en un sistema altamente automatizado (fig. 39.2). Utilizado por primera vez a finales de la década de 1960, un FMS consta de varias celdas de manufactura, cada una con un robot industrial (que da servicio a diversas máquinas CNC) y un sistema automatizado de manejo de materiales, todo conectado a la computadora central. Desde ésta se pueden descargar diferentes instrucciones para cada una de las partes sucesivas que pasan a través de una estación de trabajo en particular. El sistema puede manejar una *variedad de configuraciones de partes* y producirlas *en cualquier orden*. En la figura 39.3 se muestra la vista general de una instalación FMS en una planta.

Este sistema altamente automatizado tiene la capacidad de optimizar cada paso de la operación total. Estos pasos pueden comprender (*a*) uno o más procesos y operaciones, como maquinado, rectificado, corte, formado, metalurgia de polvos, tratamiento térmico y acabado; (*b*) manejo de materias primas; (*c*) medición e inspección, y (*d*) ensamble. Las aplicaciones más comunes de FMS a la fecha han sido en operaciones de maquinado y ensamble.

El FMS puede considerarse un sistema que combina los beneficios de otros dos sistemas: (1) la alta productividad de las inflexibles líneas de transferencia, y (2) la producción de trabajo en taller (*job shop*), que puede fabricar gran variedad de productos en máquinas autónomas, pero es ineficiente. En la tabla 39.1 se muestran las características relativas de las líneas de transferencia y FMS. Obsérvese que en un FMS el tiempo requerido para el cambio a una parte diferente es muy corto. La rápida respuesta a las variaciones de las demandas del mercado y de los productos es un atributo principal del FMS.

En comparación con los sistemas convencionales de manufactura, los beneficios principales del FMS son los siguientes:

- Las partes se pueden producir de manera aleatoria, en tamaños de lotes tan pequeños como uno y a un costo unitario inferior.

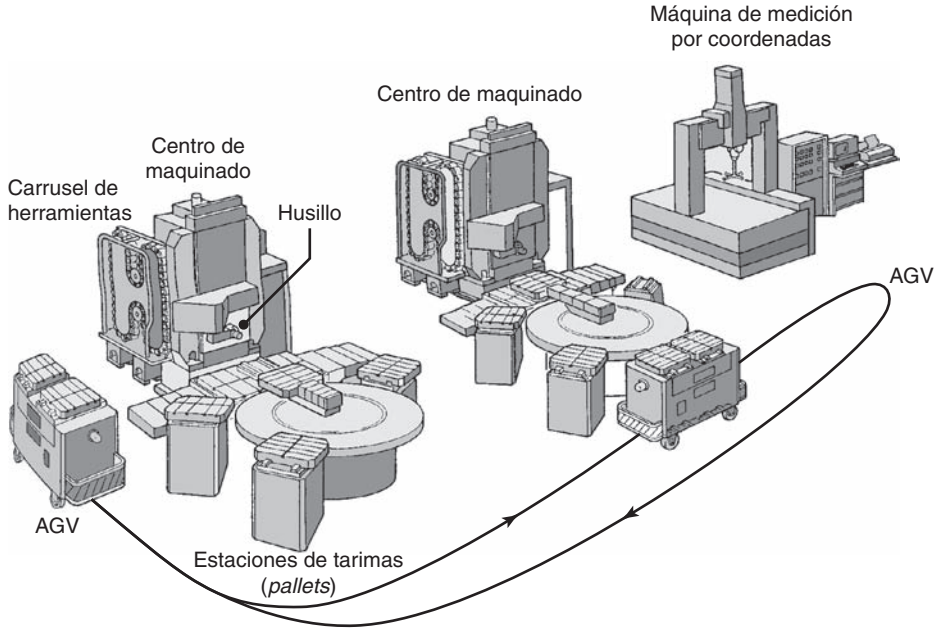


FIGURA 39.2 Esquema de un sistema flexible de manufactura que muestra centros de maquinado, una estación de medición e inspección y vehículos guiados automáticamente. *Fuente*: J. T. Black.

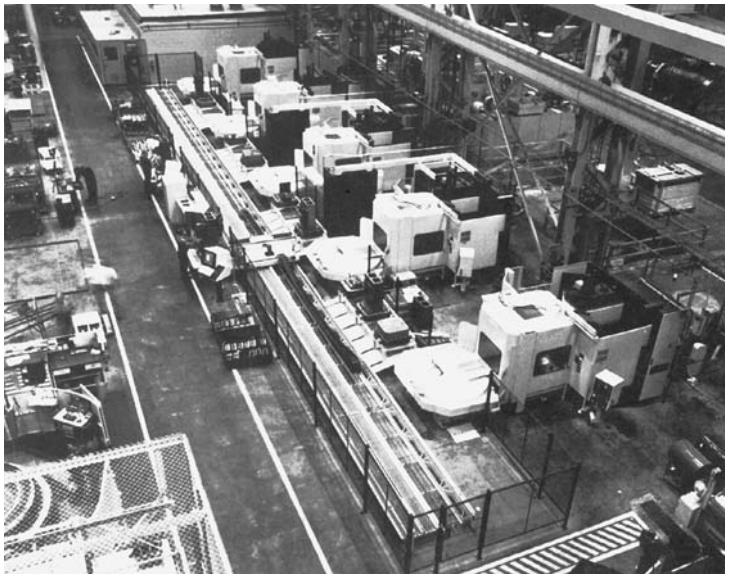


FIGURA 39.3 Vista general de un sistema flexible de manufactura en una planta que muestra diversos centros de maquinado y vehículos guiados automáticamente que se mueven a lo largo de la línea blanca en el pasillo. *Fuente*: Cortesía de Cincinnati Milacron, Inc.

TABLA 39.1

Comparación de características generales de líneas de transferencia y sistemas flexibles de manufactura

Característica	Línea de transferencia	FMS
Variedad de partes	Poca	Infinita
Tamaño de lote	>100	1–50
Tiempo de cambio de parte	Largo	Muy corto
Cambio de herramienta	Manual	Automatico
Control adaptable	Difícil	Disponible
Inventario	Alto	Bajo
Producción durante descompostura	Ninguna	Parcial
Justificación de gasto de capital	Simple	Difícil

- Se reducen o eliminan la mano de obra directa y los inventarios.
- Los tiempos requeridos para cambios de productos son más cortos.
- Debido a que el sistema es de autocorrección, la producción es más confiable y la calidad de los productos, uniforme.

Elementos del FMS. Los elementos básicos de un sistema flexible de manufactura son: (*a*) estaciones de trabajo y celdas; (*b*) manejo y transporte automatizados de materiales y partes, y (*c*) sistemas de control. Las estaciones de trabajo se arreglan para rendir la mayor eficiencia en la producción con un flujo ordenado de materiales y partes en proceso a través del sistema.

Las clases de máquinas en las estaciones de trabajo dependen del tipo de producción. Por ejemplo, en el caso de las operaciones de maquinado, por lo general constan de varios

centros de maquinado de tres a cinco ejes, tornos CNC, fresadoras, taladradoras y rectificadoras. También se consideran equipos diversos, como inspección automatizada (incluyendo máquinas de medición por coordenadas), ensamble y limpieza. Otros tipos apropiados de operaciones para el FMS son el formado de láminas metálicas, troquelado, cizallado y forjado. Pueden incorporar hornos, diversas máquinas, prensas de recorte, instalaciones de tratamiento térmico y equipo de limpieza.

Debido a la flexibilidad del FMS, los sistemas de manejo de materiales son muy importantes. Este sistema se controla mediante una computadora central y se ejecuta por medio de vehículos guiados automáticamente, bandas transportadoras y diversos mecanismos de transferencia. Tiene la capacidad de transportar materias primas, piezas en bruto y partes en diversas etapas de terminación a cualquier máquina (en orden aleatorio) y en cualquier momento. Por lo general, las *partes prismáticas* se mueven en **tarimas** (***pallets***) especialmente diseñadas, en tanto que las partes con *simetría rotacional* (como las de las operaciones de torneado) se mueven con robots y diversos dispositivos mecánicos.

Calendarización. Debido a que el FMS comprende una inversión importante de capital, es fundamental el uso de máquinas eficientes. Las máquinas no deben permanecer inactivas. Por consiguiente, la adecuada calendarización y planeación de procesos son cruciales. La calendarización del FMS es *dinámica*, a diferencia de la de los talleres, en la que se sigue un programa relativamente rígido para efectuar una serie de operaciones. El sistema de calendarización en FMS especifica los tipos de operaciones que se realizarán en cada parte e identifica las máquinas o celdas de manufactura en las que van a ocurrir estas operaciones. La calendarización dinámica tiene la capacidad de responder a cambios rápidos en el tipo de productos, de ahí que responda a decisiones de tiempos reales.

La flexibilidad del FMS permite que no se desperdicie tiempo de preparación al cambiar operaciones de manufactura. Sin embargo, deben supervisarse las características, el desempeño y la confiabilidad de cada unidad del sistema a fin de garantizar que las partes de una estación de trabajo sean de calidad y precisión dimensional aceptables antes de trasladarlas a la siguiente estación de trabajo.

Justificación económica del FMS. Las instalaciones de FMS representan inversiones muy grandes de capital, que cuestan millones de dólares. Por consiguiente, antes de tomar cualquier decisión final debe realizarse un análisis completo de los costos y beneficios. Este análisis debe incluir factores como el costo de capital, energía, materiales y mano de obra; los mercados esperados para los productos a manufacturar y cualquier variante anticipada tanto en la demanda del mercado como en el tipo de producto. Una consideración adicional es el tiempo y esfuerzo requeridos para instalar y depurar el sistema.

Como se puede ver en la figura 37.2, el FMS se aplica con más efectividad en la producción de lotes de medianas cantidades. Cuando se va a producir una variedad de partes, el FMS es adecuado para cantidades que por lo común van de 15,000 a 35,000 partes totales por año. En el caso de partes individuales con la misma configuración, la producción puede alcanzar 100,000 por año. En contraste, la producción de partes de alto volumen y baja variedad se obtiene mejor de las máquinas de transferencia (equipo dedicado). Por último, se puede realizar una mejor producción de partes de bajo volumen y alta variedad en maquinaria estándar convencional (con control numérico o sin él) o mediante centros de maquinado.

EJEMPLO 39.2 Sistemas flexibles de manufactura en compañías grandes y pequeñas

Debido a las ventajas de la tecnología FMS, durante largo tiempo muchos fabricantes consideraron la implantación de un sistema a gran escala en sus instalaciones. Sin embargo, después de una revisión detallada y con base en la experiencia de otras compañías, la mayoría ha optado por algún sistema más pequeño, más simple, modular y menos caro, que sea más efectivo en costo. Estos sistemas incluyen celdas de

manufactura flexible (cuyo costo sería de algunos cientos de miles de dólares), centros de maquinado autónomos y diversas máquinas herramienta CNC que se pueden controlar con mayor facilidad que un FMS.

Existe la percepción general de que cuando el FMS se volvió una alternativa establecida, las expectativas eran altas. En algunos casos, la amplia computarización ha conducido a mucha confusión e ineficiencia en las operaciones de las compañías. En particular, para las más pequeñas, debe considerarse el hecho de que no sólo es necesaria una gran inversión de capital y adquisiciones importantes de equipo y de *software*, sino también que la operación de un FMS grande requiere amplia capacitación del personal.

Por el contrario, existen diversos ejemplos de la implantación exitosa y económicamente viable de un FMS en una gran compañía. Los resultados de un estudio de 20 sistemas operativos de ese tipo en Estados Unidos indican que se han obtenido mejoras respecto de métodos anteriores. Hoy en día, algunos sistemas tienen la capacidad de producir en forma económica lotes con un tamaño de una sola parte. A pesar del alto costo, el sistema se paga por sí mismo en muchas compañías.

39.4 Manufactura holónica

La manufactura holónica es un nuevo concepto que describe una organización única de unidades de manufactura. El término *holónica* proviene del griego *holos* (que significa "conjunto") y del sufijo *on* (que significa "parte de"). De ahí que cada componente en un sistema de manufactura holónica sea al mismo tiempo una entidad independiente (o *un todo*) y una *parte* subordinada de una organización jerárquica. Incluimos la descripción de este sistema por su benéfico impacto potencial en las operaciones de manufactura integradas por computadora.

Desde la década de 1960 se estudian los sistemas organizacionales holónicos y existen muchos ejemplos en sistemas biológicos. Se pueden señalar tres observaciones fundamentales sobre estos sistemas:

1. Los sistemas complejos se desarrollan a partir de sistemas simples mucho más rápidamente si hay formas intermedias estables que si no las hay. También, por su evolución, los sistemas estables y complejos requieren un sistema jerárquico.
2. Los holones son simultáneamente un todo independiente para sus partes subordinadas, y partes dependientes de otros sistemas. Son unidades autónomas que tienen un alto grado de independencia y pueden manejar contingencias sin pedir instrucciones a sus superiores jerárquicos. Al mismo tiempo, los holones se someten al control de múltiples niveles de sistemas superiores.
3. Una holarquía consiste en (*a*) conjuntos autónomos a cargo de sus propias partes; (*b*) partes dependientes controladas por superiores jerárquicos, y (*c*) se coordinan de acuerdo con su ambiente local.

En los sistemas biológicos, las jerarquías tienen las características de estabilidad frente a perturbaciones, uso óptimo de los recursos disponibles y alto nivel de flexibilidad cuando su ambiente cambia.

Un *holón de manufactura* es un bloque de construcción autónomo y cooperativo de un sistema de manufactura para la producción, el almacenamiento y la transferencia de objetos o de información. Consta de una parte de control y una parte opcional de procesamiento físico. Por ejemplo, un holón puede ser la combinación de una fresadora CNC y un operador que interactúa por medio de una interfaz apropiada. Un holón también puede constar de otros holones que proporcionan el procesamiento, la información e in-

terfaces humanas necesarios para el mundo exterior, como un grupo de celdas de manufactura. Las holarquías se pueden crear y disolver en forma dinámica, dependiendo de las necesidades actuales del proceso específico de manufactura.

Una perspectiva de los sistemas holónicos de las operaciones de manufactura consiste en crear un ambiente de trabajo de manufactura desde los niveles básicos. La máxima flexibilidad se puede lograr proporcionando inteligencia dentro de los holones para (*a*) dar soporte a todas las funciones de producción y control requeridas a fin de completar las tareas de producción, y (*b*) manejar el equipo y los sistemas correspondientes. El sistema de manufactura se puede reconfigurar de manera dinámica en jerarquías operativas para producir en forma óptima los productos deseados, con holones o elementos que se adicionan o eliminan según sea necesario.

Los sistemas de manufactura holárquicos se basan en la comunicación rápida y efectiva entre holones, en oposición al control jerárquico tradicional en el que es fundamental la potencia individual de procesamiento. Se ha propuesto una gran cantidad de arreglos específicos y algoritmos de *software* para los sistemas holárquicos. Una descripción detallada de éstos se encuentra más allá del alcance de este libro. Sin embargo, la secuencia general de eventos se puede resumir de la siguiente manera:

1. Una fábrica consta de varios holones de recursos, disponibles como entidades separadas en una agrupación de recursos. Por ejemplo, los holones disponibles pueden constar de (*a*) una fresadora CNC y un operador; (*b*) una rectificadora CNC y un operador, y (*c*) un torno CNC y un operador.
2. Al recibir una orden o instrucción de superiores jerárquicos de la fábrica, se forma un holón de orden y empieza a comunicarse y negociar con los holones de recursos disponibles.
3. Las negociaciones conducen a una agrupación autoorganizada de holones de recursos, que se asignan de acuerdo con los requisitos de los productos, la disponibilidad de los holones de recursos y los requisitos del cliente. Por ejemplo, cierto producto puede requerir un torno CNC, rectificadora CNC y estación automatizada de inspección para organizarlos en un holón de producción.
4. En caso de descompostura, falta de disponibilidad de máquinas o requerimientos de cambio del cliente, se pueden agregar o eliminar holones de la agrupación de holones según se necesite, permitiendo que se reorganice el holón de producción. Los obstáculos para la producción se pueden identificar y eliminar mediante la comunicación y negociación entre los holones en la agrupación de recursos.

El paso 4 se conoce como *conecte y use* (*plug and play*), un término que se pidió prestado de la industria de las computadoras, en la que los componentes de los equipos se integran de manera continua a un sistema.

39.5 Producción justo a tiempo

El concepto de *producción justo a tiempo* (JIT, por sus siglas en inglés) tuvo su origen en Estados Unidos hace algunas décadas, pero se implantó por primera vez a gran escala en 1953, en la Toyota Motor Company de Japón, a fin de eliminar los desperdicios de materiales, máquinas, capital, mano de obra e inventario a lo largo del sistema de manufactura. El concepto JIT tiene los siguientes objetivos:

- Recibir suministros justo a tiempo para su uso.
- Producir partes justo a tiempo para convertirlas en subensambles.
- Producción de subensambles justo a tiempo para que sean ensamblados en productos terminados.
- Producir y entregar productos terminados justo a tiempo para su venta.

En la manufactura tradicional, las partes se fabrican en lotes, se colocan en el inventario y se utilizan cuando se les necesita. Este método se conoce como **sistema de empuje**, lo cual significa que las partes se fabrican de acuerdo con un programa y se colocan en un inventario para su uso cada que se requiera. Por el contrario, la manufactura justo a tiempo es un **sistema de tracción (de jale)**, lo cual significa que las partes se producen por órdenes y la producción coincide con el pedido de ensamble final de productos.

No existen reservas y la cantidad de producción ideal es uno (también se conoce como *inventario cero, producción sin reserva o calendarización sobre pedido*). Además, las partes se inspeccionan conforme se manufacturan y se usan dentro de un breve periodo. Así, un trabajador mantiene control continuo de la producción, identificando de inmediato las partes defectuosas y reduciendo la variación de procesos para producir productos de calidad.

La implantación del concepto de JIT requiere que todos los aspectos de las operaciones de manufactura se supervisen y revisen de tal manera que se eliminen todas las operaciones y los recursos que no tengan valor agregado. Este método hace énfasis en (*a*) el orgullo y la dedicación para fabricar productos de alta calidad; (*b*) la eliminación de recursos ociosos, y (*c*) el trabajo en equipo entre los trabajadores, ingenieros y la administración para resolver con rapidez cualquier problema que surja durante la producción y el ensamble.

La capacidad para detectar problemas de producción al fabricar las partes se ha comparado con el nivel de agua (que representan los niveles de inventarios) en un lago que cubre un fondo de rocas (que representan los problemas de producción). Cuando el nivel de agua es elevado (inventarios altos asociados con la producción de empuje), las piedras no quedan expuestas. Por el contrario, cuando el nivel es bajo (inventarios bajos asociados con la producción de tracción), las rocas quedan expuestas y se pueden identificar y eliminar. Esta analogía indica que los inventarios altos pueden encubrir problemas de calidad y producción de partes que ya se fabricaron y acumularon.

El concepto de JIT requiere la entrega puntual de todos los suministros y partes de las fuentes externas y de otras divisiones de una compañía, por lo que reduce de modo significativo o se elimina el inventario en planta. Se espera que los proveedores entreguen (a menudo sobre una base diaria) productos previamente inspeccionados conforme se necesitan para producción y ensamble. Este enfoque exige proveedores confiables, cooperación cercana, confianza entre la compañía y sus proveedores y un sistema confiable de transporte. Para operar con menos problemas, también es importante reducir la cantidad de proveedores. Por ejemplo, una planta de Apple Computer redujo la cantidad de proveedores de 300 a 70.

Ventajas de JIT. A continuación se resumen las principales ventajas de la producción justo a tiempo:

- Costos bajos de control de inventario.
- Rápida detección de defectos en la producción o entrega de suministros y, por lo tanto, baja pérdida por desperdicios.
- Reducción de la inspección y el reproceso de partes.
- Productos de alta calidad fabricados a bajo costo.

Aunque pueden existir variaciones significativas en el desempeño, la implantación de la producción justo a tiempo ha generado reducciones de 20% a 40% en el costo de los productos, de 60% a 80% en el inventario, hasta 90% en los índices de rechazo, 90% en los tiempos de entrega y 50% en los costos de desperdicios, reproceso y garantías. También se han logrado aumentos de 30% a 50% en la productividad de mano de obra directa y 60% en la productividad de mano de obra indirecta.

Kanban. La implantación del JIT en Japón implicó el *kanban*, que significa "registro visible". Estos registros originalmente consistían en dos tipos de tarjetas (conocidas como kanban, que en la actualidad han sido reemplazadas con etiquetas de plástico que tienen códigos de barras y otros dispositivos):

- La *tarjeta de producción*, que autoriza la producción de un contenedor o carro de partes idénticas, especificadas en una estación de trabajo.

- La *tarjeta de transporte* o *traslado*, que autoriza la transferencia de un contenedor o carro de partes desde una estación de trabajo particular a la estación de trabajo en la que se utilizarán las partes.

Las tarjetas contienen información sobre el tipo de parte, la localización en la que se emitieron, el número de parte y el número de partidas en el contenedor. En todo momento puede controlarse totalmente la cantidad de contenedores en circulación y reprogramarlos como se desee para obtener una eficiencia máxima de la producción.

EJEMPLO 39.3 Aplicaciones del JIT en la industria automotriz estadounidense

En una aplicación de JIT, los asientos para automóviles se fabrican en la planta del proveedor justo dos horas antes de necesitarlos en la planta de ensamble, que está a 120 km (75 millas) de distancia. Los asientos se descargan en la planta de ensamble y se transfieren rápidamente en la secuencia apropiada de estilo y color (marcando cada asiento de antemano para un vehículo específico que recorre la línea de ensamble). Cada asiento llega a la línea de ensamble justo a tiempo para la instalación.

Para que el sistema opere de manera eficiente, los principales fabricantes de automóviles en Estados Unidos prefieren tener proveedores de varios componentes que reubiquen sus plantas más cerca de las líneas de ensamble. Sin embargo, es una acción costosa y de gran inversión de capital por parte de los proveedores. Una alternativa es tener un sistema fiable de transporte terrestre o ferroviario para la entrega confiable y oportuna de los suministros.

39.6 Manufactura esbelta

En un ambiente de manufactura moderno, las compañías deben dar respuesta tanto a las necesidades de los clientes y sus requisitos específicos como a las cambiantes demandas globales del mercado. Al mismo tiempo, la empresa manufacturera tiene que manejarse con una cantidad mínima de desperdicio de recursos para garantizar la competitividad. Esta conciencia ha conducido a estrategias de *producción esbelta* o *manufactura esbelta*.

La manufactura esbelta es una aproximación o acercamiento sistemático para *identificar y eliminar el desperdicio* (es decir, actividades sin valor agregado) en cada área de manufactura, mediante mejoras continuas y haciendo énfasis en el flujo de productos en un sistema de empuje. Cuando se aplica a gran escala, la manufactura esbelta se conoce como *manufactura ágil*. La producción esbelta requiere que un fabricante examine todas sus actividades desde el punto de vista del cliente y optimice procesos para maximizar el valor agregado. Este punto de vista es muy importante, porque identifica si una actividad ayuda o no a los siguientes aspectos:

- Dar valor agregado claramente.
- No agregar valor pero no puede ser evitado.
- No agregar valor pero puede ser evitado.

El enfoque de la producción esbelta se concentra totalmente en el flujo del proceso y no sólo en la mejora de una o más operaciones individuales. Desperdicios comunes a considerar y que incluso se reducen o eliminan en la manufactura esbelta incluyen lo siguiente:

- Uso de los métodos de producción justo a tiempo para eliminar inventario, ya que el inventario representa costo, lleva a defectos y reduce la capacidad de respuesta a las demandas cambiantes del mercado.

- Eliminación del tiempo de espera, que puede estar originado por las cargas desequilibradas de trabajo, mantenimiento sin planeación y problemas de calidad. Por lo tanto, maximiza la eficiencia de los trabajadores en todo momento.
- Eliminación de procesos y pasos innecesarios, debido a que representan costos.
- Minimización o eliminación del transporte de productos, debido a que representa una actividad que no agrega valor. Este desperdicio se puede suprimir (por ejemplo, formando celdas de maquinado) o minimizar (con una mejor disposición de la planta).
- Realización de estudios de tiempos y movimientos para identificar trabajadores ineficientes o movimientos innecesarios de productos.
- Eliminación de defectos de partes.

39.7 Redes de comunicaciones en manufactura

Para mantener un alto nivel de coordinación y eficiencia en la manufactura integrada, es fundamental una *red de comunicaciones* amplia, de alta velocidad e interactiva. La *red de área local* (LAN, por sus siglas en inglés) es un sistema de *hardware* y *software* en el que se comunican entre sí grupos de máquinas y equipo relacionados lógicamente. Una red de área local conecta estos grupos entre sí, integrando diferentes fases de manufactura en una operación unificada.

Una red de área local puede ser muy grande y compleja (es decir, que une cientos o incluso miles de máquinas y dispositivos localizados en diversos edificios). Se utilizan diversos arreglos de redes (fig. 39.4) de fibra óptica o cables de cobre en distancias que van desde algunos metros hasta 32 km (20 millas). En el caso de distancias más grandes, se usan *redes de área extendida* (WAN, por sus siglas en inglés).

Por medio de "compuerta" y "puentes" se pueden unir o integrar diferentes tipos de redes. El control de acceso a la red es importante; de lo contrario, pueden ocurrir colisiones al transmitir diversas estaciones de trabajo de manera simultánea.

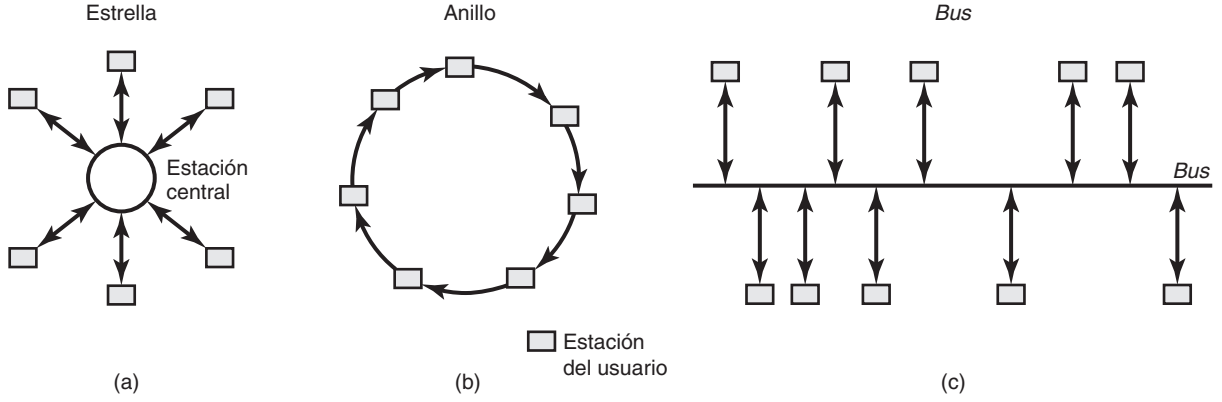


FIGURA 39.4 Tres tipos básicos de topología de una red de área local (LAN). *(a)* La topología de *estrella* es adecuada para situaciones que no están sujetas a cambios frecuentes de configuración. Todos los mensajes pasan a través de una estación central. Por lo general, los sistemas de telefonía en los edificios de oficinas tienen este tipo de topología. *(b)* En la topología de *anillo*, todas las estaciones individuales de los usuarios se conectan en un anillo continuo. El mensaje es enviado de una estación a la siguiente hasta que llega a su destino asignado. Aunque el cableado es relativamente simple, la falla de una estación detiene toda la red. *(c)* En la topología de *bus*, todas las estaciones tienen acceso independiente al circuito por donde circulan los datos (*bus*). Este sistema es confiable y más fácil que los otros dos para servicio. Debido a que su arreglo es similar al de las máquinas en la fábrica, su instalación es relativamente fácil y puede ajustarse al arreglar las máquinas otra vez.

En la década de 1970 se desarrolló e implementó un *acceso múltiple de detección portadora con sistema de detección de colisiones* (CSMA/CD) en *Ethernet*, que se ha convertido en el estándar de la industria. Otros métodos de control de acceso son el *anillo de señales* (*token ring*) y la *barra o circuito de señales* (*token bus*), en donde una señal (mensaje especial) se pasa de dispositivo en dispositivo. Sólo se permite transmitir al dispositivo que tiene la señal, en tanto que todos los demás sólo reciben.

Las LAN convencionales requieren la vía de los cables (con frecuencia a través de paredes de ladrillos u otras estructuras permanentes) y necesitan que las computadoras o maquinaria permanezcan estacionarias. Las *redes inalámbricas de área local* (WLAN, por sus siglas en inglés) permiten que equipo como los bancos móviles de pruebas o dispositivos de recolección de datos (es decir, lectores de códigos de barras) mantengan la conexión de las redes con facilidad. Hoy en día, una norma de comunicaciones (IEEE 802.11) define las frecuencias y especificaciones de señales y dos métodos de radiofrecuencia y uno infrarrojo para las WLAN. Aunque las redes inalámbricas son más lentas que las de conexión por cable, su flexibilidad las hace convenientes, en particular para situaciones en que las tareas lentas (como la supervisión de máquinas) constituyen la aplicación principal.

Se utilizan *redes de área personal* (PAN, por sus siglas en inglés) en dispositivos electrónicos (como teléfonos celulares y asistentes de datos personales, PDA), pero no tienen tanta difusión para aplicaciones de manufactura. Las PAN se basan en normas para comunicaciones (como Bluetooth, IrDA y HomeRF) y su diseño permite comunicaciones de datos y voz a distancias cortas. Por ejemplo, un dispositivo Bluetooth de corto alcance permite la comunicación a una distancia de 10 m (32 pies). Las PAN están sufriendo cambios importantes y las normas para comunicaciones se refinan de manera continua.

Normas para comunicaciones. Es común que una celda de manufactura se construya con máquinas y equipo comprados a un proveedor, otra celda se elabore con máquinas compradas a otro proveedor e incluso una tercera comprada a otro proveedor. El resultado es que varios dispositivos programables se accionan mediante diversas computadoras y microprocesadores comprados en diferentes momentos a distintos proveedores y que tienen diversas capacidades y niveles de sofisticación.

Las computadoras de cada celda tienen sus propias especificaciones y normas de propietario y no se pueden comunicar con otras más allá de la celda, a menos que estén equipadas con interfaces especiales. Esta situación creó *islas de automatización*; en algunos casos, hasta 50% del costo de automatización se relacionaba con la superación de dificultades generadas en las comunicaciones entre celdas individuales de manufactura y otras partes de la organización.

La existencia de celdas automatizadas que podían funcionar de manera independiente (sin una base común para la transferencia de información) condujo a la necesidad de establecer una *norma para comunicaciones* a fin de mejorar la comunicación y eficiencia de la manufactura integrada por computadora. El primer paso hacia la regulación se dio en 1980. Después de un esfuerzo considerable y con base en las normas nacionales e internacionales existentes, se desarrolló una serie de normas para comunicaciones conocida como *protocolo de automatización de manufactura* (MAP, por sus siglas en inglés).

El modelo de referencia de la International Organization for Standardization (ISO)/Open System Interconnect (OSI) se acepta a nivel mundial. El modelo ISO/OSI tiene una estructura jerárquica, en la que la comunicación entre dos usuarios se divide en siete capas (fig. 39.5). Cada capa tiene una tarea especial:

- Medios mecánicos y electrónicos de transmisión de datos.
- Detección y corrección de errores.
- Transmisión correcta del mensaje.
- Control del diálogo entre usuarios.

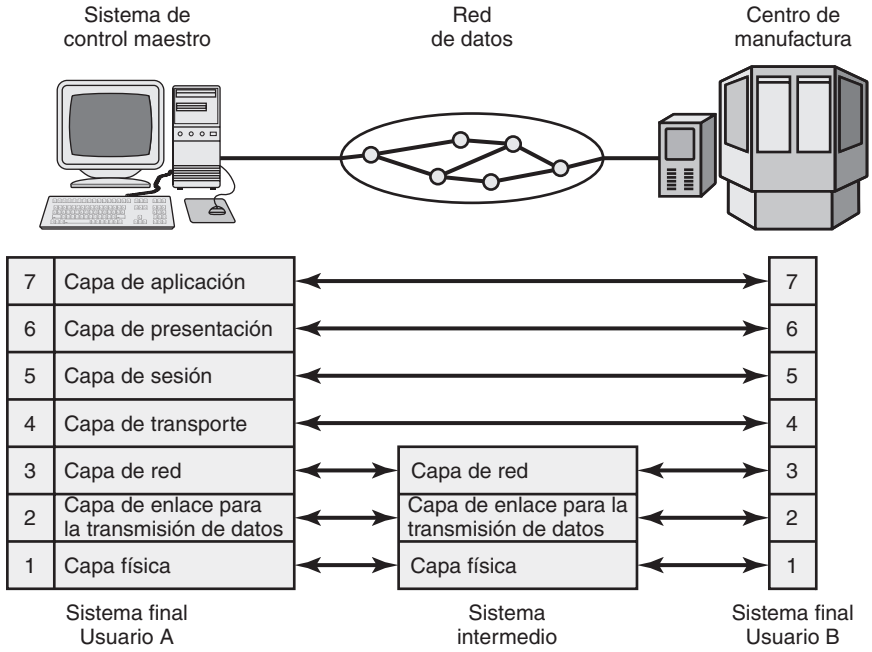


FIGURA 39.5 Modelo de referencia de ISO/OSI para comunicaciones abiertas. *Fuente*: U. Rembold.

- Traducción del mensaje a una sintaxis común.
- Verificación de la comprensión de los datos transferidos.

La operación de este sistema es compleja. Básicamente, cada uno de los fragmentos de tamaño estándar del mensaje o datos del usuario A que se transmitirá al usuario B se mueve de manera secuencial a través de capas sucesivas en el extremo de A, desde la capa 7 hasta la 1. Conforme avanza a través de cada capa, se agrega más información al mensaje original. El *paquete* completo se transmite a través de un medio de comunicación físico al usuario B y después se mueve a través de las capas (de la 1 a la 7) al extremo de B. La transmisión ocurre a través de cable coaxial, cable de fibra óptica, microondas y dispositivos similares.

Los protocolos de comunicaciones también se han ampliado a la automatización de oficinas con el desarrollo del **protocolo técnico y de oficina** (TOP, por sus siglas en inglés), que se basa en el modelo de referencia ISO/OSI. De esta manera, se establece comunicación total (MAP/TOP) entre el piso de la fábrica y las oficinas a todos los niveles de una organización. Una práctica común es el uso de las **herramientas de Internet** (*hardware*, *software* y protocolos) dentro de una compañía para enlazar todos los departamentos y funciones en una **Intranet** totalmente compatible e independiente. Existen diversas herramientas comerciales para lograr este enlace; no son costosas y son fáciles de instalar, integrar y utilizar.

39.8 Inteligencia artificial

La *inteligencia artificial* (AI, por sus siglas en inglés) es la parte de la informática relacionada con sistemas que presentan algunas características asociadas por lo general con la inteligencia humana (como aprendizaje, razonamiento, resolución de problemas y comprensión de lenguaje). El objetivo de la AI es *simular* dichos comportamientos humanos en la computadora. El arte de aportar principios y herramientas relevantes

de AI para afrontar problemas de aplicación difícil se conoce como **ingeniería del conocimiento.**

La inteligencia artificial tiene un efecto importante en el diseño, la automatización y la economía general de las operaciones de manufactura, en gran parte debido a los avances en la expansión de la memoria para computadoras (diseño de chips VLSI) y la disminución de costos. Se han desarrollado paquetes de inteligencia artificial que cuestan algunos miles de dólares, muchos de los cuales pueden ejecutarse en computadoras personales. De ahí que la AI se haya vuelto accesible para las oficinas y los talleres.

Sistemas expertos. En general, un *sistema experto* (ES, también conocido como **sistema basado en el conocimiento**) se define como un programa inteligente para computadora que tiene la capacidad de resolver problemas difíciles de la vida real mediante procedimientos **basados en el conocimiento** y la **inferencia** (fig. 39.6). El objetivo de un sistema experto consiste en efectuar una tarea intelectualmente demandante como lo haría un experto humano.

Al campo de conocimiento requerido para realizar esta tarea se le conoce como **dominio** del sistema experto. Estos sistemas utilizan una base de conocimiento que contiene hechos, datos, definiciones y suposiciones. También tienen la capacidad de intentar una aproximación **heurística** (es decir, tomando buenas decisiones sobre la base del descubrimiento y la revelación, y haciendo suposiciones de alta probabilidad, como lo haría un experto humano).

La base del conocimiento se expresa en códigos de computadora (por lo general, en la forma de **reglas si-entonces; *if–then***) y puede generar una serie de preguntas. El mecanismo para usar estas reglas a fin de resolver problemas se conoce como **motor de inferencia.** Los sistemas expertos también pueden comunicarse con otros paquetes de *software* para computadora.

La construcción de sistemas expertos para resolver problemas complejos de diseño y manufactura encontrados requiere (*a*) una gran cantidad de conocimientos, y (*b*) un mecanismo para manipular este conocimiento a fin de crear soluciones. Debido a la dificultad de modelar con precisión los muchos años de experiencia de un experto (o un

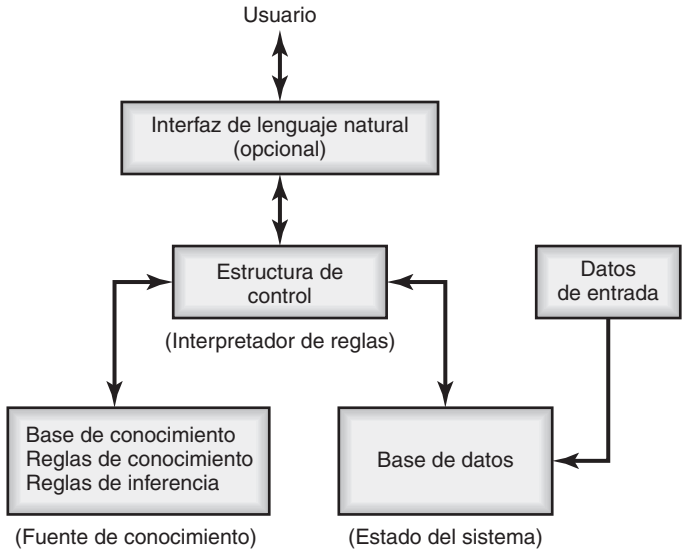


FIGURA 39.6 Estructura básica de un sistema experto. La base del conocimiento consta de reglas de conocimiento (información general sobre el problema) y reglas de inferencia (la manera en que se llega a conclusiones). Los resultados se pueden informar al usuario a través de la interfaz de lenguaje natural.

equipo de expertos), las complejas capacidades del razonamiento inductivo y la toma de decisiones de los humanos (incluyendo la capacidad de aprender de los errores), el desarrollo de sistemas basados en el conocimiento requiere tiempo y esfuerzo considerables.

Los sistemas expertos operan sobre la base de tiempo real, y sus tiempos de reacción cortos proveen una rápida respuesta a los problemas. Los lenguajes de programación más empleados para estas aplicaciones son el C++, LISP y el PROLOG (también pueden usarse otros lenguajes). Un importante desarrollo en este campo son los programas de **núcleos** o **ambientes** (también llamados **sistemas de estructuras**), los cuales son esencialmente esquemas de sistemas expertos que permiten a una persona escribir aplicaciones específicas para cubrir necesidades especiales. Escribir estos programas requiere experiencia considerable y tiempo.

Desde principios de la década de 1970, se han desarrollado y utilizado diversos sistemas expertos que utilizan computadoras con distintas capacidades para aplicaciones especializadas, como las siguientes:

- Diagnóstico de problemas en diversos tipos de máquinas y equipos y determinación de acciones correctivas.
- Modelación y simulación de instalaciones de producción.
- Diseño asistido por computadora, planeación de procesos y calendarización de la producción.
- Administración de la estrategia de manufactura de una compañía.

Procesamiento de lenguaje natural. Tradicionalmente, obtener información de una base de datos ubicada en la memoria de la computadora requiere el uso de programadores para traducir las preguntas en lenguaje natural a "consultas" en algún lenguaje de la máquina. Las interfaces de lenguaje natural con los sistemas de bases de datos se encuentran en diversas etapas de desarrollo. Estos sistemas permiten al usuario obtener información introduciendo comandos en inglés o en otro lenguaje en forma de preguntas simples, capturadas mediante un teclado.

Existen intérpretes de comandos de *software* que se utilizan en aplicaciones como la calendarización del flujo de materiales en la manufactura y el análisis de información en las bases de datos. Hay un avance continuo en el *software* para computadoras que tiene capacidades de síntesis y reconocimiento de lenguaje (**reconocimiento de voz**), a fin de eliminar la necesidad de capturar comandos en los teclados.

Visión de máquina. En la sección 37.7 se describieron las características básicas de la visión de máquina. Se combinan computadoras y *software*, implantando inteligencia artificial, con cámaras y otros sensores ópticos. Después, estas máquinas efectúan operaciones como inspección, identificación, clasificación de partes y guía de robots (*robots inteligentes*), operaciones que de lo contrario requerirían intervención humana.

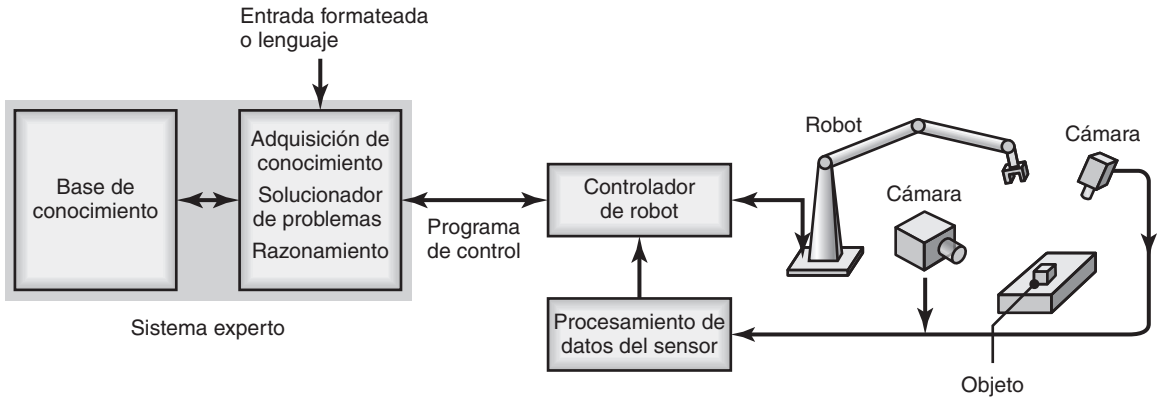


FIGURA 39.7 Sistema experto aplicado a un robot industrial guiado mediante visión de máquina.

Redes neuronales artificiales. Aunque las computadoras son mucho más rápidas que el cerebro humano en tareas secuenciales, los humanos son mucho mejores en tareas basadas en patrones que pueden realizarse con procesamiento paralelo, como reorganizar rasgos (en caras y voces, incluso en condiciones ruidosas), evaluar situaciones con rapidez y ajustarse a condiciones nuevas y dinámicas. En parte, estas ventajas se deben a la capacidad humana para utilizar diversos sentidos (vista, oído, olfato, gusto y tacto) de manera simultánea (*fusión de datos*) y en tiempo real. La rama de la AI conocida como *redes neuronales artificiales* (ANN, por sus siglas en inglés) intenta ganar algunas de estas capacidades mediante la imitación por computadora de la forma en que el cerebro humano procesa los datos.

El cerebro humano tiene alrededor de 100 mil millones de **neuronas** vinculadas (celdas que constituyen las unidades funcionales fundamentales del tejido nervioso) y más de mil veces ese número de conexiones. Cada neurona realiza una sola tarea simple: recibe señales de entrada de una serie fija de neuronas y cuando dichas señales se relacionan de cierta manera (específica para esa neurona en particular), genera una señal de salida electroquímica que va a una serie fija de neuronas. En la actualidad se cree que el aprendizaje humano se logra mediante cambios en las resistencias de estas conexiones de señales entre neuronas.

Se utilizan redes neuronales artificiales en aplicaciones como reducción del ruido (en teléfonos), reconocimiento de lenguajes y control de procesos. Por ejemplo, pueden usarse para predecir el acabado superficial de una pieza de trabajo obtenida por fresado frontal con base en parámetros de entrada como fuerza de corte, torque, emisión acústica y aceleración del husillo. Aunque sigue siendo controvertida, la opinión de muchos es que la inteligencia artificial real evoluciona sólo a través de avances en ANN.

Lógica difusa. Un elemento de la AI que tiene aplicaciones importantes en los sistemas de control y el reconocimiento de modelos es la *lógica difusa* (también llamada *modelos difusos*). Introducida en 1965 y basada en la observación de que la gente puede tomar buenas decisiones de acuerdo con información imprecisa y no numérica, los modelos difusos son medios matemáticos de representación de vaguedad e información imprecisa (de ahí el término "difusa").

Estos modelos tienen la capacidad de reconocer, representar, manipular, interpretar y utilizar datos e información que son vagos o carecen de precisión. Estos métodos tratan con el razonamiento y la toma de decisiones en un nivel superior al de las redes neuronales. Algunos ejemplos lingüísticos típicos son los siguientes: poco, mucho, más o menos, pequeño, mediano, extremadamente y casi todo.

Se han desarrollado tecnologías y dispositivos difusos (y se han aplicado con éxito) en áreas como la robótica y el control de movimiento, el procesamiento de imágenes y la visión de máquina, el aprendizaje de máquina y el diseño de sistemas inteligentes. Algunas aplicaciones se dan en (*a*) la transmisión automática de los automóviles; (*b*) una lavadora que ajusta automáticamente el ciclo de lavado para el tamaño de la carga, tipo de tela y cantidad de mugre, y (*c*) un helicóptero que obedece comandos vocales para avanzar, subir, ir a la izquierda, a la derecha, girar y aterrizar.

39.9 Consideraciones económicas

Las consideraciones económicas en la implantación de las diversas actividades integradas por computadora que se describen en este capítulo son cruciales en vista de las complejidades y los altos costos comprendidos. Las instalaciones de sistemas flexibles de manufactura representan una gran inversión de capital. Por consiguiente, debe realizarse un análisis completo de costos y beneficios antes de tomar una decisión final. Este análisis debe incluir factores como:

- Costo de capital, energía, materiales y mano de obra.
- Mercados esperados de los productos que se van a producir.

- Fluctuaciones anticipadas en la demanda del mercado y el tipo de productos.
- Tiempo y esfuerzo requeridos para instalar y depurar el sistema.

Un sistema FMS puede tardar de dos a cinco años en instalarse y por lo menos seis meses para ser depurado. Aunque el FMS requiere pocos operadores de máquinas (en su caso), el personal a cargo de la operación total debe capacitarse y tener gran experiencia. Este personal incluye ingenieros de manufactura, programadores de computadoras e ingenieros de mantenimiento. Las aplicaciones más efectivas de FMS han ocurrido en producciones en lotes de volúmenes medios. Cuando se va a producir una variedad de partes, el FMS es adecuado para volúmenes de producción de 15,000 a 35,000 partes totales al año. En el caso de las partes individuales de la misma configuración, la producción puede alcanzar 100,000 unidades al año. Por el contrario, se obtiene mejor producción de partes de alto volumen y baja variedad de las máquinas de transferencia (equipo dedicado). Las partes de bajo volumen y alta variedad se pueden fabricar mejor en maquinaria estándar convencional (con o sin NC) o mediante centros de maquinado.

RESUMEN

- Para optimizar operaciones, mejorar la calidad de los productos y reducir los costos, se implantan sistemas de manufactura integrados a diversos grados.
- Los sistemas de manufactura integrados por computadora se han convertido en los medios más importantes para mejorar la productividad, responder a las demandas cambiantes del mercado y controlar mejor las funciones de manufactura y administración. Hoy en día, con el amplio uso de las computadoras y los rápidos desarrollos en *software* sofisticado, los diseños de productos, su análisis y su simulación son muy detallados y completos.
- La inteligencia artificial sigue creando nuevas oportunidades en todos los aspectos de la ciencia, la ingeniería y la tecnología de la manufactura.
- Las consideraciones económicas en el diseño y la implantación de sistemas de manufactura integrados por computadora, en especial los sistemas flexibles de manufactura, son cruciales debido a los importantes gastos de capital requeridos.

TÉRMINOS CLAVE

Ambientes
Celda de manufactura
Desperdicios
Ethernet
Herramientas de Internet
Ingeniería del conocimiento
Inteligencia artificial
Inventario cero
Kanban
Lógica difusa
Manufactura celular
Manufactura esbelta
Manufactura holónica
Motor de inferencia
Norma para comunicaciones
Procesamiento de lenguaje natural
Producción justo a tiempo
Protocolo técnico y de oficina
Red de área local
Red de comunicaciones
Redes inalámbricas de área local
Redes neuronales artificiales
Reglas si-entonces (if–then)
Sistema basado en el conocimiento
Sistema de empuje
Sistema de tracción (jale)
Sistemas de estructuras
Sistemas de manufactura integrados por computadora
Sistemas expertos
Sistemas flexibles de manufactura
Tarima (*Pallet*)
Visión de máquina

BIBLIOGRAFÍA

Allen, J.; Robinson, C. y Stewart, D., *Lean Manufacturing: A Plant Floor Guide*, Society of Manufacturing Engineers, 2001.

Askin, R. G. y Standridge, C. R. *Modeling and Analysis of Manufacturing Systems*, Wiley, 1993.

Badiru, A. B., *Expert Systems Applications in Engineering and Manufacturing*, Prentice Hall, 1992.

Baudin, M., *Lean Assembly*, Productivity Press, 2002.

Bedworth, D. D.; Henderson, M. R. y Wolf, P. M., *Computer-Integrated Design and Manufacturing*, McGraw-Hill, 1991.

Biekert, R., *CIM Technology—Fundamentals and Applications*, Goodheart-Willcox, 1998.

Black, J. T., *The Design of the Factory with a Future*, McGraw-Hill, 1981.

_____, y Hunter, S. L., *Lean Manufacturing Systems and Cell Design*, Society of Manufacturing Engineers, 2003.

Bodek, N., *Kaikaku: The Power and Magic of Lean*, PRC Press, 2004.

Burbidge, J. L., *Production Flow Analysis for Planning Group Technology*, Oxford, 1997.

Chang, T.-C.; Wysk, R. A. y Wang, H. P., *Computer-Aided Manufacturing*, 2a. ed., Prentice Hall, 1997.

Cheng, T. C. E. y Podolsky, S., *Just-in-Time Manufacturing: An Introduction*, 2a. ed., Chapman & Hall, 1996.

Chorafas, D. N., *Expert Systems in Manufacturing*, Van Nostrand Reinhold, 1992.

Connor, G., *Lean Manufacturing for the Small Shop*, Society of Manufacturing Engineers, 2001.

Famili, A.; Nau, D. S. y Kim, S. H., *Artificial Intelligence Applications in Manufacturing*, American Association for Artificial Intelligence, 1992.

Foston, A. L.; Smith, C. L. y Au, T., *Fundamentals of Computer—Integrated Manufacturing*, Prentice Hall, 1991.

Goldratt, E. M., *Theory of Constraints*, North River Press, 1990.

Hales, H. L.; Anderson, B. y Fillmore, W., *Planning Manufacturing Cell Textbook*, Society of Manufacturing Engineers, 2002.

Hannam, R., *CIM: From Concept to Realisation*, Addison-Wesley, 1998.

Harmon, R. L., *Reinventing the Factory II: Managing the World Class Factory*, Free Press, 1992.

Hitomi, K., *Manufacturing Systems Engineering*, 2a. ed., Taylor & Francis, 1996.

Irani, S. A. (ed.), *Handbook of Cellular Manufacturing Systems*, Wiley, 1999.

Jordan, J. y Michel, F., *Lean Company: Making the Right Choices*, Society of Manufacturing Engineers, 2001.

Kasabov, N. K., *Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering*, The MIT Press, 1996.

Krishnamoorty, C. S. y Rajeev, S., *Artificial Intelligence and Expert Systems for Engineers*, CRC Press, 1996.

Kusiak, A., *Concurrent Engineering: Automation, Tools, and Techniques*, Wiley, 1993.

_____, *Intelligent Design and Manufacturing*, Wiley, 1992.

_____, *Intelligent Manufacturing Systems*, Prentice Hall, 1990.

Leondes, C. T. (ed.), *Fuzzy Logic and Expert Systems Applications*, Academic Press, 1998.

Liebowitz, J. (ed.), *The Handbook of Applied Expert Systems*, CRC Press, 1997.

Louis, R. S., *Integrating Kanban with MRP II: Automating a Pull System for Enhanced JIT Inventory Management*, Productivity Press, 1997.

Luggen, W. W., *Flexible Manufacturing Cells and Systems*, Prentice Hall, 1991.

Majima, I., *The Shift to J1T: How People Make the Difference*, Productivity Press, 1992.

Maus, R. y Keyes, J. (eds.), *Handbook of Expert Systems in Manufacturing*, McGraw-Hill, 1991.

Mitchell, F. H., Jr., *CIM Systems: An Introduction to Computer-Integrated Manufacturing*, Prentice Hall, 1991.

Monden, Y., *Toyota Production System: An Integrated Approach to Just-in-Time*, 3a. ed., Institute of Industrial Engineers, 1998.

Popovic, D. y Bhatkar, V., *Methods and Tools for Applied Artificial Intelligence,* Marcel Dekker, 1994.

Rehg, J. A., *Computer-Integrated Manufacturing*, Prentice Hall, 1994.

_____, *Introduction to Robotics in CIM Systems*, 3a. ed., Prentice Hall, 1997.

Rembold, U.; Nnaji, B. O. y Storr, A., *Computer-Integrated Manufacturing and Engineering*, Addison-Wesley, 1993.

Sandras, W. W., *Just-in-Time: Making It Happen*, Wiley, 1997.

Shingo, S., *A Study of the Toyota Production System*, Productivity Press, 1989.

Singh, N., *Systems Approach to Computer-Integrated Design and Manufacturing*, Wiley, 1995.

Singh, N. y Rajamani, D., *Cellular Manufacturing Systems: Design, Planning and Control*, Chapman & Hall, 1996.

Standard, C. y Davis, S., *Running Today's Factory*, Society of Manufacturing Engineers and Hanser-Gardner, 1999.

Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4a. ed., Vol. 5: *Manufacturing Management*, Society of Manufacturing Engineers, 1988.

_____ Vol. 7. *Continuous Improvement*. Society of Manufacturing Engineers, 1993.

Vajpayee, S. K., *Principles of Computer-Integrated Manufacturing*, Prentice Hall, 1998.

Williams, D. J., *Manufacturing Systems*, 2a. ed., Chapman & Hall, 1994.

Wu, J.-K., *Neural Networks and Simulation Methods*, Marcel Dekker, 1994.

PREGUNTAS DE REPASO

39.1 ¿De qué manera han tenido impacto las computadoras en la manufactura?

39.2 ¿Qué ventajas existen en ver la manufactura como un sistema? ¿Cuáles son los componentes de un sistema de manufactura?

39.3 Comente los beneficios de las operaciones de manufactura integrada por computadora.

39.4 ¿Qué es una celda de manufactura? ¿Por qué se desarrolló?

39.5 Describa el principio de los sistemas flexibles de manufactura. ¿Por qué requieren importante inversión de capital?

39.6 ¿Por qué un sistema flexible de manufactura tiene la capacidad de producir una amplia variedad de tamaños de lotes?

39.7 ¿Cuáles son los beneficios de la producción justo a tiempo? ¿Por qué se llama sistema de tracción (jale)?

39.8 Explique la función de una red de área local.

39.9 ¿Cuáles son las ventajas de una norma para comunicaciones?

39.10 ¿Cuáles son las diferencias entre las redes de anillo y de estrella?

39.11 ¿Qué significa el término "manufactura holónica"?

39.12 ¿Qué es un FMC y que es un FMS? ¿Cuáles son las diferencias?

39.13 ¿Qué es Kanban?

39.14 ¿Qué es la manufactura esbelta? ¿Por qué se requiere manufactura justo a tiempo en la manufactura esbelta?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

39.15 ¿Serían adecuados los centros de maquinado para producción justo a tiempo? Explique su respuesta.

39.16 Proporcione un ejemplo de un sistema de empuje y un sistema de tracción. Indique la diferencia básica entre los dos métodos.

39.17 ¿Existe un mínimo para la cantidad de máquinas en una celda de manufactura? Explique su respuesta.

39.18 ¿Los robots son siempre un componente de un FMC? Explique su respuesta.

39.19 Describa los elementos de la inteligencia artificial. ¿La visión de máquina es parte de ella? Explique su respuesta.

39.20 ¿Existe alguna desventaja en el inventario cero? Explique su respuesta.

39.21 Proporcione ejemplos de procesos y operaciones de manufactura en los que la inteligencia artificial puede ser efectiva.

39.22 Opine sobre las capacidades de reconocimiento de voz de futuras máquinas y controles.

39.23 Evalúe un proceso desde una perspectiva de producción esbelta. Por ejemplo, observe de cerca los siguientes ejemplos e identifique, elimine (cuando sea posible) u optimice los pasos que producen desperdicios al: (a) preparar el desayuno para un grupo de ocho; (b) lavar ropa o automóviles; (c) utilizar software de consulta de Internet, y (d) estudiar para un examen, escribir un informe o escribir un documento de condiciones.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

39.24 Piense en una línea de producción para un artículo doméstico que se utiliza comúnmente, y diseñe una celda de manufactura para fabricarlo. Describa las características de las máquinas y el equipo participante.

39.25 ¿Qué tipos de (a) productos, y (b) máquinas de producción serían apropiados para FMC? ¿Qué características de diseño o manufactura los hacen inapropiados? Explique con ejemplos.

39.26 Existen encuestas que indican que 95% de todas las diferentes partes fabricadas en Estados Unidos se producen en lotes de 50 o menos. Comente esta observación y opine sobre la implantación de las tecnologías descritas en los capítulos 37 al 39.

39.27 ¿Una fábrica puede ser siempre no dedicada? Explique su respuesta.

39.28 Suponga que es dueño de una compañía manufacturera y que sabe que no ha aprovechado totalmente las ventajas tecnológicas de la manufactura. Sin embargo, ahora le gustaría hacerlo y tiene el capital necesario. Diga qué haría para analizar las necesidades de su compañía y

cómo planearía la implantación de estas tecnologías. Tome en cuenta los aspectos técnicos y los humanos.

39.29 ¿Cómo describiría los beneficios del FMS a un viejo trabajador en una instalación de manufactura cuya única experiencia ha sido la operación de máquinas herramienta simples?

39.30 Las redes neuronales artificiales son particularmente útiles donde los problemas están mal definidos y los datos son vagos. Dé ejemplos de manufactura en donde las ANN serían útiles.

39.31 Considere la hoja de ruta de un producto, como se indicó en la sección 38.6. Si un sistema de manufactura holónica va a generar automáticamente la secuencia de manufactura:

a. ¿Cuál es la probabilidad de que sea el mismo que se produce manualmente?

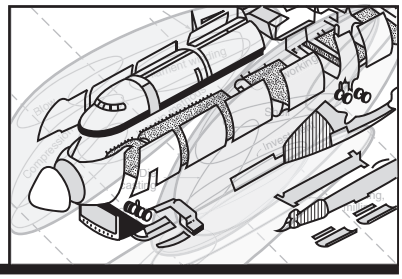
b. ¿Cuál es la probabilidad de que un sistema holónico produzca la misma secuencia cada vez? Explique su respuesta.

39.32 Algunos han sugerido que finalmente los sistemas de inteligencia artificial serán capaces de reemplazar al cerebro humano. ¿Está de acuerdo? Explique su respuesta.

CAPÍTULO

40

Diseño de productos y selección de procesos en un ambiente competitivo



40.1 Introducción 1238
40.2 Diseño del producto 1239
40.3 Calidad del producto y expectativa de vida 1242
40.4 Evaluación e ingeniería del ciclo de vida: manufactura sustentable 1244
40.5 Selección de materiales para productos 1246
40.6 Sustitución de materiales 1250
40.7 Capacidades de procesos de manufactura 1253
40.8 Selección de procesos 1257
40.9 Costos de manufactura y reducción de costos 1261

EJEMPLOS:

40.1 Una aplicación del diseño para manufactura y ensamble 1242
40.2 Manufactura sustentable en la producción de calzado deportivo Nike 1245
40.3 Efecto de la dureza de la pieza de trabajo en el taladrado 1250
40.4 Cambios de materiales entre los aviones militares de carga de carga C-5A y C-5B 1252
40.5 Selección de procesos para una parte sencilla 1259
40.6 Manufactura de una parte de lámina metálica mediante métodos diferentes 1260

ESTUDIO DE CASO:

40.1 Ingeniería concurrente para contenedores de solución intravenosa 1267

Manufacturar productos de alta calidad al menor costo posible requiere entender las relaciones frecuentemente complejas entre muchos factores. En este capítulo se describen los factores interrelacionados en el diseño, desarrollo y manufactura de los productos, incluyendo:

- La consideración del ciclo completo de vida de los productos y los efectos en su diseño.
- La importancia de la selección de materiales y procesos en el diseño.
- La importancia económica de las operaciones de manufactura, con una descripción de los factores más importantes en los costos asociados con un producto.
- Cómo puede ayudar el análisis del valor a optimizar la manufactura y minimizar el costo del producto.

40.1 Introducción

En vista de la gran variedad de materiales y procesos de manufactura disponibles hoy en día, producir un producto de alta calidad mediante la selección de los mejores materiales y procesos, al tiempo que se minimizan los costos de producción, es un reto importante y una oportunidad. Con frecuencia, el costo de un producto determina su posibilidad de venta y la aceptación del cliente en el mercado global. Enfrentar este reto no sólo requiere un conocimiento profundo de las características de los materiales y procesos, sino también métodos innovadores y creativos para las tecnologías de diseño, manufactura y ensamble de los productos.

Este capítulo comienza con algunas consideraciones importantes sobre el **diseño del producto**, que comprende numerosos factores relacionados no sólo con el propio diseño, sino también con la facilidad de manufactura de ese producto y el tiempo requerido para fabricarlo. Existen muchas oportunidades para simplificar diseños, reducir el número de componentes en el producto y disminuir el tamaño y las dimensiones de los componentes, particularmente con el fin de ahorrar materiales costosos.

Se analizan la **calidad del producto** y su **expectativa de vida**, describiendo los parámetros fundamentales involucrados e incluyendo el concepto de rendimiento de la calidad. La **evaluación del ciclo de vida** y la **ingeniería del ciclo de vida** de los productos, servicios y sistemas son cada vez más importantes, sobre todo en relación con su impacto potencialmente adverso sobre el medio ambiente. El énfasis puesto en la *manufactura sustentable* busca reducir o eliminar cualquier efecto adverso de la manufactura tanto en el medio como en la sociedad en general, al mismo tiempo que permite a una empresa ser rentable.

Tradicionalmente, la *selección de materiales* para los productos requería mucha experiencia; sin embargo, ahora existen varias bases de datos y sistemas expertos disponibles que facilitan el proceso de selección para satisfacer requerimientos específicos. De igual manera, al revisar los materiales utilizados en los productos existentes (desde simples herramientas manuales hasta automóviles y aeronaves), se encuentran numerosas oportunidades para la *sustitución de materiales* con el fin de obtener un mejor desempeño y, en particular, de ahorrar costos.

En la fase de producción es imperativo *evaluar* de manera apropiada las *capacidades de los procesos de manufactura,* como una guía fundamental para la selección final de un proceso o serie de procesos apropiados. Como se indica a lo largo de este libro, y dependiendo del diseño del producto y de los materiales especificados, existe más de un método para manufacturar un producto, sus componentes y sus subensambles. Una selección inadecuada puede tener un efecto importante no sólo en la calidad del producto, sino también en su costo.

Aunque al final de cada capítulo se describe la economía de los procesos individuales de manufactura, en este capítulo se asume una visión más amplia y se resumen sus importantes costos globales. Investigaremos los métodos de reducción de costos, incluyendo el **análisis del valor**, una poderosa herramienta que se puede utilizar para evaluar el costo de cada paso de manufactura, en relación con su contribución al valor del producto.

Hoy, el término **clase mundial** se utiliza con frecuencia tanto para describir cierta calidad y nivel de actividades de manufactura como para indicar que los productos tienen **que cumplir normas internacionales y ser aceptados en todo el mundo. Hay que reconocer** que ser de clase mundial (como la calidad) no es un objetivo fijo que deba alcanzar una compañía manufacturera, sino un objetivo móvil, que se eleva a niveles cada vez mayores al pasar el tiempo.

40.2 Diseño del producto

A lo largo de los capítulos hemos resaltado los aspectos más importantes del *diseño para la manufactura y el ensamble* (DFMA, por sus siglas en inglés), así como el correspondiente a la manufactura competitiva. En las referencias indicadas en la tabla 40.1 se dan diferentes guías para materiales y manufactura.

Continuamente se realizan importantes avances en diseños para la manufactura y el ensamble, que ahora tienen disponibles paquetes de *software*. Aunque su uso exige considerable capacitación y conocimiento, estos avances ayudan a los diseñadores a desarrollar productos que requieren menos componentes, reducen el tiempo de ensamble y de manufactura, y en consecuencia, el costo total de la producción.

Consideraciones de diseño del producto. Además de los lineamientos de diseño que hemos proporcionado para procesos individuales de manufactura, existen consideraciones generales de diseño (ver también *Diseño robusto*, sección 36.5.1). Con frecuencia los diseñadores deben preguntarse si han abordado consideraciones como:

- ¿Se han investigado plenamente todos los diseños alternativos del producto?
- ¿Se puede simplificar el diseño y minimizar el número de sus componentes sin afectar de modo adverso las funciones y el desempeño para el que se destina?
- ¿Se pueden eliminar características innecesarias del producto o de alguno de sus componentes, o combinarse con otras peculiaridades?
- ¿Se encuentran disponibles comercialmente algunos de los componentes?
- ¿Se han considerado los conceptos de diseño modular y de bloques de construcción para una familia de productos similares a fin de dar servicio, reparar, actualizar e instalar opciones?
- ¿Se pueden reducir el tamaño y el peso del diseño?

TABLA 40.1

Referencias a diferentes temas en este libro

Consideraciones de diseño en el procesamiento

Fundición metálica	Sección 12.2
Forja	Sección 14.6
Formado de lámina metálica	Sección 16.13
Metalurgia de polvos	Sección 17.6
Formado de materiales cerámicos	Sección 18.5
Procesamiento de polímeros	Sección 19.15
Maquinado	Diferentes secciones en los capítulos 23 y 24
Procesos abrasivos	Sección 26.5
Maquinado avanzado	Diferentes secciones en el capítulo 27
Procesos de unión	Diferentes secciones en los capítulos 30 a 32

Propiedades de los materiales

Tablas 2.1, 2.2, 2.3, y figuras 2.4, 2.6, 2.8, 2.14, 2.15, 2.16, y 2.28
Tablas 3.1, 3.2, 3.3, y figuras 3.1 y 3.2
Tablas 5.2, 5.4 y 5.6
Tablas 6.2 a 6.10
Tablas 7.1 a 7.3
Tablas 8.2 y 8.3
Tabla 9.2 y figuras 9.3, 9.5, y 9.7
Tabla 10.1
Tablas 12.3, 12.4, y 12.5, y figura 12.4
Tablas 16.3 y 16.4
Tablas 17.3, 17.4, 17.5, y figura 17.10
Tabla 20.2
Tablas 22.1, 22.2, 22.5 y figuras 22.1 y 22.9
Tabla 26.1
Tabla 32.3

Características de manufactura de los materiales

Tabla I.3
Tabla 5.6
Tabla 10.1
Tablas 12.2 y 12.6
Tabla 14.3
Tablas 16.2 y 16.3 y figura 16.34
Sección 21.7
Figura 22.2
Sección 30.9.2

Capacidades de los procesos de manufactura

Tablas 11.1 y 11.2
Tabla III.1
Tabla 14.1
Tabla 16.1
Sección 17.7 y figura 17.14
Tabla 18.1
Tablas 19.1 y 19.2
Tabla 20.1
Tablas 23.1, 23.6, 23.8, y 23.10
Tablas 26.3 y 26.4
Tabla 27.1
Tablas 28.1 y 28.2
Tabla 29.1
Tabla VI.1
Tabla 30.1
Tabla 32.4
Tabla 34.1
Tablas 40.2 y 40.3

Tolerancias dimensionales y acabado superficial

Tabla 11.2
Tabla 23.1 y figuras 23.13 y 23.14
Figura 27.4

Costos generales y economía

Tabla I.4
Tabla 6.1
Sección 12.6
Sección 14.9
Sección 16.15
Sección 17.8 y tabla 17.6
Sección 19.16
Figura 24.34
Sección 25.8
Sección 26.9 y figura 26.34
Sección 27.10
Sección 31.8
Sección 32.7
Tablas 40.2, 40.5, y 40.9

- ¿Son innecesariamente estrictas las tolerancias dimensionales y el acabado superficial especificado, que incrementan de manera significativa el costo del producto?
- ¿Se pueden relajar dichas tolerancias, dimensiones y acabado superficial sin efectos adversos?
- ¿Requerirá demasiado tiempo o será difícil ensamblar y desensamblar el producto para mantenimiento, servicio o reciclaje de alguno de sus componentes?
- ¿Se han considerado subensambles?
- ¿Se ha minimizado el uso de elementos de sujeción (incluyendo su cantidad y variedad)?

Como ejemplos de las consideraciones anteriores, obsérvese de qué manera (*a*) se ha reducido el tamaño de productos como cámaras, computadoras, calculadoras, equipo electrónico y teléfonos celulares; (*b*) a menudo la reparación de productos (incluyendo electrodomésticos y automóviles) se realiza sustituyendo subensambles y módulos, y (*c*) se usan menos sujetadores en los productos y más ensambles que utilizan sujetadores de presión.

Diseño del producto y cantidad de materiales. Con las altas capacidades de producción y las reducidas tarifas de mano de obra debidas al moderno equipo y la automatización, el costo de los materiales se ha vuelto una parte significativa del costo total de un producto. Aunque el costo del material no se puede reducir por abajo del nivel del mercado, es posible disminuir la *cantidad de materiales* utilizados en los componentes a producir. El amplio uso de técnicas (como el análisis de elementos finitos, el diseño de peso mínimo, la optimización del diseño, y el diseño y la manufactura asistidos por computadora) ha facilitado en gran medida el análisis del diseño, la selección y el uso de los materiales y la optimización general.

Por lo común, se pueden reducir las cantidades de materiales utilizados disminuyendo el volumen del componente. Este enfoque puede incluir la selección de materiales que tengan altas relaciones de resistencia a peso o de rigidez a peso. Es obvio que se pueden obtener relaciones mayores si se mejora y optimiza el diseño del producto y se seleccionan diferentes secciones transversales, como las que tienen un elevado momento de inercia (es decir, vigas I y canales), o empleando componentes tubulares o huecos en lugar de barras sólidas.

Sin embargo, implantar tales cambios de diseño y minimizar la cantidad de materiales utilizados puede llevar a secciones transversales delgadas y presentar problemas importantes de manufactura, como:

- La fundición o moldeo de secciones transversales delgadas puede presentar dificultades tanto en el llenado de la matriz y el molde como al mantener las especificaciones de la precisión dimensional y el acabado superficial.
- El forjado de secciones delgadas requiere grandes fuerzas, debido a la fricción y al rápido enfriamiento de las secciones delgadas en el forjado en caliente.
- Puede ser difícil la extrusión por impacto de partes con paredes delgadas, en particular cuando se requiere una precisión dimensional y una simetría elevadas.
- Al disminuir el espesor de las hojas, se puede reducir la capacidad de formado en el trabajado con láminas metálicas; esto también puede provocar pandeo de la parte, bajo la acción de los altos esfuerzos de compresión desarrollados en el plano de la lámina durante el formado.
- El maquinado y el rectificado de piezas de trabajo delgadas pueden presentar dificultades, como distorsión de la parte, deficiente precisión dimensional y traqueteo. En consecuencia, se deben considerar procesos de maquinado avanzado en los que las fuerzas sobre la pieza de trabajo sean mínimas o nulas.
- Soldar hojas delgadas y estructuras esbeltas puede provocar una distorsión importante de la parte, debido a los gradientes térmicos desarrollados durante el ciclo de soldadura.

Por el contrario, fabricar partes con secciones transversales gruesas puede tener sus propios efectos adversos. Por ejemplo:

- En procesos como la fundición y el moldeo por inyección la velocidad de producción puede ser más lenta, debido al incremento del ciclo de tiempo requerido para permitir que la parte se enfríe en el molde antes de retirarla.
- A menos que se controle, se puede desarrollar porosidad en las secciones más gruesas de las fundiciones.
- La capacidad para doblar hojas metálicas disminuye al aumentar su espesor.
- En la metalurgia de polvos, es común que existan variaciones importantes de densidad y de propiedades en las partes con espesores variables.
- Soldar secciones gruesas puede ocasionar problemas en la profundidad y calidad de la unión soldada.

- Los materiales que se endurecen por deformación no alcanzan el mismo grado de trabajado en frío; por lo tanto, las partes con paredes gruesas pueden ser más débiles que sus contrapartes con paredes delgadas.
- En las partes fundidas a presión, las secciones más delgadas tienen mayor resistencia por unidad de espesor (debido a que se genera un tamaño de grano menor) que las secciones más gruesas.
- El procesamiento de partes poliméricas requiere mayores tiempos de ciclo a medida que se incrementa su espesor o volumen, debido al aumento del tiempo necesario para que las partes se enfríen lo suficiente y así puedan ser retiradas de los moldes.

EJEMPLO 40.1 Una aplicación del diseño para manufactura y ensamble

Se pueden dar numerosos ejemplos relativos a los beneficios de aplicar los principios y las técnicas del diseño para manufactura y ensamble en las etapas iniciales de concepto y desarrollo del producto. Estos principios también pueden utilizarse para modificar los diseños existentes y seleccionar métodos apropiados de producción. En un ejemplo, se consideró el rediseño del tablero de instrumentos de un helicóptero militar diseñado y construido por McDonnell-Douglas.

Los componentes del tablero consistían en hojas metálicas, extrusiones y remaches. Utilizando el *software* DFMA y analizando este tablero, se estimó que el rediseño llevaría a los siguientes cambios: (*a*) el número de partes se reduciría de 74 a nueve; (*b*) el peso del tablero disminuiría de 3.00 kg a 2.74 kg; (*c*) el tiempo de fabricación, de 305 horas a 20 horas; (*d*) el tiempo de ensamble, de 149 horas a 8 horas; y (*e*) el tiempo total de producción, de 697 horas a 181 horas. También se calculó que, a consecuencia de este rediseño, los ahorros en costo serían de 74%. Con base en estos resultados, se sometieron a un análisis similar otros componentes del tablero de instrumentos.

40.3 Calidad del producto y expectativa de vida

En el capítulo 36 se describieron con detalle la calidad del producto y las técnicas comprendidas en el aseguramiento y control de la calidad. Es difícil definir con precisión la palabra *calidad*, en parte porque no sólo incluye consideraciones técnicas bien definidas, sino también la opinión humana (en consecuencia, subjetiva). Sin embargo, suele considerarse que un producto de alta calidad tiene las siguientes características:

- Satisface las necesidades y expectativas del cliente, incluyendo el costo.
- Es compatible con el ambiente de trabajo del cliente.
- Su funcionamiento es confiable y seguro a lo largo de su vida estimada.
- Visualmente es agradable.
- Es fácil de instalar; además, es posible darle mantenimiento y mejorarlo en el futuro a bajo costo.
- Se encuentra disponible en las cantidades deseadas cuando se le necesita.

En vista de la economía global y la competencia, una prioridad en la calidad del producto es el concepto de *mejora continua*, como ejemplifica el término japonés **Kaizen**, que significa "mejoramiento sin fin". Aun así, el nivel de calidad que un fabricante elige para sus productos depende del mercado al que se dirigen. Los artículos de bajo costo y baja calidad tienen su propio nicho de mercado, así como existe un mercado para productos costosos de alta calidad, como las máquinas herramienta de alta precisión, un automóvil Rolls-Royce, un aeroplano o yate privado, o un artículo deportivo.

Hemos visto (por medio de la *ingeniería concurrente*, sección I.2) que los ingenieros de diseño y de manufactura tienen la responsabilidad y la libertad de seleccionar y

especificar materiales para los productos particulares que se van a fabricar. Las consideraciones de calidad siempre son una parte de dichas tareas. Examinemos un caso simple de selección de materiales para un desarmador común. Con base en sus funciones, uno puede especificar materiales para el vástago que tengan alta resistencia a la fluencia y a la tensión, rigidez torsional, dureza y resistencia al desgaste y a la corrosión. El resultado es que este desarmador se comportará de mejor manera y durará más que otro fabricado con materiales de propiedades inferiores.

Por otro lado, los materiales con mejores propiedades son más costosos, debido en parte a que es más difícil y demandante producirlos que otros. Las mismas consideraciones se aplican al mango de los desarmadores, siendo común seleccionar plástico o madera. Cada uno de estos materiales tiene sus propias ventajas y limitaciones. En consecuencia, las operaciones de manufactura y los sistemas comprendidos en un producto en particular deben revisarse profundamente para mantener bajo el costo del producto, lo que se puede hacer con base en las numerosas consideraciones técnicas y económicas analizadas a lo largo de este libro. Por desgracia, los ingenieros de diseño enfrentan a menudo este dilema, que de manera breve se ha establecido como "bueno y rápido, o barato; escójase cualquiera de los dos".

Rendimiento de la calidad. Debido a los altos costos en que se puede incurrir al considerar la calidad, resulta importante el concepto **rendimiento de la calidad** (ROQ, por sus siglas en inglés). Los componentes básicos son:

- Debido a su importante influencia sobre la satisfacción del cliente, la calidad debe verse como una inversión.
- Tiene que existir un límite a la cantidad que se debe erogar para mejorar la calidad.
- El gasto debe efectuarse específicamente para mejorar la calidad.
- Se debe revisar con cuidado el aumento en las mejoras de la calidad contra los costos adicionales implicados.

Como hemos puntualizado, la calidad es bastante subjetiva. Es evidente que las partes o productos que no sirven para su propósito original pierden calidad, y existe un costo claramente definido que se puede calcular con base en dichos efectos.

Al contrario de la percepción general, los productos de alta calidad no necesariamente cuestan más. Por ejemplo, en las industrias que fabrican chips y equipos para computadoras se minimiza el ROQ a un valor que se aproxima a cero defectos (ver *seis sigma, "six sigma"*; sección 36.7.2), mientras que en otros artículos (como los grifos ordinarios para agua y las bisagras para puertas) el costo de eliminar los pocos últimos defectos puede ser innecesariamente alto. La satisfacción del cliente es un factor cualitativo y difícil de incluir en los cálculos, pero es más probable retener a dicho cliente cuando no existen defectos en los productos. Se ha estimado que los costos relativos a la identificación y reparación de defectos en los productos crecen por orden de magnitud, a lo que se llama la *regla de los diez*, como se muestra en la tabla 40.2.

Expectativa de vida de los productos. Numerosas encuestas han indicado que las *expectativas de vida promedio* de los productos son las que se muestran en la tabla 40.3. La expectativa de vida de los productos puede variar de manera significativa, dependiendo de los materiales y procesos empleados (de ahí la calidad) y de muchos otros factores, en particular la frecuencia y calidad del mantenimiento requerido. Se pueden dar múltiples ejemplos en los que se debe tomar una decisión entre diferentes procesos y materiales para fabricar un producto. Por ejemplo, considérese lo siguiente: (*a*) lámina metálica contra hierro fundido para sartenes; (*b*) acero al carbono contra acero inoxidable en los sistemas de escape de los automóviles; (*c*) madera contra metal en mangos para martillos; (*d*) plástico contra metal en muebles para exteriores, y (*e*) aluminio contra plástico reforzado para escaleras.

TABLA 40.2

Costo relativo de reparación en diferentes etapas de desarrollo y venta del producto

Etapa	Costo relativo de reparación
Cuando se fabrica la parte	1
Subensamble de la parte	10
Ensamble final del producto	100
El producto se encuentra con el distribuidor	1000
El producto se encuentra con el cliente	10,000

TABLA 40.3

Expectativa de vida promedio para diferentes productos. Ver también tabla 36.1

Producto	Años
Aspiradora	10
Batería de automóvil	4
Calentador de agua (de gas)	12
Calentador de agua (eléctrico)	14
Carro de pasajeros	8
Celda de manufactura	15
Computadora personal	4
Horno (de gas)	18
Lavadora de ropa	13
Lavadora de vajillas	10
Maquinaria	30
Refrigerador	17
Secador de ropa (de gas)	13
Secadora de pelo	5
Trituradora de desperdicios	10
Unidad de aire acondicionado central	15

40.4 Evaluación e ingeniería del ciclo de vida: manufactura sustentable

El *ciclo de vida* (también denominado *de la cuna a la tumba*) se puede definir como las etapas consecutivas y vinculadas de un producto o un sistema de servicios, incluyendo:

- La extracción de los recursos naturales.
- El procesamiento de las materias primas.
- La manufactura de los productos.
- El transporte y la distribución del producto al cliente.
- El uso, mantenimiento y reutilización del producto.
- La disposición del producto, o recuperación y reciclaje de sus componentes.

Obsérvese que, básicamente, todos estos factores se aplican a cualquier artículo. Cada tipo de producto tiene su propio ciclo de vida y sus propios materiales metálicos y no metálicos, que se han procesado como partes individuales y se han ensamblado.

Nótese que algunos productos son desechables y otros se pueden usar de nuevo. Además de los materiales, otras consideraciones importantes son el uso de fluidos (como lubricantes, refrigerantes, soluciones tóxicas y los utilizados en los procesos de tratamiento térmico y deposición), lo que puede tener serios efectos ambientales. Hoy en día, los reglamentos gubernamentales en muchos países han cambiado para que los fabricantes sean más conscientes del ciclo de vida.

Evaluación del ciclo de vida (LCA, por sus siglas en inglés). Según la norma ISO 14000 (ver la sección 36.6), la evaluación del ciclo de vida se define como un conjunto sistemático de procedimientos para compilar y examinar las entradas y salidas de materiales y energía, así como los impactos o cargas ambientales asociadas, directamente atribuibles al funcionamiento de un producto, proceso o sistema de servicios, a lo largo de su ciclo de vida.

Ingeniería del ciclo de vida (LCE, por sus siglas en inglés). La ingeniería del ciclo de vida se relaciona con los factores ambientales, como en el caso de la evaluación del ciclo de vida, y aborda con mayor profundidad el diseño, la optimización y diversas consideraciones técnicas en relación con el ciclo de vida de un producto o de un proceso. Un objetivo importante de dicha ingeniería es considerar la reutilización y el reciclaje de los componentes de un artículo, desde la primera etapa de análisis y consideración del diseño del producto (también llamado *diseño verde* [*green design*] o *ingeniería verde* [*green engineering*]).

Aunque el análisis y la ingeniería del ciclo de vida son herramientas completas y poderosas, su implantación puede ser costosa, desafiante y laboriosa. Esto se debe en gran medida a la incertidumbre de los datos de entrada (en relación con los materiales, procesos, efectos de largo plazo, costos, etc.) y al tiempo requerido para reunir datos confiables a fin de evaluar de manera apropiada las relaciones, a menudo complejas, entre diversos componentes de todo el sistema. Se ha desarrollado diferente *software* para agilizar estos análisis, sobre todo en la industria química y de procesos, debido a su mayor potencial de daño ambiental durante sus operaciones.

Manufactura sustentable. En años recientes nos hemos vuelto cada vez más conscientes de que los recursos de esta tierra son limitados y necesitamos conservar materiales y energía. El término *manufactura sustentable* se utiliza ahora para indicar y enfatizar la necesidad de conservar recursos, en particular mediante el mantenimiento apropiado y la reutilización. Al mismo tiempo que se mantiene la rentabilidad de una empresa, esto se debe hacer para: (*a*) aumentar el ciclo de vida de los productos; (*b*) eliminar el daño al ambiente, y (*c*) asegurar nuestro bienestar social colectivo, sobre todo para las generaciones futuras.

EJEMPLO 40.2 Manufactura sustentable en la producción de calzado deportivo Nike

Entre los numerosos ejemplos de la industria, la producción del calzado Nike indica con claridad los beneficios de la manufactura sustentable. El calzado deportivo se ensambla mediante adhesivos. Hasta 1990, los adhesivos usados contenían solventes con base de petróleo, lo que representa riesgos para la salud humana y contribuye a los humos petroquímicos. La compañía trabajó con sus proveedores de productos químicos hasta desarrollar con éxito una tecnología de adhesivos con base de agua, que ahora se emplea en la mayoría de las operaciones de ensamble de zapatos. El resultado es que el uso de solventes en todos los procesos de manufactura en las instalaciones subcontratadas en Asia se ha reducido 67% desde 1995. De la misma manera, en 1997 se sustituyeron 834,000 galones de solventes peligrosos con 1290 toneladas de adhesivos con base de agua.

En relación con otro componente del zapato, las suelas de hule, se fabrican mediante un proceso que produce cantidades significativas de hule adicional en la periferia de la suela (llamado rebaba, que es similar a la rebaba mostrada en las figs. 14.5d o 19.19c). Con cerca de 40 fábricas que utilizan miles de moldes y producen más de un millón de suelas al día, la rebaba constituye el trozo más grande de desperdicio en el proceso de manufactura de los zapatos. Para reducirlo, la compañía desarrolló una tecnología que muele la rebaba y la convierte en polvo de hule de 500 μm que después se agrega otra vez a la mezcla necesaria para fabricar la suela. El desperdicio se redujo 40%, pero también se encontró que el hule mezclado tiene mejor resistencia a la abrasión, más durabilidad y un desempeño general superior al hule de mayor calidad.

40.5 Selección de materiales para productos

Al seleccionar materiales para un producto, es fundamental comprender claramente los *requerimientos funcionales* de cada uno de sus componentes individuales. Aunque los criterios generales de dicha selección se indicaron en la sección I.4 de la Introducción General, aquí se discuten con más detalle.

Propiedades mecánicas, físicas y químicas. Como señalamos en el capítulo 2, son propiedades mecánicas la resistencia, tenacidad, ductilidad, rigidez, dureza y resistencia a la fatiga, al deslizamiento y al impacto. Las propiedades físicas son la densidad, el punto de fusión, el calor específico, la conductividad térmica y eléctrica, la dilatación térmica y las propiedades magnéticas. Por último, las propiedades químicas, que son de interés fundamental en la manufactura, son la susceptibilidad a la oxidación y a la corrosión, asó como los diversos procesos de tratamiento superficial descritos en el capítulo 34.

Ahora la selección de materiales es más fácil y rápida debido a la disponibilidad de bases de datos completas que proporcionan mayor posibilidad de acceso y precisión. Sin embargo, para facilitar la selección de materiales y otros parámetros que describiremos después, se ha desarrollado *software para sistemas expertos* (**bases de datos inteligentes**; ver también sección 39.8). Con la entrada apropiada del diseño del producto y de los requerimientos funcionales, estos sistemas son capaces de identificar materiales adecuados para una aplicación particular como lo haría un experto o un equipo de expertos.

En la selección de materiales para diferentes productos es importante considerar los siguientes factores:

- ¿Los materiales seleccionados tienen las características apropiadas para la manufactura?
- ¿Se pueden sustituir algunos materiales por otros que sean menos costosos?
- ¿Los materiales considerados tienen propiedades que exceden innecesariamente los requerimientos y especificaciones mínimos?
- ¿Las materias primas (en almacén) especificadas existen en formas, dimensiones, tolerancias y características superficiales estándar?
- ¿Es confiable el suministro de materiales? ¿Se puede entregar el material en las cantidades y en el marco de tiempo requeridos? ¿Es probable que existan incrementos o fluctuaciones significativas de precio?
- ¿El material presenta algún riesgo o preocupación ambiental?

Formas de materiales disponibles comercialmente. Después de seleccionar los materiales necesarios, debemos conocer las formas y tamaños en que se encuentran disponibles comercialmente estos materiales (tabla 40.4). En general, existen en diversas

TABLA 40.4

Formas de materiales disponibles comercialmente

Material	Disponible como
Aceros y aceros inoxidables	B, I, P, S, T, W
Aluminio	B, F, I, P, S, T, W
Cerámicos	B, p, s, T
Cobre y latón	B, f, I, P, s, T, W
Elastómeros	b, P, T
Grafito	B, P, s, T, W
Magnesio	B, I, P, S, T, w
Metales preciosos	B, F, I, P, t, W
Plásticos	B, f, P, T, w
Vidrio	B, P, s, T, W
Zinc	F, I, P, W

Nota: B = barra y varilla; F = hoja; I = lingote; P = placa y lámina; S = formas estructurales; T = tubería; W = alambre
Las minúsculas indican disponibilidad limitada.
La mayoría de los metales también se encuentran disponibles en forma de polvo, incluyendo polvos pre-aleados.

formas, como fundiciones, extrusiones, forjas, barras, placas, láminas, hojas, alambres y polvos metálicos.

La compra de materiales en las formas que requieren el menor procesamiento adicional es un factor importante. Sin embargo, también se deben tener en cuenta características como la calidad superficial, las tolerancias dimensionales y la rectitud. Obviamente, cuanto mejores y más consistentes sean estas características, menor procesamiento adicional se requerirá.

Por ejemplo, si deseamos producir ejes simples que tengan una buena precisión dimensional, redondez, rectitud y acabado superficial, podemos comprar barras redondas que se tornean y rectifican sin centros a las dimensiones especificadas. A menos que nuestras instalaciones sean capaces de producir barras redondas en forma económica, en general es más barato comprarlas.

Por otro lado, si necesitamos fabricar un eje escalonado (que tenga diferentes diámetros a lo largo de su longitud), podemos comprar una barra redonda (con un diámetro por lo menos igual al mayor diámetro del eje escalonado final) y cilindrarla en un torno, o procesarla por algún otro medio a fin de reducir su diámetro. Si el material tiene amplias tolerancias dimensionales, está alabeado o no es redondo, debemos ordenar un tamaño mayor para asegurar el apropiado control dimensional del eje final.

Como hemos visto, cada paso de manufactura produce partes que tienen formas específicas, acabados superficiales y precisiones dimensionales. Los ejemplos incluyen:

- Los productos laminados o estirados en caliente tienen un acabado superficial más rugoso y mayores tolerancias dimensionales que los productos laminados o estirados en frío.
- En general, las fundiciones tienen menor precisión dimensional y un acabado superficial más deficiente que las partes fabricadas mediante extrusión en frío o por metalurgia de polvos.
- Las barras redondas torneadas en un torno suelen tener un acabado superficial más rugoso que las barras que se rectifican en rectificadoras cilíndricas.
- En general, el espesor de pared de los tubos soldados es más uniforme que el de la tubería sin costura (producidos por el proceso Mannesmann; ver fig. 13.18).
- Las extrusiones tienen menores tolerancias de sección transversal que las partes fabricadas mediante formado por laminación de hojas metálicas.

Características de manufactura de los materiales. Como hemos descrito a lo largo de este libro, comúnmente las características de manufactura de los materiales incluyen la capacidad de ser fundidos, la capacidad de ser trabajados, la formabilidad, la maquinabilidad, la soldabilidad y la capacidad de endurecimiento mediante tratamiento térmico. A las materias primas se les tiene que modelar, dar forma, maquinar, rectificar, fabricar o tratar térmicamente para convertirlas en componentes individuales con formas y dimensiones específicas, por lo que sus características de manufactura son cruciales para seleccionar de manera apropiada estos materiales.

Recuérdese también que la calidad de las materias primas puede influir en gran medida en sus propiedades de manufactura. Algunos ejemplos son los siguientes:

- Una varilla o barra con costura longitudinal (solapa) desarrolla grietas durante las operaciones de recalcado simple y cabeceado.
- Las barras redondas con defectos internos e inclusiones duras se agrietan durante la producción de tubo sin costura.
- Las fundiciones porosas producen un acabado superficial deficiente cuando se maquinan.
- Las piezas en bruto a las que se les da tratamiento térmico no uniforme y las barras a las que no se les relevan esfuerzos se distorsionan durante el procesamiento posterior.
- Los materiales que se surten del almacén y tienen variaciones de composición y microestructura no se pueden tratar térmicamente, ni maquinar de manera consistente y uniforme.
- Las láminas metálicas que tienen variaciones en sus condiciones de trabajado en frío muestran una recuperación elástica durante el doblado y otras operaciones de formado debido a diferencias en el esfuerzo de fluencia.
- Si se suministran piezas en bruto de lámina metálica prelubricada con una distribución y espesor no uniformes del lubricante, se afecta de manera adversa su formabilidad, acabado superficial y calidad global en las operaciones de estampado.

Confiabilidad del suministro de materiales. En la sección I.4 puntualizamos factores geopolíticos que pueden afectar el suministro de materiales estratégicos. Otros factores como huelgas, escasez y la resistencia de los proveedores a producir materiales con una forma, calidad o cantidad particular (porque no existe incentivo económico) también afectan la confiabilidad del suministro. Aunque la disponibilidad de materiales a lo largo de un país puede no ser una preocupación importante, se convertiría en un problema para algún negocio debido a la ubicación particular de una planta manufacturera.

Consideraciones de reciclaje. Hemos reiterado la importancia del reciclaje en la selección de materiales. Recordemos que para reciclar se requiere separar los componentes individuales de un producto. Si tiene que aplicarse mucho esfuerzo y tiempo para hacerlo, se puede volver prohibitivo. En este punto resumimos algunos de los lineamientos generales para facilitar el reciclaje.

- Reducir el número de partes y tipos de materiales en los productos.
- Utilizar un diseño modular para facilitar el desensamble.
- En el caso de partes plásticas, utilizar tipos simples de polímeros (hasta donde sea posible).
- Marcar las partes plásticas para facilitar la identificación (como se hace con los contenedores y las botellas de plástico para alimentos).
- No utilizar recubrimientos, pinturas y depósitos; en su lugar, usar partes de plástico moldeadas en color.
- Tampoco utilizar adhesivos, remaches y otros métodos de unión permanente para ensamble; en su lugar, emplear elementos de sujeción, en particular sujetadores instantáneos de presión.

Como ejemplo de este tipo de método para reciclaje, un fabricante de impresoras láser de inyección de tinta ha reducido 32% el número de partes en el cartucho y 55% el número de resinas plásticas.

Costo de los materiales y el procesamiento. Debido a su historia de procesamiento, el costo unitario de una materia prima depende no sólo del propio material, sino también de su forma, tamaño y condiciones. Por ejemplo, como la producción de un alambre delgado implica más operaciones que la de una barra redonda, el costo unitario del alambre es mucho más elevado. De manera semejante, en general los polvos metálicos son más costosos que los metales a granel. Además, el costo de los materiales suele disminuir al aumentar la cantidad de compra. Igualmente, algunos segmentos de la industria (como las compañías automotrices) compran materiales en cantidades muy grandes; cuanto mayor sea la cantidad, menor será el costo por unidad de peso (descuento por volumen).

El costo de los materiales puede ser determinado en función del costo por unidad de peso o costo por unidad de volumen. En la tabla 40.5 se muestra el costo por unidad de volumen en relación con el del acero al carbono. El beneficio del costo por volumen se puede ver en el siguiente ejemplo sencillo. En el diseño de una viga rectangular en voladizo que soporta cierta carga en su extremo, se especifica una deflexión máxima. Utilizando las ecuaciones desarrolladas en la mecánica de sólidos y suponiendo que se puede despreciar el peso de la viga, podemos determinar una sección transversal apropiada de ella. Como ahora se conocen todas las dimensiones, es posible calcular su volumen, y si conocemos el costo del material por unidad de volumen, podemos estimar con facilidad el costo de la viga. Si el costo es por unidad de peso, primero tenemos que calcular su peso y después determinar el costo.

El costo de un material particular está sujeto a fluctuaciones originadas por factores tan simples como la oferta y la demanda, o tan complejos como la geopolítica. Si un producto ya no es competitivo en costo, se pueden seleccionar materiales alternativos y más baratos. Por ejemplo, la escasez de cobre en la década de 1940 obligó al gobierno de Estados Unidos a acuñar monedas de 5 centavos de acero recubierto con zinc. De igual manera, cuando el precio del cobre aumentó en forma sustancial durante la década de 1960, el cableado eléctrico que se instalaba en los hogares (por algún tiempo) se fabricó con aluminio. Sin embargo, esta sustitución obligó a rediseñar los interruptores y tomas de corriente para evitar calentamiento excesivo en las uniones.

Cuando se produce el desperdicio durante la manufactura, como en la fabricación de lámina metálica, el forjado y el maquinado, el valor del desperdicio se deduce del costo del material para obtener el costo neto del material. En la tabla 40.6 se presenta el desperdicio generado en procesos seleccionados de manufactura. Obsérvese que, en el maquinado, el desperdicio puede ser muy alto, mientras que el laminado, el laminado de anillos y la

TABLA 40.5

Costo aproximado por unidad de volumen para metales forjables y polímeros, en relación con el costo del acero al carbono

Oro	60,000	Aleaciones de aluminio	2–3
Plata	600	Aceros de baja aleación de alta resistencia	1.4
Aleaciones de molibdeno	200–250	Hierro fundido gris	1.2
Níquel	35	Acero al carbono	1
Aleaciones de titanio	20–40	Nailons, acetales y siliconas	1.1–2
Aleaciones de cobre	5–6	Hule	0.2–1
Aceros inoxidables	2–9	Otros plásticos y elastómeros*	02–2
Aleaciones de magnesio	2–4		

* Como compuestos de moldeo

Nota: Los costos varían de manera significativa con las cantidades compradas, la oferta y la demanda, el tamaño y la forma, y otros diversos factores.

TABLA 40.6

Intervalos aproximados de desperdicio generado en diferentes procesos de manufactura

Proceso	Desperdicio (%)	Proceso	Desperdicio (%)
Maquinado	10–60	Fundición con molde permanente	10
Forja en caliente	20–25	Metalurgia de polvos	<5
Formado de lámina metálica	10–25	Laminado	<1
Extrusión en caliente	15		

metalurgia de polvos (todos los cuales son procesos de forma neta, o casi neta) producen la menor cantidad de desperdicio. Como se esperaba, el valor del desperdicio depende del tipo de metal y de su demanda; por lo común se encuentra entre 10% y 40% del costo original del material.

EJEMPLO 40.3 Efecto de la dureza de la pieza de trabajo en el taladrado

Unas piezas en bruto forjadas para engranes y fabricadas de acero aleado 8617, tenían un intervalo de dureza de 149 HB a 156 HB y requerían el taladrado de un orificio de 75 mm (3 pulgadas) de diámetro en la masa. Las piezas se taladraron con una broca helicoidal estándar. Sin embargo, después de sólo 10 piezas, la broca comenzó a excoriarse y a desafilarse, las temperaturas aumentaron de manera excesiva y los orificios taladrados habían desarrollado un acabado superficial interno rugoso.

Para mejorar la maquinabilidad y reducir la excoriación, se aumentó la dureza de las piezas en bruto en un intervalo de 217 HB a 241 HB calentándolas a 840 °C (1540 °F), enfriándolas después en aceite. Cuando se taladraron las piezas a este nivel de dureza, se redujo la excoriación, se mejoró el acabado superficial, la vida de la broca se incrementó a 50 piezas y disminuyó 80% el costo del taladrado.

Fuente: ASM International.

40.6 Sustitución de materiales

En la actualidad es difícil encontrar un producto en el mercado global donde no se haya utilizado la *sustitución de materiales* para ayudar a las compañías a mantener sus posiciones competitivas. La manufactura de automóviles y aeronaves es un ejemplo común de industrias importantes en las que la sustitución de materiales constituye una actividad continua. Una tendencia similar es evidente en los artículos deportivos y en otros numerosos productos.

Aunque continuamente aparecen nuevos productos en el mercado, la mayoría de los esfuerzos de diseño y manufactura se relaciona con la mejora de los artículos existentes. Son varias las razones para sustituir materiales en dichos productos:

1. Reducir los costos de los materiales y del procesamiento.
2. Mejorar la manufactura, ensamble e instalación y permitir la conversión al ensamble automatizado.
3. Mejorar el desempeño del producto (por ejemplo, mediante la reducción de peso o mejorando la resistencia al desgaste, a la fatiga y a la corrosión).

4. Aumentar las relaciones rigidez a peso y resistencia a peso.
5. Reducir la necesidad de mantenimiento y reparación.
6. Reducir la vulnerabilidad por la falta de confiabilidad en el suministro de materiales.
7. Mejorar el cumplimiento de las leyes y los reglamentos que prohíben el uso de ciertos materiales por razones ambientales, así como responder a otras inquietudes sociales.
8. Mejorar la robustez para reducir las variaciones del desempeño o la sensibilidad ambiental del producto.

Sustitución de materiales en la industria automotriz. El automóvil es un buen ejemplo de la sustitución efectiva de materiales para alcanzar uno o más de los objetivos descritos. Algunos ejemplos de sustitución de materiales son:

- Algunos componentes del cuerpo metálico han sido sustituidos por partes de plástico o de plástico reforzado.
- Defensas, engranes, bombas, tanques de combustible, alojamientos, cubiertas, abrazaderas y otros componentes metálicos han sido sustituidos por plásticos o compósitos.
- Componentes metálicos del motor han sido sustituidos por partes cerámicas y de compósitos.
- Ejes impulsores totalmente metálicos han sido sustituidos por ejes impulsores de materiales compósitos.
- Monobloques de hierro fundido para motores han sido sustituidos por aluminio fundido, cigüeñales forjados por cigüeñales fundidos, y bielas forjadas por bielas fundidas, fabricadas por metalurgia de polvos o con materiales compósitos.
- Los asientos de piel en algunos automóviles de lujo (incluyendo el Mercedes) se pueden sustituir (de manera opcional) con materiales sintéticos, en respuesta a las inquietudes planteadas por grupos promotores.

Debido a que la industria automotriz es un consumidor importante de materiales metálicos y no metálicos, existe una competencia constante entre proveedores, sobre todo en los ramos del acero, aluminio y plásticos. Los ingenieros y gerentes de la industria investigan a menudo las ventajas y limitaciones relativas de estos materiales principales en sus aplicaciones, reciclaje y otras consideraciones ambientales, así como en los costos y beneficios relativos (en particular).

Sustitución de materiales en la industria aeronáutica. En las industrias aeronáutica y aeroespacial:

- Las aleaciones convencionales de aluminio (series 2000 y 7000) están siendo sustituidas con aleaciones de aluminio-litio y de titanio (debido a sus relaciones más elevadas de resistencia a peso).
- Las partes forjadas están siendo sustituidas con partes fabricadas mediante metalurgia de polvos, las cuales tienen un mejor control de las impurezas y de la microestructura, además de que requieren menos maquinado y generan menos desperdicio de materiales costosos.
- Materiales compósitos avanzados y estructuras de panal están sustituyendo a componentes tradicionales de estructuras de aluminio (fig. 40.1), en tanto que los compósitos de matriz metálica están reemplazando a algunos de los componentes estructurales de aluminio y titanio.

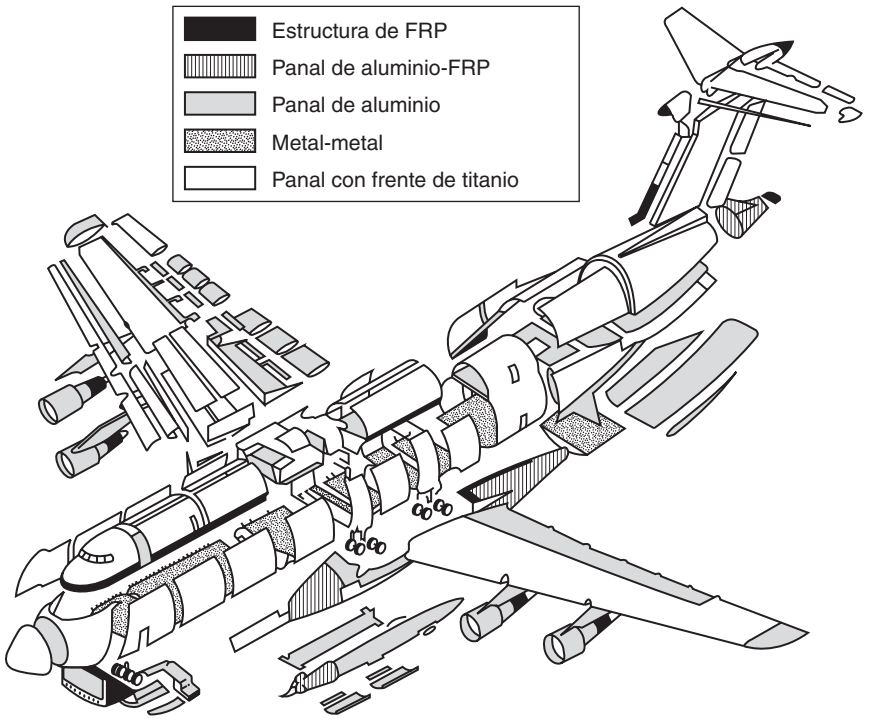


FIGURA 40.1 Materiales avanzados en la aeronave de transporte Lockheed C-5A. (*Nota:* FRP es plástico reforzado con fibra, en inglés).

EJEMPLO 40.4 Cambios de materiales entre los aviones militares de carga C-5A y C-5B

En la tabla 40.7 se muestran los cambios realizados para diversos componentes de las dos aeronaves y las razones de dichos cambios.

Fuente: H. B. Allison, Lockheed-Georgia.

TABLA 40.7

Cambios de materiales del avión militar de carga C-5A al C-5B

Artículo	Material del C-5A	Material del C-5B	Razón para el cambio
Tableros de ala	7075-T6511	7175-T73511	Durabilidad
Estructura principal			
Forjas	7075-F	7049-01	Resistancia a la corrosión bajo esfuerzo
Estructuras maquinadas	7075-T6	7049-T73	
Cintas de marcos	Placa 7075-T6	Placa 7050-T7651	
Cubierta del fuselaje	7079-T6	7475-T61	Disponibilidad del material
Accesorios de extremo piso del fuselaje	7075-T6 forja	7049-T73 forja	Resistancia a la corrosión bajo esfuerzo
Accesorio de sujeción ala/pilón	Acero aleado 4340	PH13-8Mo	Prevención de la corrosión
Ganchos de seguro de rampa trasera	D6-AC	PH13-8Mo	Prevención de la corrosión
Líneas hidráulicas	Acero inoxidable AM350	Acero inoxidable 21-6-9	Mejorar reparación en campo
Abrazaderas de aseguramiento del fuselaje	Titanio 6AI-4V	Aluminio 7475-T61	Desprendimiento de cinta de titanio

40.7 Capacidades de procesos de manufactura

Hemos visto que cada proceso de manufactura tiene sus ventajas y limitaciones particulares. Por ejemplo, la fundición y el moldeo por inyección de polvos suelen producir formas más complejas que el forjado. Sin embargo, mediante operaciones posteriores de maquinado y acabado, las forjas pueden adquirir formas complejas con gran precisión dimensional y acabado superficial; además, tienen una resistencia y tenacidad que por lo general superan a las de los productos de la fundición y la metalurgia de polvos.

La forma de un producto puede ser tal que se fabrique mejor a partir de varios componentes individuales que se unen después con elementos de sujeción, o con técnicas como la soldadura, la soldadura fuerte y la unión con adhesivos. Para otro producto, manufacturarlo de una sola pieza puede ser más económico debido a los significativos costos de ensamble implicados en caso contrario.

Otros factores que se deben considerar en la selección del proceso son el tamaño mínimo de la sección y las dimensiones que se pueden producir de manera satisfactoria (fig. 40.2). Por ejemplo, es posible fabricar las secciones muy delgadas mediante laminado en frío, pero sería difícil o imposible utilizar procesos como la fundición en arena, la forja o la metalurgia de polvos.

Tolerancias dimensionales y acabado superficial. Las tolerancias superficiales y el acabado superficial producido son importantes, sobre todo en las operaciones posteriores de ensamble (debido a las posibles dificultades para ajustar las partes para ensamble) y en la operación apropiada de las máquinas e instrumentos (porque su desempeño puede afectar las tolerancias y el acabado). En la figura 40.3 se ilustran de manera cualitativa la tolerancia dimensional y el acabado superficial que se obtienen por lo común mediante diversos procesos de manufactura.

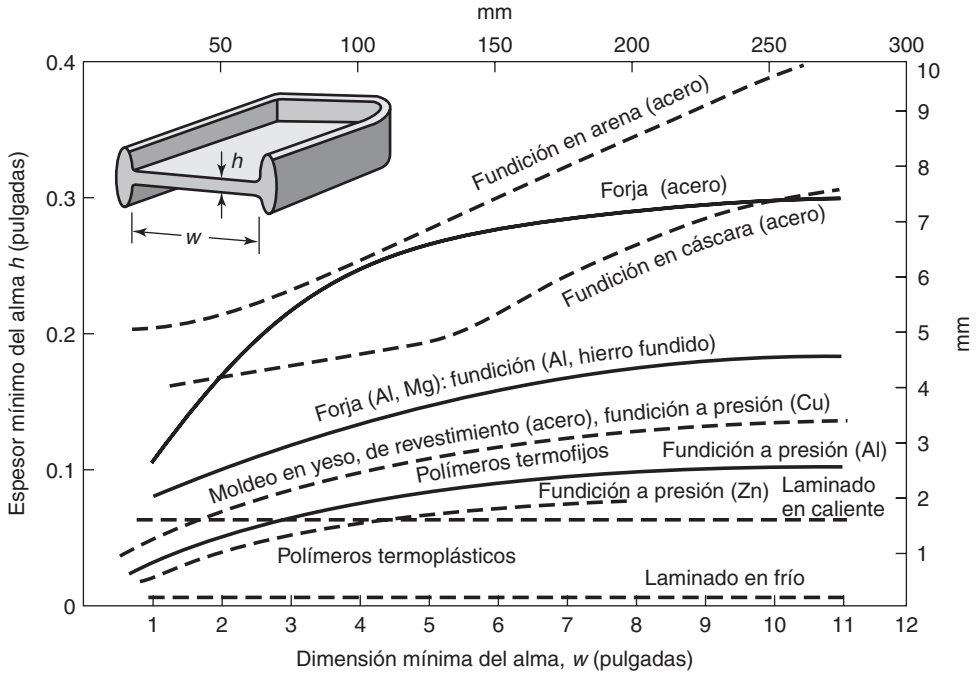


FIGURA 40.2 Capacidades del proceso de manufactura para dimensiones mínimas de una parte. *Fuente*: J. A. Schey.

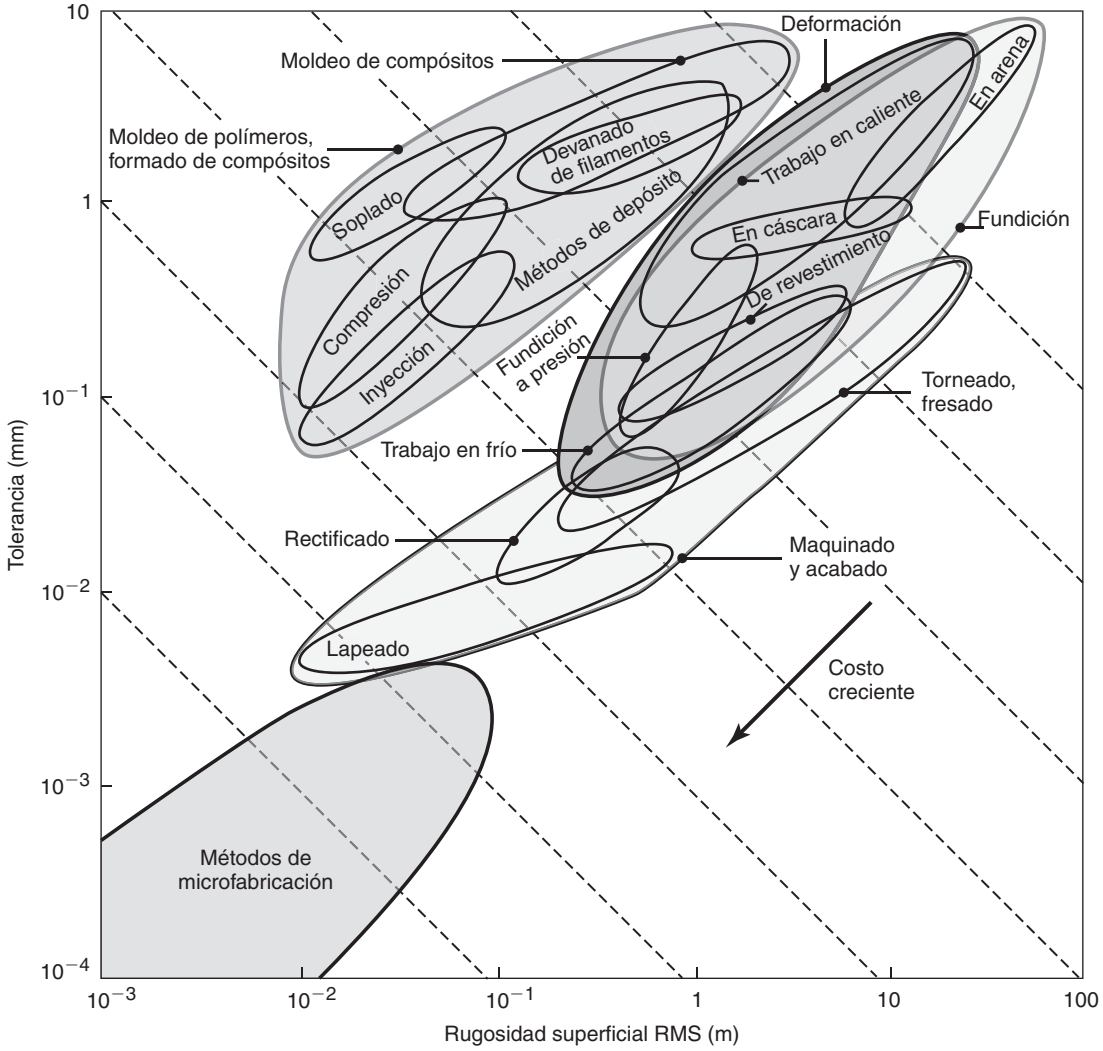


FIGURA 40.3 Gráfica de tolerancia obtenible contra rugosidad superficial para diversas operaciones de manufactura. Las líneas discontinuas indican factores de costo en donde un incremento en la precisión correspondiente a la separación de dos líneas cercanas da un incremento en costo para un proceso dado (o un factor de dos). *Fuente*: M. F. Ashby, *Materials Selection in Design*. Butterworth-Heineman, 1999.

Para obtener tolerancias dimensionales más cerradas y un mejor acabado superficial, es fundamental controlar los parámetros de procesamiento y utilizar maquinaria, equipo y herramental de mayor calidad; en caso contrario, es posible que sean necesarias operaciones adicionales (y, por ende, costosas) de acabado. Cuanto más cerrada sea la tolerancia y más fino el acabado superficial especificado, mayor será el costo de manufactura, como se muestra en la figura 40.4.

Además, cuanto más fino sea el acabado superficial requerido, mayores serán el tiempo de manufactura, el número de procesos involucrados y el costo del producto (fig. 40.5). Por ejemplo, en el maquinado de miembros estructurales para aeronaves, fabricados con aleaciones de titanio, se ha observado que en el paso final de maquinado para mantener las tolerancias apropiadas y el acabado superficial, se puede gastar hasta 60% del costo de maquinado de la parte. A menos que se requiera otra cosa (mediante la justificación técnica y económica apropiada), las partes se deben fabricar con un acabado

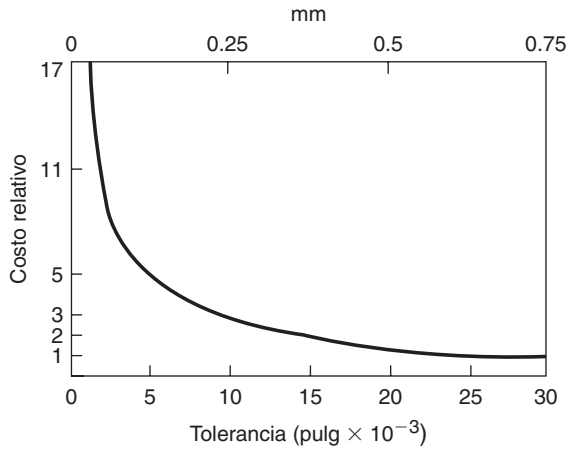


FIGURA 40.4 Dependencia del costo de manufactura de las tolerancias dimensionales.

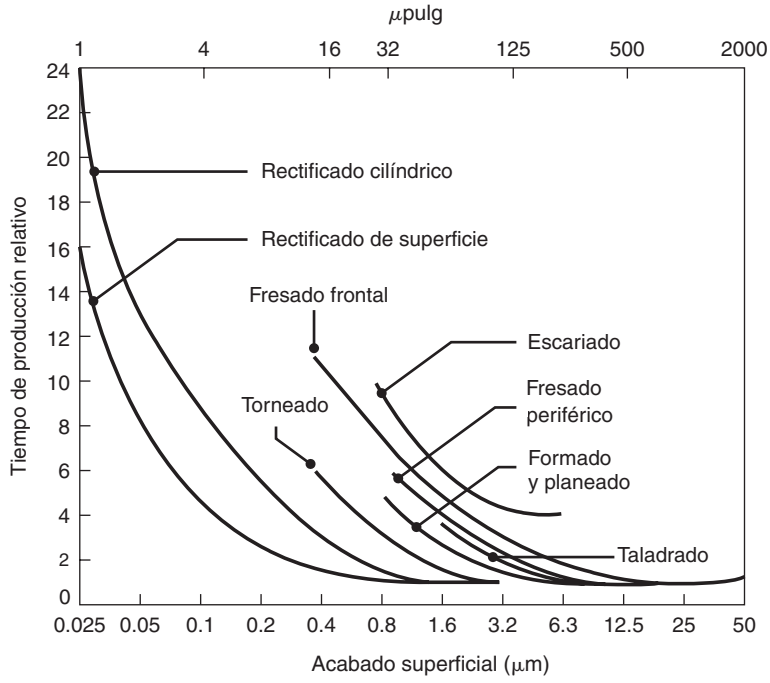


FIGURA 40.5 Tiempo de producción relativo en función del acabado superficial producido mediante diversos procesos de manufactura (ver también fig. 26.34).

superficial tan rugoso y una tolerancia dimensional tan amplia como sea aceptable funcional y estéticamente.

Cantidad de producción. Dependiendo del tipo de producto, la cantidad de producción (*tamaño de lote*) varía ampliamente. Por ejemplo, los rodamientos, pernos, bujías, municiones, contenedores plásticos, neumáticos, automóviles y podadoras de pasto se fabrican en cantidades muy grandes. Por el contrario, los motores de propulsión, motores

a diesel, locomotoras y embarcaciones se producen en cantidades limitadas. La cantidad de producción también juega un papel importante en la selección del proceso y del equipo. De hecho, se ha dedicado toda una disciplina (denominada *cantidad económica de orden*) para determinar de manera matemática la cantidad óptima de producción.

Capacidad o velocidad de producción. Un factor importante en la selección del proceso de manufactura es la capacidad o velocidad de producción. Ésta se define como el número de piezas que se producen por unidad de tiempo (es decir, por hora, por día o por año). Recuérdese que procesos como la fundición a presión, la metalurgia de polvos, el embutido profundo, el estirado de alambre y el formado con rodillos son operaciones con altas capacidades de producción. Por el contrario, la fundición en arena, el maquinado convencional y electroquímico, el rechazado metálico, el formado superplástico, la unión por adhesivos y por difusión y el procesamiento de los plásticos reforzados son operaciones de una relativa baja capacidad de producción. Sin embargo, esto no necesariamente significa que un proceso de manufactura sea inherentemente antieconómico. Es obvio que se puede aumentar la capacidad de producción mediante múltiples equipos y máquinas muy automatizadas.

Tiempo de entrega. En general, el tiempo de entrega se define como el periodo entre la recepción de una orden para un producto y su entrega al usuario en el momento especificado. La selección de un proceso y operación de manufactura se afecta en gran medida por el tiempo requerido para iniciar la producción. Por ello, dependiendo de la complejidad de la forma del dado o matriz, su tamaño y el material, el tiempo de entrega para procesos como la forja, la extrusión, la fundición a presión, el formado con rodillos y el formado de láminas metálicas puede variar desde semanas hasta meses.

Por el contrario, los procesos de remoción de material, como el maquinado, el rectificado y las técnicas avanzadas de maquinado tienen una flexibilidad importante, ya que utilizan máquinas y herramentales que se pueden adaptar con facilidad a la mayoría de los requerimientos de producción en muy corto tiempo. Recuérdese que los centros de maquinado, las celdas flexibles de manufactura, y los sistemas flexibles de manufactura son capaces de responder con rapidez y efectividad a los cambios del producto y a las cantidades de producción.

Robustez de los procesos y maquinaria para la manufactura. En la sección 36.5.1 se describió la robustez en términos de un diseño, un proceso o un sistema. Para apreciar su importancia en los procesos de manufactura, consideremos brevemente una situación en la que un engrane sencillo de plástico se está produciendo mediante el moldeo por inyección y que existen variaciones importantes e impredecibles en la calidad cuando se fabrican los engranes. Existen diversas variables y parámetros bien conocidos en el moldeo de plásticos por inyección, incluyendo los efectos de la calidad de la materia prima (*pellets*), las temperaturas dentro del sistema y el tiempo. Éstas son variables independientes, por lo que se pueden controlar.

Sin embargo, existen algunas otras variables (llamadas *ruido*) que están en gran medida fuera del control del operario. Entre éstas se encuentran las variaciones de temperatura ambiente y de humedad en la planta durante el día, el polvo en el aire que entra en la planta a través de una puerta abierta (posiblemente contaminando los *pellets* alimentados a las tolvas de la máquina de moldeo por inyección) y la variabilidad en el desempeño de los operarios durante los diferentes turnos. Obviamente, es difícil o imposible controlar con precisión estas variables.

Para obtener una buena calidad del producto de manera sostenida, primero es necesario entender los efectos (en su caso) de cada elemento de ruido en la operación. Por ejemplo: (*a*) ¿Por qué y de qué manera afecta la temperatura ambiente la calidad y las características superficiales de los engranes moldeados? (*b*) ¿Por qué y de qué manera afecta la capa de polvo de los *pellets* su comportamiento en la máquina de inyección? (*c*) ¿Cuán diferente es el desempeño de los diferentes operarios durante los distintos turnos y por qué? (*d*) ¿Existen variaciones inherentes en el desempeño de la máquina durante el día, y de ser así, por qué?

Entonces será posible establecer nuevos parámetros de operación para que las variaciones de, digamos, la temperatura ambiental y el ambiente de la planta, no afecten de manera adversa la calidad de los engranes. Obsérvese que estas consideraciones son igualmente válidas para otros procesos de producción, aunque algunos son menos sensibles al ruido (como los procesos de deformación volumétrica) que otros (como la manufactura de microelectrónicos). Debido a que éste es un tema complejo, su análisis se encuentra fuera del alcance de este libro.

40.8 Selección de procesos

Con base en los análisis y las consideraciones anteriores, ahora procedemos con el tema de la *selección de los procesos y maquinaria de manufactura* y cómo se relaciona este proceso de selección con diversos factores (ver también sección I.5). De los análisis hechos en los diferentes capítulos de este libro, recordemos que la selección de los procesos se relaciona íntimamente con las características de los materiales a procesar (tabla 40.8). Obsérvese que actualmente la mayoría de los procesos y operaciones de manufactura se han automatizado o se controlan mediante computadora con el propósito de optimizar todos los aspectos de la operación completa, así como aumentar la confiabilidad y la calidad del producto, reduciendo los costos (ver sección 40.9).

A continuación se analizan los factores importantes comprendidos en la selección de los procesos.

Características y propiedades de los materiales de las piezas de trabajo. Algunos materiales se pueden procesar a temperatura ambiente, mientras que otros requieren temperaturas elevadas (y de ahí la necesidad de hornos, herramental apropiado y diferentes controles). Algunos metales se pueden trabajar con facilidad debido a que son suaves y dúctiles. Otros (que son duros, frágiles y abrasivos) exigen técnicas especiales de procesamiento y herramentales y materiales particulares.

Los materiales tienen diferentes características de manufactura, como capacidad para fundirse, capacidad para forjarse, capacidad de trabajo, maquinabilidad y soldabilidad. Pocos materiales poseen características favorables en todas estas categorías importantes. Por ejemplo, un material que se puede fundir o forjar tal vez presente dificultades posteriores en el maquinado, rectificado u operaciones de acabado que se puedan requerir para obtener un acabado superficial, una precisión dimensional y una calidad aceptables.

Los materiales también tienen diferentes respuestas a la velocidad de deformación (sensibilidad a la velocidad de deformación) a la que se someten. Por ende, la velocidad a la que funciona una máquina afectará la calidad del producto, incluyendo el desarrollo de defectos externos e internos. Por ejemplo, la extrusión por impacto o el forjado por gravedad pueden no ser apropiados para materiales con una alta sensibilidad a la velocidad de deformación, mientras que se comportarán bien en una prensa hidráulica o en la extrusión directa.

Rasgos geométricos de la parte. Los rasgos de las partes, como forma, tamaño, espesor, tolerancias dimensionales y requerimientos de acabado superficial, influyen en gran medida en la selección de un proceso o procesos, como hemos indicado a lo largo de este capítulo y en los otros capítulos de este libro.

Capacidad y cantidad de producción. Estos requerimientos dictan la selección del proceso mediante la productividad de un proceso, una máquina o un sistema, como hemos descrito a lo largo de este libro.

Consideraciones en la selección de procesos. En las siguientes preguntas podemos resumir los factores comprendidos en la selección de procesos.

- ¿Tiene que manufacturarse en la planta cada componente del producto? ¿Algunas de las partes se encuentran disponibles comercialmente como artículos estándar?

TABLA 40.8

Características generales de los procesos de manufactura para diferentes metales y aleaciones

	Aceros al carbono	Aceros aleados	Aceros inoxidables	Aceros para herramentales y matrices o dados	Aleaciones de aluminio	Aleaciones de magnecio	Aleaciones de cobre	Aleaciones de niquel	Aleaciones de titanio	Aleaciones refractarias
Fundición										
En arena	A	A	A	B	A	A	A	A	B	A
En yeso	—	—	—	—	A	A	A	—	—	—
Cerámico	A	A	A	A	B	B	A	A	B	A
De revestimiento	A	A	A	—	A	B	A	A	A	A
Permanente	B	B	—	—	A	A	A	—	—	—
En matriz o dado	—	—	—	—	A	A	A	—	—	—
Forja										
En caliente	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Extrusión										
En caliente	A	A	A	B	A	A	A	A	A	A
En frío	A	B	A	—	A	—	A	B	—	—
Por impacto	—	—	—	—	A	A	A	—	—	—
Laminado	A	A	A	—	A	A	A	A	A	B
Metalurgia de polvos	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Formado de lámina metálica	A	A	A	—	A	A	A	A	A	A
Maquinado	A	A	A	—	A	A	A	B	A	B
Químico	A	B	A	B	A	A	A	B	B	B
ECM	—	A	B	A	—	—	B	A	A	A
EDM	—	B	B	A	B	—	B	B	B	A
Rectificado	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Soldadura	A	A	A	—	A	A	A	A	A	A

Nota: En general, se procesan mediante este método: A; se pueden procesar mediante este método, pero pueden presentar algunas dificultades: B; comúnmente no se procesan por medio de este método:— La calidad y productividad del producto depende en gran medida de las técnicas y equipos utilizados, la habilidad del operario y el control apropiado de las variables de procesamiento.

- ¿Está disponible en la planta el herramental requerido? ¿Se puede comprar como artículo estándar?
- ¿Se puede implantar la tecnología de grupos para partes con atributos similares de geometría y manufactura?
- ¿Se han investigado todos los procesos alternativos de manufactura?
- ¿Son económicos los métodos seleccionados para el tipo de material, la forma de la parte a producir y la capacidad requerida de producción?
- ¿Se pueden cumplir consistentemente los requisitos de tolerancias dimensionales, acabado superficial y calidad del producto, o se pueden relajar?
- ¿Se puede producir la parte hasta alcanzar sus dimensiones finales sin requerir procesamiento adicional?
- ¿Se han optimizado todos los parámetros de procesamiento?
- ¿Se genera desperdicio, y si es así, se ha minimizado? ¿Cuál es el valor del desperdicio?
- ¿Se han analizado todas las posibilidades de automatización y de control por computadora para todas las fases del ciclo total de manufactura?
- ¿Se están implantando técnicas de inspección automatizada y de control de calidad, en línea, de manera apropiada?

EJEMPLO 40.5 Selección de procesos para una parte sencilla

Suponga que le piden fabricar la parte sencilla mostrada en la figura 40.6a. Primero, debemos considerar y determinar la función de la parte, los tipos de carga y ambiente a los que se someterá, las tolerancias dimensionales y el acabado superficial especificado, así como la cantidad y capacidad de producción requeridas. Para ahorrar discusiones, supóngase que la parte es redonda, tiene 125 mm (5 pulgadas) de largo y sus diámetros mayor y menor son de 38 mm y 25 mm (1.5 y 1.0 pulgadas), respectivamente. Después supóngase que debido a los requisitos funcionales (como resistencia, rigidez, dureza y resistencia al desgaste y a las temperaturas elevadas) esta parte se debe fabricar con metal.

¿Qué procesos de manufactura elegiría y cómo organizaría las instalaciones de producción para manufacturar un producto de alta calidad y costo competitivo? Recuerde que, hasta donde sea posible, las partes se deben producir hasta su forma final, o cerca de ella (manufactura de forma neta o casi neta), utilizando un método que elimine en gran medida el procesamiento secundario (como maquinado, rectificado y otras operaciones de acabado), reduciendo así el tiempo total de manufactura y el costo. Debido a que es relativamente simple, esta parte se puede manufacturar mediante métodos como (*a*) fundición, o metalurgia de polvos; (*b*) forjado o recalcado; (*c*) extrusión; (*d*) maquinado, o (*e*) uniendo dos piezas separadas.

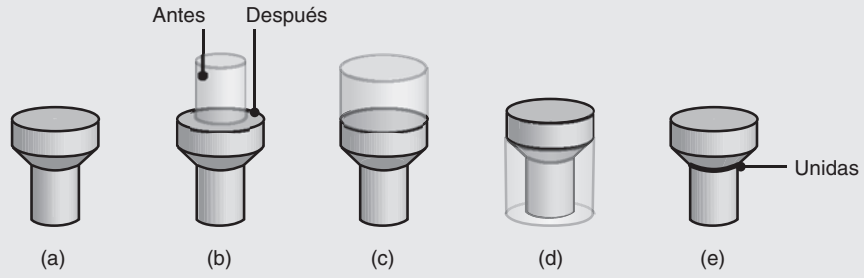


FIGURA 40.6 Diversos métodos de fabricación de una parte sencilla: (*a*) fundición o metalurgia de polvos; (*b*) forjado o recalcado; (*c*) extrusión; (*d*) maquinado, y (*e*) unión de dos piezas.

Para la producción de forma neta, los dos procesos adecuados son la *fundición* y la *metalurgia de polvos*, cada uno con sus propias características, necesidad de herramental específico, habilidad de la mano de obra y sus costos. Esta parte también se puede fabricar mediante el *formado* en frío, en caliente o a temperatura media. Un método es el recalcado (cabeceado) de una barra redonda de 25 mm (1 pulgada) de diámetro, en una matriz adecuada para formar el extremo más grande. Otra posibilidad es la *extrusión* parcial directa de una barra de 38 mm (1.5 pulgadas) de diámetro y reducir su diámetro a 25 mm. Obsérvese que cada uno de estos procesos produce muy poco, o ningún desperdicio de material.

Esta parte también se puede fabricar mediante el *maquinado* de una barra de 38 mm de diámetro para obtener la sección de 25 mm de diámetro. Sin embargo, el maquinado requiere mucho más tiempo que los procesos de formado, e inevitablemente se desperdiciará algún material como virutas metálicas. Por otro lado, el maquinado no requiere herramental especial (a diferencia de los procesos de forma neta para los que suelen necesitarse matrices o dados especiales), y esta operación se puede efectuar con facilidad en un torno común o en un torno CNC. Nótese que esta parte también se puede fabricar como dos piezas separadas y después *unirlas* mediante soldadura, soldadura fuerte o con adhesivos.

Debido a las diferentes operaciones requeridas para producir materias primas, los costos no sólo dependen del tipo de material (lingote, polvo, varilla estirada, extrusión), sino también de su tamaño y forma. Entonces, por unidad de peso, (*a*) las barras cuadradas son más caras que las redondas; (*b*) la placa laminada en frío es más costosa que la placa u hoja laminada en caliente; (*c*) las barras laminadas en caliente son mucho menos costosas que los polvos metálicos del mismo tipo.

Parece que (si sólo se necesitan unas pocas partes) el maquinado es el método más económico. Si los requisitos de cantidad y capacidad de producción son elevados, producir esta parte mediante una operación de cabeceado, o por extrusión en frío (una forma de forja cerrada o forjado en matriz cerrada), sería la opción apropiada. Si las partes superior e inferior de la pieza deben fabricarse con materiales distintos, entonces la unión sería la opción más apropiada.

EJEMPLO 40.6 Manufactura de una parte de lámina metálica mediante métodos diferentes

Formemos una parte sencilla, con forma de plato, a partir de una lámina metálica. Dicha parte se puede formar colocando una pieza plana redonda de lámina metálica entre un par de matrices (dados) macho y hembra, cerrándolas mediante la aplicación de una fuerza vertical en una prensa (fig. 40.7a). Por medio de este método, al que se conoce como *estampado* o *prensado*, se pueden formar partes con alta capacidad de producción.

Ahora supóngase que el tamaño de la parte es muy grande, digamos 2 m (80 pulgadas) de diámetro, y que el tamaño del lote es de sólo 50 partes. Tenemos que reconsiderar la operación total y hacer varias preguntas. ¿Es económico fabricar un juego de dados o matrices de 2 m de diámetro (que serían muy costosas) si la cantidad de producción es tan baja? ¿Existen prensas con la suficiente capacidad para aceptar esas matrices tan grandes? ¿Tiene que fabricarse la parte de una sola pieza? ¿Existen métodos alternativos de manufactura para esta parte?

Solución. Esta parte se puede fabricar *soldando* piezas pequeñas de metal, formadas por otros métodos. Nótese que los grandes tanques municipales de agua y las embarcaciones se fabrican mediante este método. ¿Sería aceptable una parte manufacturada mediante soldadura para los propósitos a los que se destina, en el ambiente en el que se va a utilizar? ¿Tendrá las propiedades requeridas y la forma correcta después de la soldadura, o necesitará procesamiento posterior?

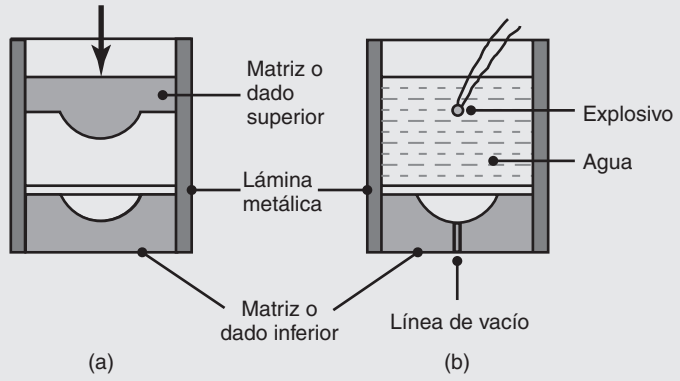


FIGURA 40.7 Dos métodos para fabricar una parte de lámina metálica con forma de plato: *(a)* prensado utilizando una matriz o dado macho y hembra, *(b)* formado por explosión usando sólo una matriz o dado.

Esta parte también se puede fabricar mediante el *formado por explosión*, como se muestra en la figura 40.7b. Sin embargo, debe hacerse notar que la deformación del material en el formado por explosión ocurre a muy alta velocidad. En consecuencia, se tienen que hacer varias preguntas:

a. ¿Es capaz el material de sufrir deformación a velocidades elevadas sin fracturarse o sin efectos dañinos en las propiedades finales de la parte formada?

b. ¿Se pueden mantener las tolerancias dimensionales y el acabado superficial dentro de límites aceptables?

c. ¿La vida de la matriz es lo suficientemente larga bajo las altas presiones transitorias generadas en el formado por explosión?

d. ¿Se puede realizar esta operación en una planta de manufactura dentro de los límites de la ciudad, o debe llevarse a campo abierto?

e. ¿La capacidad de producción es lo suficientemente alta para este tipo de producto?

f. Aunque el formado por explosión tiene la ventaja de requerir sólo una matriz, ¿es económica la operación?

Con base en esta breve discusión, se puede ver que para cada parte o componente de un producto se necesitan métodos similares a fin de llegar a una conclusión acerca de qué proceso es el más adecuado y el más económico para los requerimientos específicos.

40.9 Costos de manufactura y reducción de costos

Para que un producto se venda con éxito, su costo debe ser competitivo con el de productos similares, sobre todo en el mercado global. El costo total de un producto consta de varias categorías, como costos de materiales, de herramental, fijos, variables, de mano de obra directa y de mano de obra indirecta. A manera de lineamiento general para los costos involucrados, téngase en cuenta que hemos incluido secciones sobre la *economía* de los siguientes grupos individuales de procesos y operaciones de manufactura: parte II (fundición); parte III (laminado, forjado, extrusión, estirado, trabajo de láminas metálicas, metalurgia de polvos, cerámicos, procesamiento de polímeros); parte IV (maquinado, procesamiento abrasivo, maquinado avanzado; y parte VI (soldadura y diversos procesos de unión).

Las empresas de manufactura emplean diversos métodos de contabilidad de costos. Dependiendo de la compañía en particular y del tipo de productos fabricados, la metodología de los procesos contables puede ser compleja e incluso controvertida. Además, debido a los muchos factores técnicos y operativos, puede ser difícil y laborioso calcular factores individuales de costo, y no siempre son precisos o confiables.

Es común que los *sistemas de costeo* (también llamados *justificación de costos*) incluyan las siguientes consideraciones: (*a*) beneficios intangibles de mejoras de la calidad y reducción de inventarios; (*b*) costos de ciclo de vida; (*c*) uso de máquinas; (*d*) costo de la compra de maquinaria en comparación con la renta de la misma; (*e*) riesgos financieros comprendidos en la implantación de sistemas altamente automatizados, y (*f*) nuevas tecnologías disponibles y su impacto en los productos.

Además, se han constituido en materia de interés los costos de un fabricante que se atribuyen de manera directa a la *responsabilidad del producto* y defensa por reclamaciones. Hoy en día, cada producto moderno tiene integrado un costo agregado para cubrir las posibles reclamaciones por responsabilidad del producto. Por ejemplo, se ha estimado que (*a*) las demandas por responsabilidad contra los fabricantes de automóviles en Estados Unidos agregan unos $500 dólares al costo indirecto de un vehículo, y (*b*) 20% del precio que pagamos por una escalera se atribuye a costos potenciales por responsabilidad del producto. A continuación describimos los diferentes *factores de costo* más importantes en la manufactura.

Costos de materiales. En diferentes tablas a lo largo de este libro se dan algunos datos sobre costos. Ver también la tabla 40.1.

Costos por herramental. Éstos son costos comprendidos en la fabricación de herramentales, matrices o dados, moldes, modelos y plantillas y soportes fijos especiales requeridos para fabricar un producto. Los altos costos de herramental se pueden justificar en la producción de un gran volumen de un solo artículo. También son consideraciones importantes la vida esperada de los herramentales y matrices y la obsolescencia (debido a los cambios de producto).

El costo del herramental se ve influido en gran medida por el proceso de producción seleccionado. Por ejemplo, (*a*) el costo del herramental para la fundición a presión es mayor que el de la fundición en arena; (*b*) el costo del herramental en el maquinado o en el rectificado es mucho menor que el de la metalurgia de polvos, forjado o extrusión; (*c*) las herramientas de carburo son más costosas que las de acero de alta velocidad, pero su vida es más larga; (*d*) si se va a fabricar una parte mediante rechazado, el costo del herramental para el rechazado convencional es mucho menor que el del rechazado cortante; y (*e*) el herramental para los procesos de formado con hule es menos costoso que el de los juegos de matrices (macho y hembra) utilizados para el embutido profundo y estampado de láminas metálicas.

Costos fijos. Estos costos incluyen la energía eléctrica, combustible, impuesto predial, rentas, seguros y capital (incluyendo depreciación e interés). La compañía debe pagar estos costos sin importar si se ha fabricado o no algún producto en particular. En consecuencia, los costos fijos no son sensibles al volumen de producción.

Costos de capital. Estos costos representan la inversión en edificios, terreno, maquinaria, herramental y equipo. Como se puede ver en la tabla 40.9, el costo de las máquinas y los sistemas puede variar mucho. En vista de los costos generalmente altos de los equipos, en particular los de aquellos que comprenden líneas de transferencia, y celdas y sistemas flexibles de manufactura, las altas capacidades y cantidades de producción son fundamentales para justificar tan grandes gastos y mantener los costos de los productos a un nivel competitivo, o debajo de él. Se pueden lograr menores costos unitarios (costos por pieza) mediante la producción continua, que comprende la operación durante las 24 horas, pero sólo si la demanda lo justifica. También es fundamental el mantenimiento del equipo para asegurar una alta productividad. Cualquier descompostura de la maquinaria que provoque un *tiempo muerto* puede ser muy costosa, hasta de miles de dólares por hora.

Costos de mano de obra directa. Es el costo debido a la mano de obra directa comprendida en la manufactura (*mano de obra productiva*). Este costo incluye toda la mano de obra, desde la primera vez en que se manejan las materias primas hasta el momento en que se termina el producto. En general, a este periodo se le denomina *tiempo de*

TABLA 40.9

Costos relativos para maquinaria y equipo (los costos varían mucho, dependiendo del tamaño, capacidad, opciones y nivel de automatización y de control por computadora. Ver también las secciones de economía en diferentes capítulos).	
Brochadora	M-A
Cabeceadoras	B-M
Celda y sistema de manufactura flexible	A-MA
Centro de maquinado	B -M
Embutido profundo	M-A
Estampado	B-M
Estereolitografía	B-M
Extrusora de polímeros	B-M
Forjado	M-A
Formado con hule	B-M
Formado por estiramiento	M-A
Formado por rodillos	B-M
Fresado	B-M
Fresadora mandrinadora horizontal	M-A
Fundición a presión	M-A
Fundición de arena	B-M
Generación de engranes	B-A
Honeado, lapeado	B-M
Laminado de anillos	M-A
Líneas de transferencia	A-MA
Máquina automática de tornillos	M-A
Maquinado por descarga eléctrica	B-M
Metalurgia de polvos	B-M
Metalurgia de polvos, HIP	M-A
Modelado por deposición por fusión	B
Moldeo por inyección	M-A
Moldeo por inyección de polvos	M-A
Prensa de extrusión	M-A
Prensa mecánica	B-M
Rechazado	B-M
Rectificado	B-A
Robots	B-M
Soldadura por arco de tungsteno y gas	B
Soldadura por haz de electrones	M-A
Soldadura por rayo láser	M-A
Soldadura por resistencia por puntos	B-M
Soldadura ultrasónica	B-M
Taladradora	B-M
Tornos	B-M

Nota: B: Bajo; M: Medio; A: Alto; MA: Muy alto

piso a piso. Por ejemplo, el operario de una máquina toma una barra redonda de un depósito, la maquina para darle la forma de una varilla roscada y la coloca en otro depósito. El costo de mano de obra directa se calcula multiplicando la tarifa de la mano de obra (sueldo por hora, incluyendo prestaciones) por el tiempo que emplea el trabajador para producir la parte.

El tiempo requerido para producir una parte en particular depende no sólo de su tamaño, forma y precisión dimensional, sino también del material de la pieza de trabajo. Por ejemplo, las velocidades de corte para las aleaciones de alta temperatura son menores que para el aluminio o los aceros al carbono. En consecuencia, el costo del maquinado de materiales aeroespaciales es mucho mayor que el del maquinado de aleaciones más comunes, como las de aluminio y acero.

Los costos de mano de obra en manufactura y ensamble varía mucho de un país a otro (ver tabla I.4 en la Introducción General). No es de sorprender que muchos productos

que se compran en la actualidad, desde ropa hasta juguetes y productos de alta tecnología, se fabriquen o ensamblen en países donde los costos de mano de obra son menores. Por otro lado, las firmas localizadas en países con tarifas elevadas de mano de obra tienden a enfatizar las tareas de manufactura de alto valor agregado o de alto nivel de automatización, por lo que el componente de mano de obra del costo se reduce de manera significativa. Por ejemplo, el costo de mano de obra asociado con algunos productos manufacturados en Estados Unidos representa sólo 5% del costo total del producto.

En las industrias intensivas en mano de obra, muchos fabricantes han intentado cambiar las actividades de manufactura a países con menores tarifas de mano de obra. Sin embargo, aunque en algunas ocasiones esto es financieramente atractivo, con frecuencia no se materializan los ahorros de costos previstos. Algunos de los costos ocultos asociados con la proveeduría de terceros (*outsourcing*) son los siguientes:

- El embarque internacional es mucho más complicado y laborioso que el embarque doméstico. Por ejemplo, se requieren de cuatro a seis semanas para que un barco de contenedores lleve productos de China a Estados Unidos o a Europa, y este tiempo sigue aumentando conforme continúan desarrollándose cuestiones de seguridad en el país de origen.
- Debido a los largos tiempos de embarque, no se pueden ejecutar los métodos de manufactura justo a tiempo y sus ahorros de costo asociados (ver sección 39.5). De igual manera, por los largos tiempos de entrega, los programas son rígidos, las modificaciones de diseño no se pueden efectuar con facilidad y las compañías tampoco pueden abordar con rapidez los cambios en el mercado o en la demanda. Por lo tanto, las empresas que adquieren productos de terceros tienden a perder agilidad y tienen dificultades para seguir los métodos de manufactura esbelta.
- En los países con menores tarifas de mano de obra no se han establecido sistemas legales suficientes. Los procedimientos que son comunes en Estados Unidos o en Europa, como las auditorias de costo, la protección de diseños patentados y de la propiedad intelectual, y la resolución de conflictos, son más difíciles de poner en práctica, o de obtener, en otros países.
- Con frecuencia se espera que los pagos se basen en unidades terminadas; los índices de defectos de los productos pueden ser importantes, de ahí que las partes requieran trabajo adicional cuando se reciben.
- Existen numerosos costos ocultos, como grandes cantidades de papeleo y documentación, menor productividad de los empleados existentes debido a un empeño menor y a las dificultades de comunicación.

La proveeduría de terceros ha sido un aspecto de atención importante, de manera notable en los medios de comunicación populares. Sin duda, continuará siendo una preocupación esencial. Los bajos costos de mano de obra (como los de China, India, México y los países de la Cuenca del Pacífico) se pueden contrarrestar efectivamente en el oeste de Estados Unidos y en Japón mejorando la productividad, reduciendo el componente de mano de obra de los productos y mejorando aún más la eficiencia de las operaciones de manufactura. La justificación económica para la proveeduría de terceros es compleja y controvertida, y se encuentra fuera del alcance de este libro. Algunos textos en la bibliografía de este capítulo pueden ser útiles para obtener una perspectiva apropiada del tema.

Costos de mano de obra indirecta. Estos costos se generan al dar servicio a toda la operación de manufactura y consisten en actividades como la supervisión, reparación, mantenimiento, control de calidad, ingeniería, investigación y ventas; también incluyen el costo del personal administrativo. Debido a que no contribuyen en forma directa sobre la producción de las partes terminadas, o no se pueden cargar a un producto específico, a estos costos se les conoce como **generales** y se cargan de manera proporcional a todos los productos. El personal comprendido en estas actividades se clasifica como **mano de obra no productiva**.

Costos de manufactura y cantidad de producción. Uno de los factores más significativos en los costos de manufactura es la cantidad de producción. Obviamente, las grandes cantidades de producción requieren altas capacidades de producción. Éstas, a su vez, exigen el uso de técnicas de producción masiva que comprenden maquinaria especial (*maquinaria dedicada*) y emplean proporcionalmente menos mano de obra directa, al igual que las plantas que trabajan en dos o tres turnos. En el otro extremo, las cantidades menores de producción significan una injerencia mayor de mano de obra directa.

Por lo común, la *producción de lotes pequeños* se realiza en máquinas de propósito general, como tornos, fresadoras y prensas hidráulicas. El equipo es versátil y se pueden producir partes con diferentes formas y tamaños mediante cambios apropiados en el herramental. Sin embargo, los costos de mano de obra directa son altos debido a que por lo general para la operación de estas máquinas se requiere mano de obra calificada.

Para cantidades mayores (*producción de lotes de capacidad medios*), estas mismas máquinas de propósito general se pueden equipar con diferentes plantillas y soportes fijos, o se pueden controlar mediante computadoras. Para reducir aún más los costos de mano de obra, una alternativa importante son los centros de maquinado y los sistemas flexibles de manufactura. En general, para cantidades de 100,000 o más, las máquinas se diseñan para propósitos específicos y realizan una variedad de operaciones específicas con muy poca mano de obra directa.

Reducción de costos. La reducción de costos requiere un estudio sobre la forma en que se interrelacionan los costos ya descritos, utilizando los *costos relativos* como un parámetro importante. Como hemos visto, el costo unitario de un producto puede variar en forma amplia. Por ejemplo, algunas partes se pueden fabricar con materiales costosos, pero necesitar muy poco procesamiento, como el caso de las monedas acuñadas con oro. En consecuencia, el costo de los materiales en relación con la mano de obra directa es elevado.

Por el contrario, algunos productos pueden requerir varios pasos de producción complejos y costosos para procesar materiales relativamente baratos, como el caso de los aceros al carbono. Por ejemplo, un motor eléctrico se fabrica con materiales un tanto baratos; no obstante, la fabricación de la caja, el rotor, los rodamientos, escobillas y otros componentes comprende varias operaciones diferentes de manufactura. A menos que estén altamente automatizadas, las operaciones de ensamble de dichos productos se pueden convertir en una parte significativa del costo total.

Hoy en día, un desglose característico aproximado de los costos de manufactura, es el siguiente:

Diseño	5%
Materiales	50%
Mano de obra directa	15%
Gastos indirectos	30%

En la década de 1960, la mano de obra representaba hasta 40% del costo de producción. Hoy, puede ser tan sólo de 5%, dependiendo del tipo de producto y del nivel de automatización. Obsérvese en el desglose anterior la muy pequeña contribución de la fase de diseño, aunque tiene la mayor influencia en la *calidad* y en el *éxito* de un producto en el mercado. Se pueden lograr reducciones de costo mediante un análisis profundo de todos los costos en los que se incurre en cada fase durante la manufactura de un producto. Los métodos empleados se describen con detalle en algunas de las referencias comprendidas en la bibliografía al final de este capítulo.

En varios capítulos a lo largo de este libro hemos enfatizado las oportunidades para la reducción de costos. Entre éstas se encuentran las siguientes:

- Simplificar el diseño de la parte y el número de subensambles requeridos.
- Especificar tolerancias dimensionales más amplias y permitir un acabado superficial más burdo.
- Utilizar materiales menos costosos.
- Investigar métodos de manufactura alternativos.
- Utilizar máquinas y equipos más eficientes.

La introducción de más sistemas automatizados y de tecnología actualizada en una instalación de manufactura es un medio obvio para reducir algunos tipos de costos. Sin embargo, se debe asumir esta estrategia con el debido cuidado y sólo después de un profundo **análisis de costo-beneficio**, que requiere la alimentación confiable de datos y la consideración de los factores técnicos y humanos involucrados. Se pueden implantar tecnologías avanzadas (que pueden ser muy costosas) sólo después de un análisis completo de los factores más obvios de costo, conocido como **rendimiento sobre inversión** (ROI, por sus siglas en inglés).

Sin duda habrá notado que (para un periodo) los precios de algunos productos (como calculadoras, computadoras y relojes digitales) han disminuido mucho, mientras que los precios de otros artículos (como casas y libros) se han incrementado. Estas tendencias son en parte el resultado del inevitable impacto de la maquinaria y operaciones controladas por computadora en todos los aspectos del diseño y la manufactura de un producto. También son el resultado de los cambios en los costos de diversos componentes a lo largo del tiempo, incluyendo los de mano de obra, maquinaria, competencia doméstica o nacional e internacional, y tendencias económicas mundiales (como oferta y demanda, tasas de cambio de divisas y aranceles).

40.9.1 Análisis del valor

La manufactura agrega *valor* a los materiales al convertirlos en productos discretos y venderlos. Debido a que este valor se agrega en etapas individuales durante la creación de un producto, es importante la utilización del análisis del valor (también llamado *ingeniería de valores*, *control de valores* y *administración de valores*). El *análisis del valor* es un sistema que evalúa cada paso en el diseño, materiales, procesos y operaciones necesarias para manufacturar un producto que realiza todas las funciones para las que fue creado, y que lo hace al menor costo posible. A lo largo de este capítulo hemos descrito las consideraciones importantes en cada paso del análisis del valor.

Se establece un valor monetario para cada uno de dos atributos del producto: (*a*) el **valor de uso**, que refleja las funciones del producto, y (*b*) el **valor de estima**, o **de prestigio**, que refleja el atractivo del producto que hace que su posesión sea deseable. Entonces, el *valor de un producto* se define como:

$$\text{Valor} = \frac{\text{Función y desempeño del producto}}{\text{Costo del producto}} \tag{40.1}$$

Por ende, la meta del análisis del valor es obtener el máximo desempeño por costo unitario. En general, el análisis del valor consiste en las siguientes seis fases:

1. *Fase de información:* para reunir datos y determinar costos.
2. *Fase de análisis:* para definir funciones e identificar áreas de problemas, así como de oportunidades.
3. *Fase de creatividad:* para buscar ideas a fin de responder a los problemas y oportunidades, sin juzgar el valor de estas ideas.
4. *Fase de evaluación:* para seleccionar las ideas a desarrollar e identificar los costos implícitos.
5. *Fase de implantación:* para presentar hechos, costos y valores a la gerencia de la compañía; para desarrollar un plan y motivar la acción positiva, todo esto a fin de obtener un compromiso de los recursos necesarios para acometer la tarea.
6. *Fase de revisión:* en la que se examina todo el proceso de análisis del valor y se realizan los ajustes necesarios.

El análisis del valor es una actividad interdisciplinaria importante y que engloba todo. Es común que la coordine un ingeniero de valores, y que la efectúen diseñadores, ingenieros, control de calidad, compras, personal de ventas y gerentes de manera conjunta. Para que sea efectivo un análisis del valor, debe contar con el apoyo total de la alta gerencia de la compañía. La implantación del análisis del valor en la manufactura produce beneficios como: (*a*) reducción significativa de los costos; (*b*) disminución de los tiempos de

entrega; (*c*) mejor calidad y desempeño del producto; (*d*) reducción del tiempo de manufactura del producto, y (*e*) disminución del tamaño y peso del producto.

Un ejemplo de la reducción de peso de un producto es el desarrollo del sistema de frenado antibloqueo (ABS, por sus siglas en inglés) para aplicaciones automotrices. En 1989, el peso característico de un ABS de la marca Bosch era de 6.2 kg (13.6 libras). En 2001, su peso era de 1.8 kg (4 libras), lo que representaba una reducción de 70%, que también ayudó a reducir el peso del automóvil. Obsérvese que, ya que el peso se relaciona con el volumen del producto, y considerando su función, reducir el tamaño indica que aumenta la relación de área de superficie a volumen. En consecuencia, las características (como acabado superficial e integridad superficial) se vuelven importantes respecto de sus posibles efectos en el desempeño del producto.

ESTUDIO DE CASO 40.1 Ingeniería concurrente para contenedores de solución intravenosa

Baxter Healthcare manufactura más de un millón de contenedores de solución intravenosa (tipo IV) cada día en Estados Unidos, suministrando terapias críticas en la industria del cuidado de la salud. Reconociendo que las vidas de los pacientes dependen de la entrega segura de soluciones médicas, la introducción de productos nuevos o mejorados está altamente regulada por las normas internas de la compañía y las entidades externas gubernamentales.

Un proceso de desarrollo de productos bien definido proporciona el marco de trabajo para satisfacer consistentemente los requisitos regulados de calidad, confiabilidad y diseño de manufactura. Lo más importante es que un ambiente de ingeniería concurrente agiliza el proceso de desarrollo para minimizar el costo de desarrollo y tiempo de colocación en el mercado.

En la década de 1990, la compañía concentró sus esfuerzos de desarrollo en un nuevo grupo de materiales para contenedores flexibles tipo IV. Se esperaba que el sistema contenedor que se estaba desarrollando fuera más amigable con el ambiente, compatible con una mayor variedad de nuevos medicamentos críticos para la atención médica, excediera todos los requisitos de calidad y se mantuviera con un costo efectivo. Algunos de los aspectos clave de diseño mostrados en la tabla 40.10 permitirían que el producto fuera seguro para los pacientes y mantuviera su viabilidad económica.

El equipo matriz

Debido a la gran cantidad de requerimientos, Baxter formó un equipo multifuncional de más de 25 personas. Como indicaban los requisitos y las metas, los miembros de los equipos de ventas, manufactura y desarrollo trabajaron codo a codo con los especialistas en ciencia de materiales, asuntos reglamentarios, asuntos clínicos, toxicología, estabilidad química y aseguramiento de la esterilidad. Los miembros del equipo del producto reconocieron su responsabilidad en el éxito o fracaso de los esfuerzos de diseño del producto.

El equipo activo

Todos los miembros del equipo contribuyeron a definir los requerimientos maestros durante la fase de conceptualización del producto. Todos guiaron y comunicaron las actividades de prueba y desarrollo dentro de sus respectivos campos a todo el equipo durante la fase de desarrollo. Todas las disciplinas ofrecieron y aceptaron la crítica de la revisión de sus colegas para los diseños del producto o del proceso en los pasos importantes de desarrollo. Todos se aseguraron de que los diseños del producto, los métodos de evaluación de calidad y las técnicas de fabricación se transfirieran de manera eficiente a las plantas designadas durante la fase de implantación. El equipo del producto evitó las costosas iteraciones de diseño y revisiones y minimizó la duplicación de esfuerzos manteniendo un equipo activo, matricial, a lo largo del proceso.

TABLA 40.10

Aspectos de diseño para contenedores de solución intravenosa

Requisitos de producto del contenedor	Requisitos de producto del contenedor
Proporcionar vida física y química de anaquel de hasta varios años sin comprometer la solución.	Implantar el producto nuevo con el equipo y el personal de planta existente
Permitir la edición y mezcla de diversas soluciones de drogas o medicamentos en el hospital o en farmacias alternas	Permitir la manufactura del producto a capacidades de hasta un millón al día, sin celdas adicionales de producción.
Proporcionar una superficie para imprimir etiquetas a prueba de borrado, desprendimiento o manchado.	Mantener la producción a más de 60 contenedores por minuto por máquina.
Proporcionar una superficie para la adhesión de diversas etiquetas sensibles a la presión a temperatura ambiente, refrigerada y elevada.	Mantener las velocidades de impresión y llenado a más de 120 por minuto.
Soportar la presurización cuando se coloca un dispositivo de infusión (cinturón) en el contenedor para controlar la dosificación de solución al paciente.	Soportar las temperaturas, presiones y tiempos de esterilización.
Mantener la compatibilidad con los dispositivos de manejo y de dosificación.	Permitir el empaque en cajas que proporcionen la mayor densidad de carga en tarima (pallet).
	Soportar el embarque aéreo y terrestre y a través de climas extremos, en áreas tan diversas como Arizona y Alaska.

El equipo virtual

Muchos miembros del equipo laboraban en plantas de manufactura o en centros de desarrollo a lo largo de la zona norte de Illinois y en el resto de Estados Unidos. Por necesidad, las juntas del equipo promovieron la utilización de los recursos de teleconferencia y videoconferencia, que también minimizaron los gastos de viaje. El acceso al correo electrónico proporcionó la comunicación rápida y amplia de los asuntos y resoluciones pendientes. Se desarrolló una red interna (*intranet*) para toda la compañía a fin de compartir documentos e impresiones de diseño, lo que aseguró que todas las locaciones usaran los avances sobre proyectos más recientes. El equipo personalizó las tecnologías emergentes de comunicaciones a fin de promover el desarrollo concurrente de nuevos materiales, procesamiento y tecnologías de fabricación.

Artículos terminados

El esfuerzo de ingeniería de los equipos matriz, activo y virtual produjo la presentación de un producto en tres años. Se desarrollaron nuevos materiales y componentes que cumplían todos los requisitos del producto y del proceso, y que finalmente satisficieron las necesidades de los pacientes. El nuevo producto era transparente, y los profesionales en el cuidado de la salud continuaron utilizando su experiencia y sus técnicas largamente aplicadas. Se optimizó la disposición del producto; ahora se podía disponer de los materiales con seguridad o podían reciclarse. Se mantuvo una alta confiabilidad y satisfacción del usuario. Los nuevos materiales eran compatibles con un amplio arreglo de formatos de fármacos empacadas en los contenedores tipo IV. De hecho, el éxito del equipo será medido por en número de productos adicionales introducidos en los siguientes años.

Fuente: Cortesía de K. Anderson, Baxter Healthcare Corporation, y S. Petronis, Zimmer Inc. (antes de Baxter Healthcare Corporation).

RESUMEN

- Independientemente de cuán bien cumpla un producto sus especificaciones de diseño y normas de calidad, también debe satisfacer criterios económicos para poder ser competitivo en el mercado doméstico y global. Se han establecido lineamientos a fin de diseñar productos para la producción económica.
- Los factores que deben considerarse en el diseño y la manufactura de los productos incluyen las características de los materiales, la expectativa de vida del producto y la ingeniería del ciclo de vida.
- La sustitución de materiales, la modificación del diseño del producto y el relajamiento de los requisitos de tolerancia dimensional y acabado superficial son métodos importantes para reducir costos.
- El costo total de un producto incluye varios elementos, como el costo de los materiales, herramental, mano de obra y costos indirectos. Los costos de los materiales se pueden reducir mediante la selección cuidadosa, sin comprometer el diseño y los requisitos de servicio, las funciones, las especificaciones y las normas para obtener una buena calidad del producto.
- En general, los costos de mano de obra se están convirtiendo en un porcentaje cada vez menor de los costos de producción, pero para contrarrestar los sueldos menores de otros países, se pueden reducir más mediante operaciones de manufactura altamente automatizadas y controladas por computadora.

TÉRMINOS CLAVE

Análisis costo-beneficio
Análisis del valor
Bases de datos inteligentes
Cantidad de producción
Cantidad económica de orden
Capacidad de producción
Capacidades de proceso
Costos de capital
Costos fijos
Costos relativos
Desperdicio
Gastos indirectos
Justificación de costo
Mano de obra directa
Mano de obra indirecta
Mano de obra no productiva
Máquinas dedicadas
Proveeduría de terceros (Outsourcing)
Reducción de costos
Rendimiento sobre inversión
Tiempo de entrega
Tiempo muerto
Tiempo piso a piso
Valor

BIBLIOGRAFÍA

Anderson, D. M., *Design for Manufacturability, Optimizing Cost, Quality, and Time-to-Market*, 2a. ed. CIM Press, 2001.

Ashby, M. F., *Materials Selection in Mechanical Design*, 2a. ed., Pergamon, 1999.

ASM Handbook, Vol. 20: *Materials Selection and Design*, ASM International, 1997.

Baxter, M., *Product Design: A Practical Guide to Systematic Methods of New Product Development*, Chapman & Hall, 1995.

Benhabib, B., *Manufacturing: Design, Production, Automation, and Integration*, Marcel Dekker, 2003.

Billatos, S. y Basaly, N., *Green Technology and Design for the Environment*, Taylor & Francis, 1997.

Boothroyd G., Dewhurst, P. y Knight, W., *Product Design for Manufacture and Assembly*, 2a. ed., Marcel Dekker, 2001.

Bralla, J. G., *Design for Manufacturability Handbook*, McGraw-Hill, 1999.

Brown, J., *Value Engineering: A Blueprint*, Industrial Press, 1992.

Cattanach, R. E. (ed.), *The Handbook of Environmentally Conscious Manufacturing*, McGraw-Hill, 1994.

Corbett, J., Donner, M., Maleka, J. y Pym, C., *Design for Manufacture: Strategies, Principles and Techniques*, Addison-Wesley, 1991.

Cosumano, M. S., *Thinking Beyond Lean*, The Free Press, 1998.

Creese, R. C., Adithan, M. y Pabla, B. S., *Estimating and Costing for the Metal Manufacturing Industries*, Marcel Dekker, 1992.

Demaid, A. y DeWit, J. H. W. (eds.), *Case Studies in Manufacturing With Advanced Materials*, Norh-Holland, 1995.

Dettmer, W. H., *Breaking the Constraints to World-Class Performance*, ASQ Quality Press, 1998.

Dieter, G. E., *Engineering Design: A Materials and Processing Approach*, 3a. ed., McGraw-Hill, 1999.

Dieter, G. E.; Kuhn, H. A.; y Semiatin, S. L., *Handbook of Workability and Process Design*, ASM International, 2003.

Erhorn, C. y Stark, J., *Competing by Design: Creating Value and Market Advantage in New Product Development*, Wiley, 1995.

Farag, M. M., *Materials Selection for Engineering Design*, Prentice Hall, 1997.

Fleischer, M. y Liker, J. K., *Concurrent Engineering Effectiveness: Integrating Product Development Across Organizations*, Hanser Gardner, 1997.

Ghosh, A., Miyamoto, Y., Reimanis, I. y Lannutti, J. J., *Functionally Graded Materials: Manufacture, Properties, and Applications*, American Ceramic Society, 1997.

Graedel, T. E. y Allenby, B. R., *Design for Environment,* Prentice Hall, 1997.

Halevi, G., *Restructuring the Manufacturing Process: Applying the Matrix Method,* St. Lucie Press, 1998.

Hartley, J. R. y Okamoto, S., *Concurrent Engineering: Shortening Lead Times, Raising Quality, and Lowering Costs*, Productivity Press, 1998.

Kaufman, J. J. y Sato, Y., *Value Analysis Tear-Down: A New Process for Product Development*, Industrial Press and Society of Manufacturing Engineers, 2004.

Koenig, D. T., *Manufacturing Engineering*, 2a. ed., Taylor and Francis, 1994.

Kusiak, A. (ed.), *Concurrent Engineering: Automation, Tools and Techniques*, Wiley, 1993.

Lesco, J., *Industrial Design: Guide to Materials and Manufacturing,* Van Nostrand Reinhold, 1998.

Magrab, E. B., *Integrated Product and Process Design and Development: The Product Realization Process*, CRC Press, 1997.

Mahoney, R. M., *High-Mix, Low-Volume Manufacturing*, Wiley, 1992.

Mangonon, P. C., *The Principles of Materials Selection for Design*, Prentice Hall, 1999.

Mather, H., *Competitive Manufacturing*, 2a. ed., CRC Press, 1998.

Meyers, F. E., *Motion and Time Study for Lean Manufacturing*, Prentice Hall, 1998.

Miller, J. G., *Benchmarking Global Manufacturing*, Irwin, 1990.

Nevins, J. L. y Whitney, D. E., *Concurrent Design of Products and Processes*, McGraw-Hill, 1989.

Oleson, J. D., *Pathways to Agility: Mass Customization in Action*, Wiley, 1998.

Otto, K. N. y Wood, K. L., *Product Design: Techniques in Reverse Engineering and New Product Development,* Prentice Hall, 2001.

Ostwald, P. R., *Engineering Cost Estimating*, 3a. ed., Prentice Hall, 1992.

Paashuis, V., *The Organization of Integrated Product Development*, Springer, 1997.

Park, R. J., *Value Engineering: A Plan for Invention*, St. Lucie Press, 1999.

Park, S., *Robust Design and Analysis for Quality Engineering*, Chapman & Hall, 1997.

Prasad, B., *Concurrent Engineering Fundamentals*, 2 vols., Prentice Hall, 1995.

Pugh, S., Clausing, D. y Andrade, R. (eds.), *Creating Innovative Products Using Total Design*, Addison-Wesley, 1996.

Pugh, S., *Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering*, Addison-Wesley, 1991.

Ranky, P. G., *An Introduction to Concurrent/Simultaneous Engineering: Methods, Tools, and Case Studies,* CIMWare USA, 1997.

Rhyder, R. F., *Manufacturing Process Design and Optimization*, Marcel Dekker, 1997.

Roosenburg, N. F. M. y Eekels, J., *Product Design: Fundamentals and Methods*, Wiley, 1995.

Shetty, D., *Design for Product Success*, Society of Manufacturing Engineers, 2002.

Shina, S. G. (ed.), *Successful Implementation of Concurrent Engineering Products and Processes*, Wiley, 1997.

Sims, E. R., Jr., *Precision Manufacturing Costing*, Marcel Dekker, 1995.

Stoll, H. W., *Product Design Methods and Practices*, Marcel Dekker, 1999.

Swift, K. G. y Booker, J. D., *Process Selection: From Design to Manufacture*, Wiley, 1997.

Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4a. ed., Vol. 5: *Manufacturing Engineering Management*, Society of Manufacturing Engineers, 1988.

_____, Vol. 6: *Design for Manufacturability,* Society of Manufacturing Engineers, 1992.

_____, Vol. 7: *Continuous Improvement,* Society of Manufacturing Engineers, 1993.

Ulrich, K. T. y Eppinger, S. D., *Product Design and Development*, McGraw-Hill, 1995.

Vollman, T. E., *Manufacturing Planning and Control Systems*, Irwin, 1997.

Walker, J. M. (ed.), *Handbook of Manufacturing Engineering,* Marcel Dekker, 1996.

Wang, B., *Integrated Product, Process, and Enterprise Design*, Chapman & Hall, 1997.

Wenzel, H., Hauschild, M. y Alting, L., *Environmental Assessment of Products,* Vol. 1, Chapman & Hall, 1997.

Wenzel, H. y Hauschild, M., *Environmental Assessment of Products,* Vol. 2, Chapman & Hall, 1997.
Winchell, W. (ed.), *Realistic Cost Estimating for Manufacturing,* 2a. ed., Society of Manufacturing Engineers, 1989.
Woeppel, M., *The Manufacturer's Guide to Implementing the Theory of Constraints,* Sr. Lucie Press, 1999.
Womack, J. P. y Jones, D. T., *Lean Thinking,* Simon & Schuster, 1996.
Wroblewski, A. J. y Vanka, S., *Material Tool: A Selection Guide of Materials and Processes for Designers,* Prentice Hall, 1997.

PREGUNTAS DE REPASO

40.1 Describa las principales consideraciones comprendidas en la selección de materiales para productos.

40.2 ¿Por qué es importante el conocimiento de las formas de materiales disponibles comercialmente?

40.3 ¿Qué se entiende por "propiedades de manufactura" de los materiales? Dé tres ejemplos que demuestren la importancia de esta información.

40.4 ¿Por qué la sustitución de materiales es un aspecto importante de la ingeniería de manufactura? Dé cinco ejemplos de su propia experiencia u observaciones.

40.5 ¿Qué factores comprende la selección de los procesos de manufactura? Explique por qué son importantes.

40.6 ¿Qué significa "capacidades de los procesos de manufactura"? Seleccione cuatro procesos diferentes y específicos de manufactura y describa sus capacidades.

40.7 ¿Es importante la cantidad de producción en la selección del proceso? Explique su respuesta.

40.8 Describa los diferentes costos comprendidos en la manufactura.

40.9 Explique la diferencia entre el costo de mano de obra directa y el costo de mano de obra indirecta.

40.10 Liste las ventajas y desventajas de las actividades de manufactura *"outsourcing"* en los países con bajos costos de mano de obra.

40.11 Diga lo que entiende por los siguientes términos: (a) expectativa de vida; (b) ingeniería de ciclo de vida, y (c) manufactura sustentable.

40.12 ¿Cómo se define el valor? Explique las razones para ello.

40.13 ¿Cuáles son los factores comprendidos en la justificación del costo?

40.14 ¿Cuál es el significado y la importancia del término "rendimiento de inversión"? Explique su respuesta.

PROBLEMAS CUALITATIVOS

40.15 Explique por qué el valor del desperdicio generado en un proceso de manufactura depende del tipo de materiales y procesos involucrados.

40.16 Comente la magnitud e intervalos del desperdicio mostrado en la tabla 40.6 y las razones para ello.

40.17 Describa sus observaciones en relación con la información dada en la tabla 40.5, y las razones para ello.

40.18 Además del tamaño de la máquina, ¿qué factores están comprendidos en los intervalos de precios en cada categoría de máquinas relacionadas en la tabla 40.9?

40.19 Explique cómo se pueden justificar los altos costos de algunas de las máquinas indicadas en la tabla 40.9.

40.20 Con base en los temas cubiertos en este libro, explique las razones de las posiciones relativas de las curvas mostradas en la figura 40.2.

40.21 ¿Qué factores implica la forma de la curva mostrada en la figura 40.4? Explique su respuesta.

40.22 ¿Siempre es deseable comprar material que se encuentre cerca de las dimensiones finales de una parte a manufacturar? Explique por qué y dé algunos ejemplos.

40.23 ¿Qué curso de acción tomaría si el suministro de materias primas seleccionadas para una línea de productos se volviera incierto?

40.24 Describa los problemas potenciales implícitos en la reducción de la cantidad de materiales en los productos. Dé algunos ejemplos.

40.25 Explique las razones por las que existe un fuerte deseo en la industria de poner en práctica la manufactura de forma casi neta.

40.26 Calcule la posición de los siguientes procesos en la figura 40.5: (*a*) rectificado sin centros; (*b*) maquinado electroquímico; (*c*) fresado químico, y (*d*) extrusión.

40.27 En la sección 40.9 existe un desglose de costos en el ambiente actual de manufactura, que sostiene que los costos de diseño sólo contribuyen con 5% del costo total. Explique por qué es razonable esta cifra.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

40.28 Como puede ver, la tabla 40.8 sobre procesos de manufactura sólo incluye metales y sus aleaciones. Con base en la información dada en este libro y en otras fuentes, elabore una tabla similar para los materiales no metálicos, incluyendo cerámicos, plásticos, plásticos reforzados y materiales compósitos con matriz metálica y con matriz cerámica.

40.29 Revise la figura I.4 en la Introducción General y diga lo que piensa en relación con los dos diagramas esquemáticos. ¿Le gustaría hacer alguna modificación, y de ser así, cuál sería?

40.30 A través de los años, numerosos productos de consumo se han vuelto obsoletos (o casi, como los teléfonos de marcación con disco, los sintonizadores de radio analógicos, los tornamesas y los tubos de vacío), mientras que muchos nuevos productos han entrado al mercado. Haga una lista completa de productos obsoletos y una de productos nuevos. Comente las razones de los cambios que observa. Discuta cómo han evolucionado diferentes métodos de manufactura para producir los nuevos productos.

40.31 Diga cómo reduciría cada uno de los costos implícitos en la manufactura de productos.

40.32 Sugiera cómo reducir la dependencia del tiempo de producción en el acabado superficial (mostrado en la fig. 40.5).

40.33 Existe un periodo entre el momento en que se contrata a un empleado y el momento en que termina su capacitación, durante el cual se le paga sueldo y recibe prestaciones, pero no produce. ¿Dónde se colocarían dichos costos entre las categorías dadas en este capítulo?

40.34 Seleccione tres diferentes productos y realice una investigación de los cambios en sus precios en los últimos diez años. Discuta las posibles razones para los cambios.

40.35 En la figura 2.1a se muestra la forma de un espécimen de tensión característico, que tiene sección transversal redonda. Suponiendo que el material de inicio es una varilla redonda y sólo se necesita un espécimen, analice los procesos y la maquinaria mediante los cuales se puede fabricar el espécimen, incluyendo sus ventajas y limitaciones relativas. Describa cómo se puede cambiar el proceso que seleccionó para obtener una producción económica al aumentar el número de especímenes requeridos.

40.36 Diga lo que piensa en relación con la sustitución de latas de aluminio para bebidas por latas de acero.

40.37 En la tabla 40.4 se relacionan varios materiales y sus formas comercialmente disponibles. Póngase en contacto con proveedores de los siguientes materiales, amplíe la lista para incluir (*a*) titanio; (*b*) superaleaciones; (*c*) plomo; (*d*) tungsteno, y (*e*) metales amorfos.

40.38 Seleccione tres diferentes productos que por lo común se encuentran en las casas. Manifieste sus opiniones sobre: (*a*) qué materiales se usaron en cada producto; (*b*) por qué se eligieron; (*c*) cómo se manufacturaron los productos; (*d*) por qué se utilizaron esos procesos en particular.

40.39 Inspeccione los componentes bajo el cofre de su automóvil. Identifique varias partes que se hayan producido en condiciones de forma neta o casi neta. Comente los aspectos de diseño y producción de estas partes, y sobre la forma en la que el fabricante logró obtener la condición de forma casi neta.

40.40 Comente las diferencias (en su caso) entre los diseños, los materiales y los métodos de procesamiento y ensamble utilizados para fabricar productos (como herramientas de mano y escaleras) para uso profesional y para consumo.

40.41 En la figura 23.1 se muestran las capacidades de algunos procesos de maquinado. Inspeccione las diversas formas de las partes producidas y sugiera procesos alternativos de manufactura. Comente las propiedades de los materiales que influirían en sus sugerencias.

40.42 Si las dimensiones de las partes del problema 40.38 fueran: (*a*) dos veces más grandes, o (*b*) cinco veces más grandes, ¿qué tan diferente sería su respuesta? Explique sus repuestas.

40.43 En la figura 6.1 se muestra la sección transversal de un motor de propulsión. Con base en los temas cubiertos en este libro, seleccione cualesquiera tres componentes individuales de dicho motor y describa los materiales y procesos que utilizaría para fabricarlos en cantidades de, digamos 1000. Recuerde que estas partes se deben manufacturar a un costo mínimo, pero deben mantener su calidad, integridad y confiabilidad.

40.44 Discuta las concesiones implícitas al seleccionar entre dos materiales para cada una de las aplicaciones que se relacionan a continuación:

- **a.** *Clips* para papel, de acero o de plástico.
- **b.** Cigüeñales forjados o fundidos.
- **c.** Bielas forjadas o de metalurgia de polvos.
- **d.** Placas para interruptores de luz, de plástico o de lámina metálica.
- **e.** Múltiples de admisión metálicos o de plástico.
- **f.** Tapones de ruedas de lámina metálica o fundidos.
- **g.** Clavos de acero o de cobre.
- **h.** Mangos para martillos, de madera o metálicos.
- **i.** Sillas de jardín de acero o de aluminio.

También discuta las condiciones comunes a las que se someterían estos productos durante su uso normal.

40.45 Discuta el proceso (o procesos) de manufactura adecuado para fabricar los productos relacionados en el problema 40.44. Explique si requerirían operaciones adicionales (como recubrimiento, deposición, tratamiento térmico o acabado). De ser así, haga recomendaciones y dé las razones para ellas.

40.46 Inspeccione algunos productos en su hogar y describa cómo haría para separarlos rápidamente y reciclar sus componentes. Comente su diseño en relación con la facilidad con la que se pueden desensamblar.

40.47 ¿Qué productos conoce que sean difíciles de desensamblar para propósitos de reciclaje?

40.48 Las cajas de conexión del cableado eléctrico se pueden conseguir en lámina metálica galvanizada, o en plástico moldeado por inyección (en colores como blanco o azul). Considerando todas sus diversas características, diga lo que piensa sobre cómo decidiría cuál comprar y explique por qué.

40.49 Discuta los factores que influyen en la elección entre cada uno de los siguientes pares de procesos:

a. Fundición en arena contra fundición a presión de la caja de un motor eléctrico fraccionario.

b. Maquinado contra formado de un engrane grande.

c. Forjado contra la producción de metalurgia de polvos de un engrane.

d. Fundición contra estampado de una sartén de lámina metálica.

e. Fabricación de mobiliario para exteriores de tubos de aluminio contra hierro fundido.

f. Soldadura contra fundición de estructuras de máquinas herramienta.

g. Laminado de roscas contra maquinado de un perno para una aplicación de alta resistencia.

h. Termoformado de un plástico contra moldeo de un termofijo para fabricar un aspa para un ventilador doméstico.

40.50 a 40.58 revise los productos ilustrados a continuación y diga lo que piensa sobre: (*a*) los materiales que se podrían utilizar, su propia selección y las razones para ello; (*b*) los procesos de manufactura y por qué los seleccionaría, y (*c*) con base en su revisión, cualquier cambio de diseño que le gustaría recomendar.

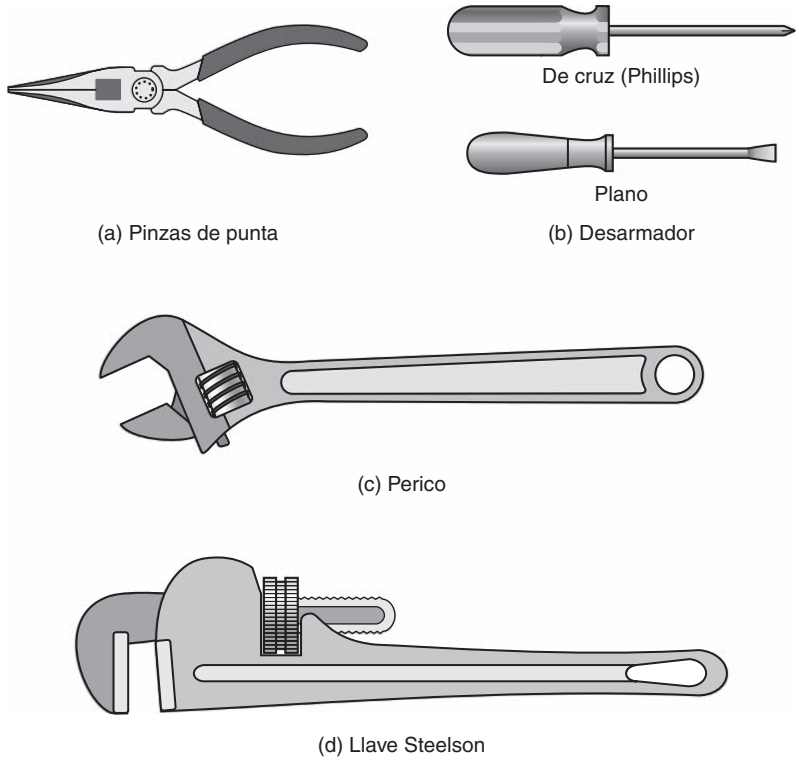
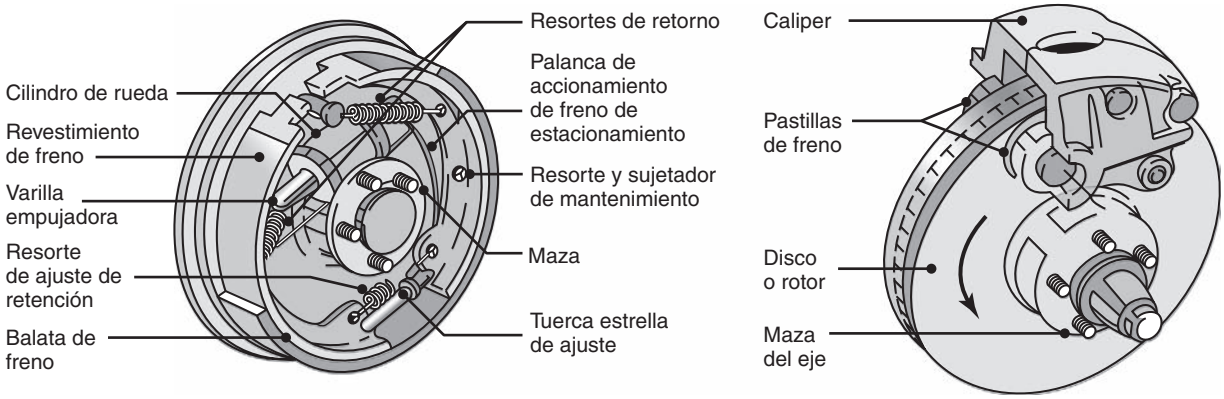


FIGURA P40.50



(a) Rin de acero (b) Rin de rayos (c) Rin de aluminio fundido

FIGURA P40.51



(a) Freno de tambor (b) Freno de disco

FIGURA P40.52

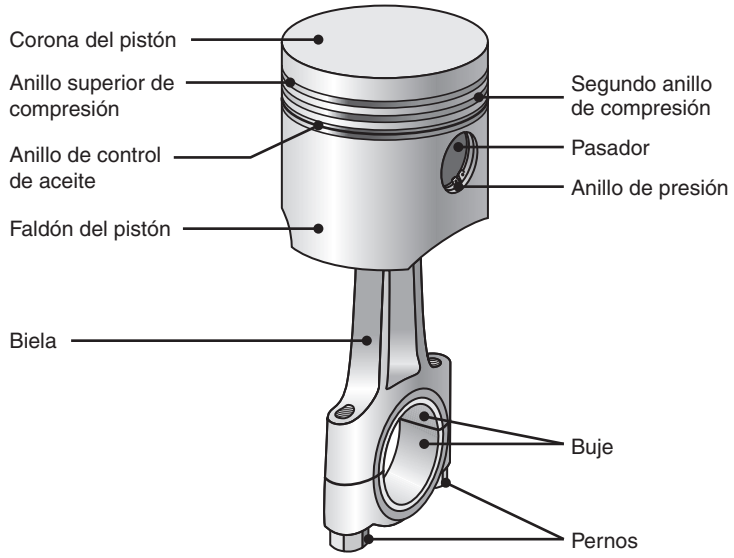
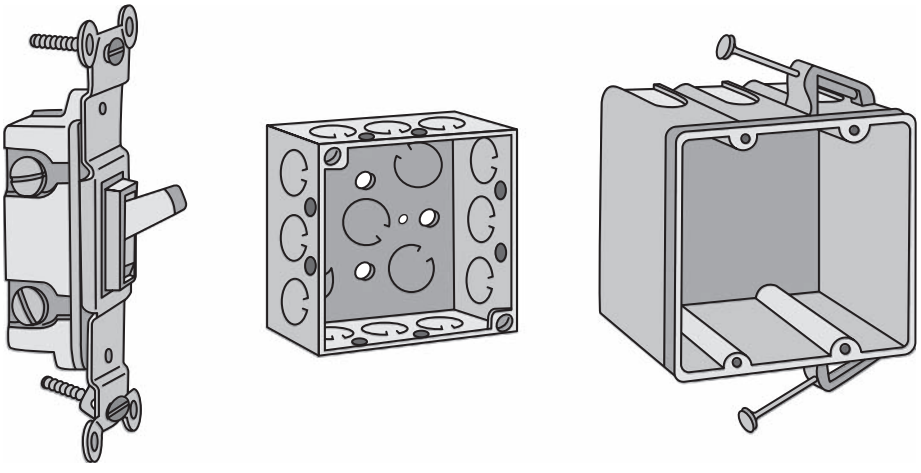
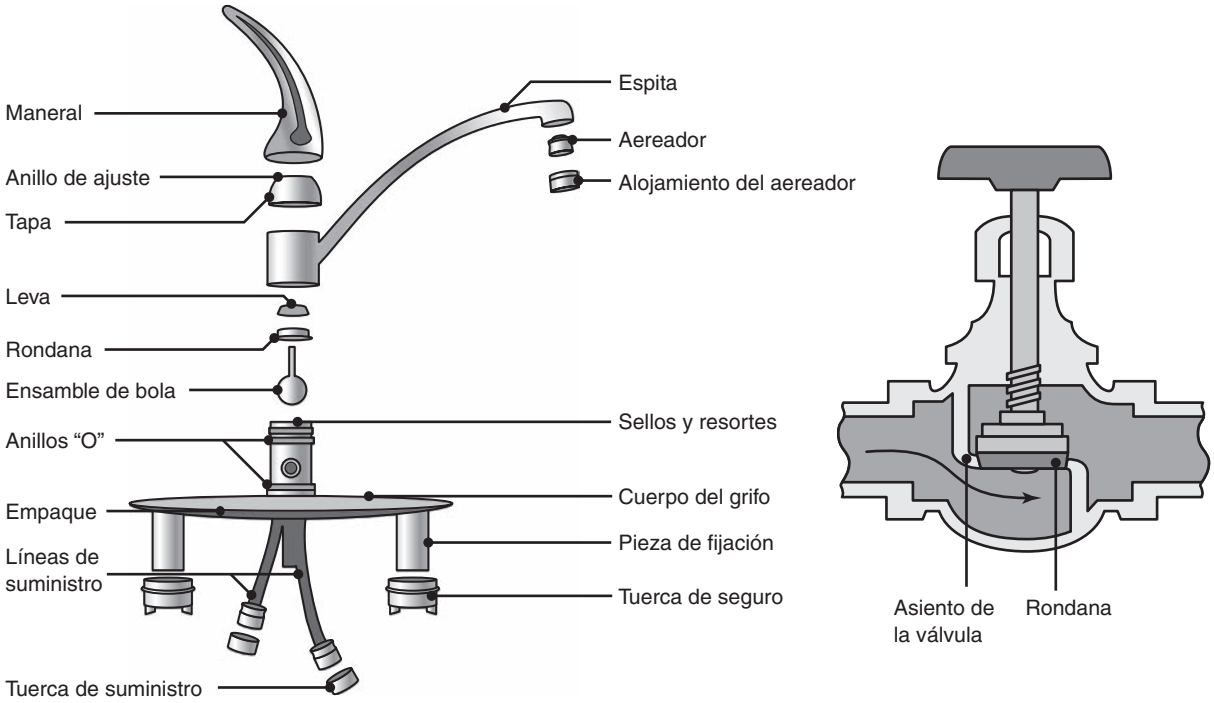


FIGURA P40.53



(a) Interruptor (b) Caja de lámina metálica (c) Caja de plástico

FIGURA P40.54



(a) Grifo tipo bola (Delta) (b) Válvula de globo

FIGURA P40.55

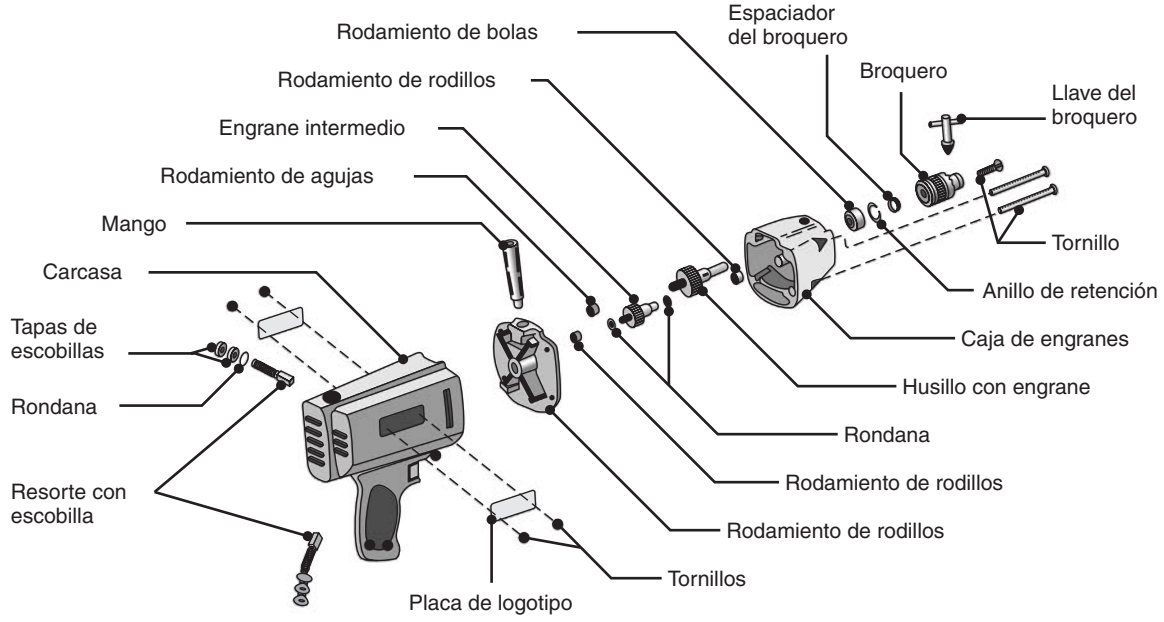


FIGURA P40.56

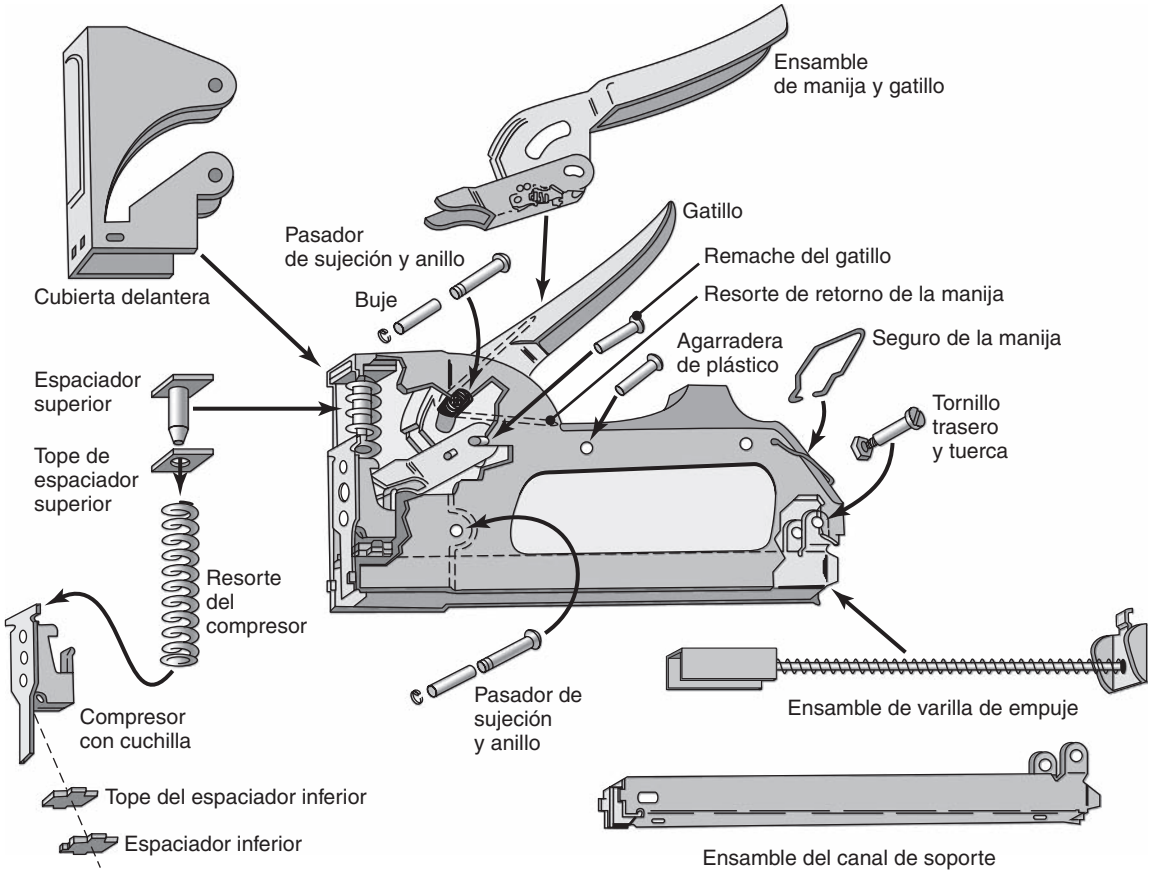


FIGURA P40.57

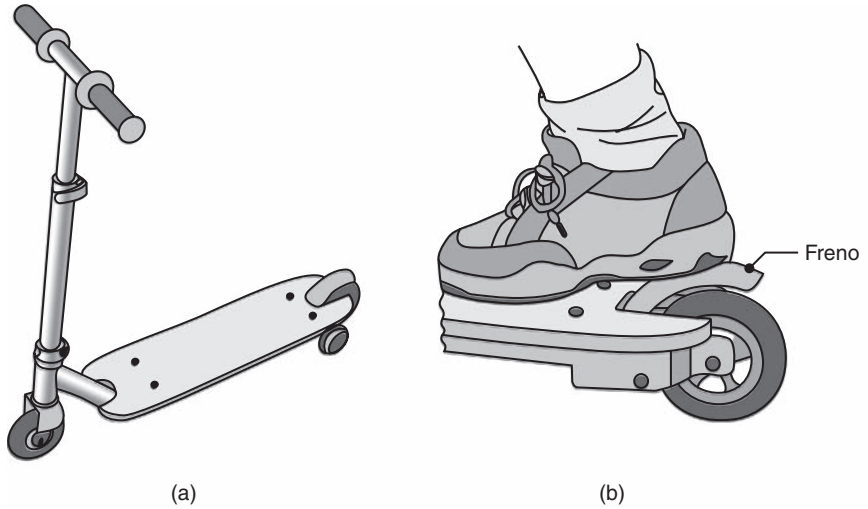


FIGURA P40.58

ÍNDICE

A

Abocinado, hojas metálicas, 449-450
Abombado, hojas metálicas, 450
Abrasivos, 790, 792-793
  convencionales, 792
  definición de, 790
  dureza Knoop para los, 792
  número de grano, 793
  superabrasivos, 792
  tamaño de grano, 793
  tipos de, 793
Abrillantado, 825
Acabado, 21, 24, 294-295, 327, 503, 520, 527-528, 753-755, 820-825, 828-829. *Ver también* Superficies para pintado
  abrillantado, 825
  campos magnéticos, pulido en, 824-825
  cepillos de alambre, 821
  cerámica, 520
  consideraciones de diseño para, 327
  economía de, 828-829
  electropulido, 824
  fundición en arena, 294-295
  honeado o asentado, 821-822
  impregnación, 503
  infiltración, 503
  lapeado, 822-823
  manufactura de engranes, 753-755
  operaciones abrasivas, 820-825, 828-834
  operaciones de rebabeo, 825-828
  procesos, tipos de, para manufactura, 21, 24
  productos de la metalurgia de polvos (P/M), 503
  pulido, 823
  pulido a fuego, 528
  pulido químico-mecánico, 823-824
  recocido, 528
  rectificado banda, 820-821
  superacabado, 822
  vibratorio, 826
  vidrios, 527-528
Acanalado,
  en operaciones de cizallado, 429-431
  hojas metálicas, 446-447
Aceites, uso como lubricantes, 666, 1052
Acero, 116, 123-125, 134, 136, 150-165, 337, 430, 638-640, 652, 771
  al alto carbono, 159
  al bajo carbono, 159
  al carbono, 156-159
  al medio carbono, 159
  aleado, 156-161
  calidad estructural (S), 160
  calmado, 154
  convertidor básico de oxígeno (BOF), 152, 153
  de alta velocidad (HSS), 163-164, 652
  de baja aleación (L), 160
  de baja aleación de alta resistencia (HSLA), 159-160
  de trabajo en caliente (serie H), 164
  denominaciones de, 158
  diagramas de fase para hierro-carburo de hierro, 123-125
  dulce, 159
  efervescente, 145
  elementos en, 157-158, 639-640
  elementos residuales en, 158
  estructuras de las máquinas herramienta, 771
  fase dual (D), 160, 161
  fundición continua, 154-156
  fundición de, 337
  fundición en lingote, 153-154
  herramientas de corte, 652
  horno de vacío, 152
  horno eléctrico, 151-152
  inoxidable, 134, 161-163, 337, 640
  lingotes de acero calmado, 154
  lingotes de acero efervescente, 145
  lingotes de acero semicalmado, 154
  manufactura de acero, 151-153
  maquinabilidad de, 638-640
  maraging, 136
  materias primas para, 150
  metalurgia de olla, 154
  microaleado, 160
  para herramientas y matrices, 163-165
  para trabajo en frío (series A, D y O), 165
  perlita, 124
  producción de, 150-153
  reacción eutectoide, 124
  refinación por inyección, 154
  refinamiento, 154
  reglas, 430
  resistente al impacto (serie S), 165
  resistentes al ambiente (W), 160
  semicalmado, 154
  Sistema Unificado de Numeración (UNS), 158
  solución sólida intersticial, como, 116
  tipo tungsteno (serie T), 163-164
Aceros al carbono, 156-159
  clasificación de, 158-159
  denominaciones, 158-159
  refosforados y resulfurados (serie 12xx), 159
  resulfurados (serie 11xx), 159
  series de refosforados y resulfurados (12xx), 159
  series de resulfurados (11xx), 159
Aceros aleados, 156, 161
  alta resistencia y de baja aleación (HSLA), 159-160
  características de los, 159
  designación de, 158, 160
  grado estructural, 159
  materiales para herramientas, 215
  microaleados, 160
Aceros bifásicos, 160-161
Aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA), 159-160
Aceros de alta velocidad (HSS), 163-164, 652
  al molibdeno (serie M), 163-164, 652
  al tungsteno (serie T), 163-164, 652
  ejemplo de, 652
  herramientas de corte, 652
  para herramientas y matrices, 163-164
Aceros inoxidables, 134, 161-163, 337, 640
  austeníticos (series 200 y 300), 161-162
  características de, 161
  ejemplo de uso de, 163
  endurecimiento por precipitación (PH), 162
  estructura dúplex, 162
  ferríticos (serie 400), 162
  fundición, 337
  maquinabilidad de, 640
  martensíticos (series 400 y 500), 162
  propiedades materiales y aplicaciones de, 162
  tratamiento térmico de, 134
Aceros microaleados, 160
Aceros no aleados, 161
Aceros para herramientas y matrices, 163-165
  aceros de alta velocidad (HSS), 163-164
  características de, 164
  materiales para trabajo de los metales, 165
  para trabajado en caliente (serie H), 164
  para trabajado en frío (series A, D y O), 165
  resistentes al impacto (serie S), 165
  tipo molibdeno (serie M), 163-164
  tipo tungsteno (serie T), 163-164
  tipos de, 163
  uso de, 163
Aceros para trabajo en caliente (serie H), 165
Aceros resistentes al impacto (serie S), 165
Acetales, propiedades de los, 208
Acrílicos, propiedades de los, 208
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), propiedades del, 208
  horizontal, 134-135
Acuñado, 380
Adhesivos, 1014-1017
  características de los, 1015-1016
  definición de, 1014
  eléctricamente conductivos, 1017
  estructurales químicamente reactivos, 1015
  sistemas, 1015-1017
  tipos de, 1015
Aditivos, 207-208, 1053
Administración de la calidad total (TQM), 38, 1113-1119
  círculo de calidad, 1113
  concepto de, 38, 1113
  filosofía de, 1113
  métodos Deming, 1113-1114
  métodos Juran, 1114
  métodos Taguchi, 1114-1119
Afilado de piedras abrasivas, 806-807
Afloramiento de fibras, definición de, 250
Agitación, definición de, 134
Aglutinantes,
  resinoides, 796-797
  uso de, 515
  vitrificados, 796
Agrietamiento
  por calor, 309, 359
  por esfuerzo-corrosión, 94, 96, 110
  por temple, 129
  tenso-ambiental, 205
Aislantes, definidos, 108
Ajustes de contracción, 107
Álabes para turbinas, métodos de fundición, 312-313
Alambre, definición, 402
Aleación mecánica, 487, 488
Aleaciones, 108, 114-148, 149-468, 169-190, 263-265, 271, 308, 332-339, 653 *Ver también* Aleaciones ferrosas;
  de aluminio fundido, 173
  de baja expansión, 108
  de baja fusión, 183-185
  maleables, 170, 172-173, 176, 177, 178, 181
Aleaciones con memoria de forma, 185, 1026
  características y usos de, 185
  dispositivos microelectromecánicos (MEMS), 185
  sujeción mecánica, 1026
Aleaciones ferrosas, 127-134, 149-168, 336-337
  aceración, 151-153
  aceros aleados, 156-161
  aceros inoxidables, 161-163
  aceros para herramientas y matrices, 163-165
  colada continua, 154-156

elementos residuales en aceros, 154
elementos, efectos en acero, 157-158
fundición, 336-337
introducción a, 149-150
lingotes, fundición, 153-154
refinación, 154
templabilidad de, 132-134
tratamiento térmico de, 127-132
Aleantes, 47, 487, 488
Alimentadores, uso en fundición, 267
Alotropismo, definición de, 48
Alquidos, propiedades de, 211
Alto horno, 150-151
Alto valor agregado, definido, 3
Alúmina, características de, 221
Aluminio, 170-174, 332, 640, 793
aleaciones, 172-173
bauxita, 173
características y usos de, 170-172
comercialmente puro, 173
denominación del, 172-173
ejemplo del uso del, 174
fundición de aleaciones base aluminio, 332
maquinabilidad del, 640
óxidos, 793
poroso, 174
producción de, 173
propiedades de, 171, 172
severidad de temple, 173
American National Standards Institute (ANSI), 656, 657
American Society for Testing and Materials (ASTM), 55, 158
Aminas, propiedades de, 211
Amorfos, 186, 199, 232
aleaciones, 186
grafito, 232
polímeros, 199
Amortiguamiento, 772, 776-778
diseño de máquinas herramienta, 772
efectos de, 776
externo, 778
interno, 777
Anclamiento, dislocaciones, 120
Ángulos, 388, 610, 612, 618-619, 678, 1090
de alivio, 610, 678
de ataque, 610, 678
de cizallamiento o del plano cortante, operaciones de corte, 610
de filo de corte, 678
de fricción, 612
de holgura, 610
de inclinación, 618
de operaciones de corte, 610, 618-619
de operaciones de torneado, 678
de salida, 388
de torsión, 78
medición de, 1090
Anisotropía, 57-58, 107, 436, 443, 454-455
cristalográfica, 58
dilatación térmica de, 107
embutibilidad profunda, 454-456
formado de láminas metálicas, 436, 443
grado de, 57
influencia de, 57
normal, 454
normal promedio, 454-455
planar, 455
plástica, 454
Antimonio, efecto del, en los aceros, 158
Apisonado, 292
Aramidas, propiedades de, 210
Arcilla, características de, 1211
Arrabio o hierro cochino, 151
Arsénico, efectos en el acero, 158
portaherramienta 31
Aseguramiento de la calidad, 38-39, 1110-1141, 1242-1244
administración de la calidad total (TQM), 38, 1113-1119
certificación del proceso de calidad, 39
control estadístico de calidad (SQC), 1121-1123
control estadístico de proceso (SPC), 38, 1124-1131
curvas de distribución para, 1122-1123
descripción de los conceptos de, 1112-1113
diseño experimental para, 38
expectativa de vida del producto, 1242-1244
importancia de, 38
ingeniería de los factores humanos y ergonomía, 39
integridad del producto, 38
kaizen, 1111, 1242
métodos Deming, 1113-1114
métodos Juran, 1114
métodos Taguchi, 1114-1119
niveles de defectos, 38
normas para, 39, 1119-1121
responsabilidad del producto, 39
retorno económico por calidad (ROQ), 1243
seis sigma, 38, 1123
tablas de control, 38
Aserrado, 745-748
por fricción, 748
proceso de, 745-747
sierras, tipos de, 747-748
Astillado, herramientas de corte, 634
Astillado de rodillos, definida, 359
Atacantes isotrópicos, 887
Ataque, 885-892
anisotrópico, 887-889
ataques isotrópicos, 887
características de, 885
con plasma reactivo, 890
criogénico seco, 892
dispositivos microelectrónicos, 885-892
ejemplo de, 892
en húmedo, 885, 887-889
en seco, 889-892
físico-químico, 890-891
húmedo, 885, 887-889
plasma reactivo, 890
por chisporroteo, 889-890
seco, 889-892
velocidades de ataque, comparación de, 886
Atomización, 485-487
Átomo intersticial, definición, 52
Ausformado, 141
Austemperizado, 140-141
Austenita, 122-123, 125, 128-129
estructura de, 122-123
formador de, 125
retenida, 129
tratamiento térmico de, 128-129
Austenitizados, definidos, 132
Autoclave, definida, 296
Automatización, 1144-1190
aplicaciones de la, 1150
cantidad de producción y, 1148-1150
consideraciones de diseño para, 1183-1186
consideraciones económicas para, 1186-1187
control adaptable (AC), 1161-1163
control numérico (NC), 1153-1160
controladores lógicos programables (PLC), 1152
definición de, 1146
dura, 1150-1152
ejemplo de, 1175-1176
evolución de, 1147-1148
fijación, 1176-1179
historia de, 1146
implementación de, 1146-1148
introducción a, 1144-1146
manejo de materiales, 1163-1165
mantenimiento productivo total (TPM), 1153
mediante equipo, 1150-1151, 1152
por programas, 1151
procesos de manufactura, 1144-1190
robots industriales, 1165-1171
sistemas de ensamble, 1180-1183
tecnología de los detectores, 1171-1176
uso de, 1146-1147
Azufre, efecto en aceros, 157

B

Babbits, 184
Bainita, 127-128
Banco de estirado, 419
Bandas de Lüders, 355, 436, 437
Barnices, 1075
Barra, definida, 402
Bauxita, 173
Bebedero, proceso de fundición, 267, 269, 290
Benchmarking (comparación entre marcas), definición de, 38
Berilio, 183, 640
Biocerámicos, 229
Biodegradabilidad, definición de, 212
Blenda de zinc, 184
Bolas de Bucky, 233, 1054
Boquilla, uso de, 689
Boro, 157, 243
Borurado, 137, 138
Brazo de intercambio de herramientas, centros de maquinado, 764
Broca helicoidal, 706, 710
Brochado, 742-745, 751
brochas, tipos de, 742-744
consideraciones de diseño para, 745
dientes de engranes, maquinado, 751
ejemplo de, 745
máquinas, 744
parámetros de proceso, 744
perfiles de diente, 734
proceso de, 742
rotativo, 744
terminología para, 742-743, 744
Bronce, 177
fosforado, 177
Bruñido, dientes de engranes, 753-754
Bruñido con rodillo, 1061

C

Cabeceado, 380-381
Cabrestante, uso de, 420
Caja de moldeo, uso en fundición, 290
Cal, producción de hierro y acero que utiliza, 150
Calcio, efecto en los aceros, 157
Calibradores, 1093-1097
de aire, 1095-1096
electrónicos, 1096-1097
fijos, 1094-1095
medición, uso de, en, 1093-1096, 1096-1097
Calor específico, 96-97, 106-107
Cambiador automático de herramientas (ATC), 693, 764
Cambiador automático de pallets o tarima, centros de maquinado, 764
Campos magnéticos, pulido en, 824-825
Canales de alimentación, 267, 290, 328
Cantidad mínima de lubricación (MQL), 669
Capa de vapor, 134
Capacidad de fundición (colabilidad), definida, 271
Capacidad de proceso, definición, 1128
Características geométricas, medición de, 1091-1093
Carbonilos, 487
Carbonitrurado, 137-138
Carbono, 157, 233
aceros, efecto en, 157
espumas, 233
similar al diamante, 233
Carbono similar al diamante (DLC), 233, 1077
Carburizado, 137-138
Carburo de silicio (SC), 223, 793
Carburo de titanio (TiC), 223, 654, 659
Carburo de tungsteno (WC), 223, 653-654
Carburos, 123, 223, 653-657
American National Standards Institute (ANSI), 656, 657
características de, 223
carburo de silicio (SC), 223
carburo de tungsteno (WC), 223, 653-654
clasificación de, 656, 657
gradiente funcional, 654
herramientas de corte, 653, 656
hierro, 123
insertos, 654-656
International Organization for Standardization (ISO), 656, 657
micrograno, 654
sin recubrimiento, 653
Carga dinámica, 87
Cáscara de naranja, 55, 60, 436-437
Celda galvánica, 110
Celda unitaria, ejemplos de, 47-49, 122
Celulosa, 192
Celulósicos, propiedades de, 208, 210
Cementita, 123-126
estructura de, 123
eutectoide, 124
metaestabilidad de, 125-126
proeutectoide, 124
Centrifugado, 310
Centros de maquinado, 760-770
brazo de intercambio de herramientas, 764
cambiador automático de herramientas (ATC), 764
cambiador automático de tarima (pallet), 764
capacidades de, 768
características de, 767-768
centros de torneado, 767
componentes de, 763-765
concepto de, 762-763
de husillo horizontal (HMC), 763, 765, 767
de husillo vertical (VMC), 765-766
ejemplo de, 768-769
envolvente de trabajo, 764
introducción a, 760-761
palpador o sonda de contacto, 764-766
procesos de, 761-762
reconfigurables, 769-770
selección de, 768
tarima (pallet), 763
tipos de, 765-767
universales, 767
Cepillado con alambre, acabado mediante, 821
Cerámicos, 219-229, 231-232, 513-521, 528, 641, 659, 661-663, 771, 1029-1030, 1075-1076
aditivos para partículas, 515
aplicaciones de, 227-229
arcilla, 221
base alúmina, 221, 661-662
base nitruro de silicio, 663
biocerámicos, 229
características de, 222, 514
carburos, 223
cermets, 224, 662
cocción, 519
compósitos de, 224
consideraciones de diseño para, 528
definidos, 220
ejemplos de, 222-223, 228-229, 520-521, 1076
enlace covalente, 220
enlace iónico de, 220
estructura de, 220-224
estructuras de las máquinas herramienta, 771
formado plástico, 516, 518
formado y moldeado de, 514, 521, 528
fundición, 515-516
herramientas de corte, 661-663
industrial, 220
introducción a, 513
maquinabilidad de, 641
materias primas para, 221

moldeado, 514-521
moldeo por inyección, 518-519
nanocerámicos, 224
nanofase, 520
negros, 224
nitruros, 223
operaciones de acabado, 520
operaciones de unión, 1029-1030
óxidos, 221-222
porcelana, 221
prensado, 518-519
prensados en caliente, 224
procesamiento, 513-521, 528
proceso de cuchilla de doctor, 516, 517
propiedades físicas de, 226-227
propiedades mecánicas de, 225-226
propiedades ópticas de, 227
recubrimientos, 659, 1075, 1076
secado, 519
sialón, 223, 663
sílice, 224
sinterización, 519
torneado con plantillas, 518
tradicional, 220
vidriados, 231-232
zirconia, 221-111
Cerámicos vidriados, 231-232, 525
características de, 231
desvitrificación de, 231, 525
manufactura de, 525
procesamiento de, 525
Cerio, efecto en aceros, 157
Cermets, 226, 662
Cianuración, 137-138
Ciclo de vida, 13, 1244-1245
definido, 13, 1244
diseño de producto para, 1244-1246
ejemplo de, 1245-1246
evaluación (LCA), 1245
ingeniería (LCE), 1245
manufactura sostenible, 1245
Cizallamiento, 426-435, 610-611
características de, 426-428
claro, 426, 433
corte por matriz, 429
desperdicio, 431
fuerza de punzonado, 428
matrices, 433-435
matriz de plantilla de acero, 430
operaciones, 429-431
parámetros de procesamiento en, 426
perforado, 430-431
pieza en bruto, 426
punzonado, 429
ranurado, 429-431
troquelado, 429
troquelado fino, 429
virutas de corte, 610-611
Clasificaciones de la American Welding Society (AWS), 937-938
Cloruro de polivinilo (PVC), propiedades de, 211
Cobalto, 157, 640, 653
aleaciones base, maquinabilidad de, 640
efecto en aceros, 157
herramientas de corte de aleación de cobalto fundido, 653
Cobre, 157, 176-178, 332, 640
aleaciones de, 177-178
aleaciones forjadas, 177, 178
berilio, 177
bronce, 177
características y usos de, 176-177
Copper Development Association (CDA), 177
denominación de, 177
efecto en aceros, 157
electrolítico libre de oxígeno, 178
fundición de aleaciones base cobre, 332
fundido, 178
hidrometalurgia, 178
latón, 177
maquinabilidad de, 640
pirometalurgia, 178
producción de, 177-178
propiedades de, 177-178
Cobre-berilio, 177
Codificación, 1211-1215
árbol de decisiones, 1212
códigos múltiples, 1212
jerárquica, 1212
partes, 1211
propósito de, 1211-1212
Sistema KK-3, 1215
Sistema MultiClass, 1213
Sistema Opitz, 1213
sistemas de, 1213-1215
Código G, manufactura NC, 1160
Coeficiente de resistencia, 70, 75
Colada continua, 154-156
barra inicial, 156
distribuidor, 155
fundición de cinta, 155-156
fundición de filamento, 155-156
proceso de, 154-156
rodillos de apriete, 155
Colado de metal fundido, velocidad de, 271
Colorantes, plásticos, 207
Columbio, *ver* Niobio
Compactación, 490-499
comprimido en verde o crudo, 490
definición de, 490
densidad, 491-493
ejemplo de, 496-497
equipo para, 493-494
materiales, troquel y matriz, 499
moldeo por inyección de polvos (PIM), 497
polvos metálicos, de, 490-499
prensado isostático en caliente (HIP) y en frío (CIP), 494-497
rodillo, 497-498
sin presión, 497-498
Competitividad global, 39-41, 41-42
costos de mano de obra, 39-40
costos totales, 40-41
impacto en la manufactura, 39-40
producción económica, principios de diseño, 40
tendencias de organización en la manufactura, 41-42
Comportamiento anisotrópico, 51
Comportamiento elástico lineal, 65
Compósitos, 224, 238-258, 534-536, 562-579, 771. *Ver también* Plásticos reforzados
avanzados, 248
cerámicos, características de, 240, 535
compuesto de moldeo de lámina (SMC), 563-565
compuesto de moldeo grueso (TMC), 565
compuesto de moldeo volumétrico (BMC), 565
consideraciones de diseño para, 572-573
de matriz de cerámica (CMC), 238, 253-254, 571-572
de matriz metálica (MMC), 238, 251-253, 570-571
de matriz polimérica (PMC), 239, 562-570
economía del proceso, 574
ejemplos de, 249-253, 567-568, 570, 571
enrollado de filamento, 568-569
epóxica granítica, 771
estructura de, 239-244
estructuras de las máquinas herramienta, 771
fibras, reforzado, 241-244
formado y moldeado de, 534-536, 562-579
híbridos, 241
introducción a, 238-239, 534-536
material de la matriz, 244
materiales, 238-258
moldeo por bolsa de vacío, 565-566
moldeo por compresión, 565
moldeo por contacto, 566-567
moldeo por transferencia de resinas, 567
moldeo por transferencia/inyección, 567
plástico reforzado con fibra de carbono (CFRP), 242
plástico reforzado con fibra de vidrio (GFRP), 241
plásticos reforzados con fibras (FRP), 239, 563-565
plásticos reforzados, 239-244, 244-251, 562-570
preimpregnados, 563
pulformado, 569
pultrusión, 569
recubrimientos, uso de cómo, 254
tipos de, 240
usos de, 254
Compósitos de matriz cerámica (CMC), 238, 253-254, 570-572, 641
características de, 253-254
definición de, 238
infiltración (o escurrimiento) de lodo, 571
maquinabilidad de, 641
método precursor de polímeros, 572
procesamiento de, 570-572
proceso de síntesis química, 571-572
proceso sol-gel, 571-572
Compósitos de matriz de polímero (PMC), *ver* Plásticos reforzados
Compósitos de matriz metálica (MMC), 238, 251-253, 570-571, 641
aplicaciones de, 252
características de, 251
de matríz de polímero, comparados con, 251
definición, 238
ejemplos de, 252-253, 571
maquinabilidad de, 641
materiales, 252
procesamiento de, 570
procesamiento de dos fases (líquido-sólido), 571
procesamiento de fase líquida, 570-571
procesamiento de fase sólida, 571
Compresión, 76-77
efecto Bauschinger, 77
ensayo, 76-77
ensayo de disco, 77
tamboreo, 77
Compuertas, 267-268, 290, 328
localización y diseño, 328
sistema de alimentación, 267-268
uso de, en fundición, 267, 290
Compuesto de moldeo grueso (TMC), 565
Compuesto para moldeo de hojas (SMC), 563-565
Compuesto para moldeo volumétrico (BMC), 565
Compuestos intermetálicos, 116
Comunicaciones en la manufactura, 1228-1230
herramientas de Internet, 1230
normas para, 1228-1229
protocolo, 1230
red de área extendida (WAN), 1228
red de área local (LAN), 1228
redes de área personal (PAN), 1229
redes inalámbricas de área local (WLAN), 1229
topología para, 1228-1229
Conductividad eléctrica, 108-109, 206
conductores, 108
dopantes, 109
importancia de, 18
polímeros, 206
resistencia dieléctrica, 108
semiconductores, 109
superconductores, 108
unidades de, 108
Conductores, definición de, 108
Confiabilidad del proceso, 1131
Confiabilidad del suministro, 17
Continuidad de masa, ley de, 269
Contracción, 154, 200, 275, 277, 279, 325-326. *Ver también* Porosidad
cavidad, 154, 279
contracción por cristalización, 200
diseño para evitar, 326
evitar cavidades, diseño para, 325, 326
fundición metálica, causas de, 274-275
porosidad provocada por, 277
puntos calientes, 325, 326
tolerancias a la contracción de los fabricantes de modelos, 326
Contramartillos, forja, 392
Control adaptable (AC), 34, 1161-1163
análisis del, 1161
concepto de, 34, 1161
sistema de manufactura, 1161-1163
Control estadístico de calidad (SQC), 1121-1123
curvas de distribución para, 1122-1123
método de atributos, 1122
método de variables, 1122
seis sigma, 38, 1123
terminología de, 1121-1122
Control estadístico de proceso (SPC), 38, 1124-1131
análisis de, 1124
capacidad del proceso, 1131
control dimensional de partes plásticas en los automóviles Saturn, 1129-1130
ejemplo de, 1128-1129
muestreo de aceptación, 1130-1131
nivel de aceptación de calidad (AQL), 1131
tablas de control de Shewhart, 1124-1128
tablas de control para, 1124-1128
uso de, 38
Control numérico (NC), 1153, 1160
computarizado (CNC), 1155
directo (DNC), 1155
historia de, 1154-1155
interpolación, 1158-1159
limitaciones de, 1160
máquinas, principios de, 1155-1157
método de, 1153-1154
precisión en, 1159
programación para, 1160
sistema de contorneado, 1157
sistema punto a punto, 1157
sistemas de control, tipos de, 1157-1159
ventajas de, 1159
Control numérico computarizado (CNC), 34, 693, 739-741, 1155
concepto de, 34
máquinas, operaciones de fresado, 739-741
sistema de, 1155
tornos, 693-700
Controladores lógicos programables (PLC), 1152
Convertidor básico de oxígeno (BOF), 152, 153
Copa o basín de vaciado, 267, 290, 328
Copolímeros, 197-198
Coque, producción de hierro y acero que utiliza, 150
Corazones o machos, 291-292
fundición en arena, uso de en, 291-292
plantillas de corazones, 291
soportes de corazones, 292
Corindón, características de, 221
Corrosión, 94, 109-111
agrietamiento, 94
agrietamiento por esfuerzo-corrosión, 110
celda galvánica, 110
de hendidura, 110
definición de, 109
degradación, 109
galvánica, 110
intergranular, 10
lixiviado selectivo, 110
oxidación, 110

pasivación, 110
picaduras, 110
resistencia, 109-111
Cortador de cremallera, generación de engranes, 751
Cortadores, operaciones de fresado, 724-725, 730-732, 734-735
circulares, 734
eje, 734
fresado angular, 734
fresado de careado, 729-731
fresado de un solo filo, 734
fresado frontal o extremo, 725, 732
fresado periférico, 724-725
portaherramientas para, 734-735
ranura para chaveta, 734
ranura T, 734-735
tipo zanco, 734-735
Corte, 605-607, 647-673, 958-959. *Ver también* Fluidos de corte, Herramientas de corte
ángulo de ataque, 610
ángulos, 610, 618-619
arco, 959
arco carbón-aire (CAC-A), 959
arco de plasma (PAC), 959
cilindrado o torneado, 607-608
cortes de desbaste, 653
deformación cortante o cizallamiento, 612
energías específicas para, 622
energías relativas en, 623
factores que influyen en el maquinado, 610
fluidos, 665-670
fresado frontal, 607
fresado plano, 607
fuerza, 620-621
fuerza de empuje, 620, 621
haz de electrones, 959
herramientas, 626-638, 647-665
introducción a, 607-609
línea de la profundidad de corte, 634
maquinabilidad de los materiales, 638-642
mecánica de, 609-619
medición de fuerzas y potencia, 622-623
oblicuo, 618-620
operaciones de acabado, 653
ortogonal, 610
oxígeno y combustible gaseosos (OFC), 958-959
potencia, 620-623
profundidad de corte, 607-609
relación, 611
remoción de virutas, 607-609
temperaturas en, 623-626
tronzado, 607
variables dependientes, 609
variables independientes, 609
velocidad de avance, 607-608
velocidad óptima, 631
velocidades en la zona de corte, 612-613
vida útil de la herramienta, 626-635
virutas, tipos de, 613-618
Corte de forma, engranes, 749-751
Corte oblicuo, 618-619
ángulo de inclinación, 618
ángulo efectivo de ataque, 619
pelado, 619
proceso de, 618-619
rasurado, 619
Corte ortogonal, 610
Corte por arco de plasma, 854-855
Corte por fricción, 748
Costos, 17, 29-31, 39-41, 389-390, 664-665, 784-785, 858, 998-999, 1030, 1186-1187
de mano de obra, globales, 39-40
de operación y manufactura, 29-31
herramentales, 784
herramientas de corte, 664-665
importancia global de, 39-41
manufactura integrada por computadora (CIM), 1233-1234
maquinado, 784
materiales para manufactura, 17
matrices, 389-390
minimización del costo unitario de maquinado, 784-786
operaciones de soldadura, 998-999
operaciones de unión, 1030
operativos y de manufactura, 29-31
procesos avanzados de maquinado, 858
procesos de automatización de manufactura, 1186-1187
tipos de, 40
total, 40-41
unitario, 785
Costura, 450, 1025
Caterización, operaciones de corte, 632
Criogénico, 135, 670, 892
ataque en seco, 892
maquinado, 670
tratamiento, 135
Crisol, uso de, 152
Cristales, 47-49, 50-55, 312-314, 874-875. *Ver también* Monocristal
alotropismo monocristalino, 48
comportamiento anisotrópico, 47
crecimiento, 313, 874-875
definición de, 47
deformación en monocristales, 50-54
dispositivos microelectrónicos, 874-875
esfuerzo cortante, 50
estructura de, metales, 47-49
imperfecciones en la estructura de metales, 51-54
maclaje, 51
método de la zona flotante, 313-314
nucleación de, 54-55
plano de deslizamiento, 50
policristales, 54
polimorfismo, 48
proceso Czochralski (CZ), 313-314, 874
resistencia de, 50-54
sistemas de deslizamiento, 51
técnicas de fundición para, 312-314
Cristalinidad, 199-200
contracción por cristalización, 200
cristalitos, 199
efectos de, 199-200
grados de, 199
polímeros, 199-200
semicristalino, 199
Cromo, efecto en aceros, 157
Cuarteaduras, 204-205
agrietamiento tensoambiental, 205
definición de, 204
emblanquecimiento por esfuerzo, 205
por solvente, 205
termoplásticos, 204-205
Cuartos limpios, dispositivos microelectrónicos, 871-872
Cuarzo, características de, 225
Cúbica centrada en la cara (fcc), 47, 49, 51
Cubilotes, uso de, 316
Curado de piso sólido (SGC), 592-593
Curvas de distribución, 1122-1123
Curvas esfuerzo-deformación, 65-68, 70-71, 73-74
construcción de, 70-71
efectos de la temperatura en, 73-74
uso de, 65-68
Curvas S-N, 83, 85

D

Dados tipo ojo de buey, 406-407
Dados tipo puente, 406-407
Defectos, 51-54, 92, 275-280, 356-357, 384-387, 413-414, 419, 538, 550
acocodrilado u hojeamiento, 357
agrietamiento central, 419
agrietamiento interno, 413-414
agrietamiento superficial, 413
bordes ondulados, 356
categorías de fundición, 275, 277
cavidad por contracción, 279
cavidades, 275
dimensiones incorrectas, 277
discontinuidades, 275
dislocaciones, 53-54
distorsión, 419
efectos piel de tiburón, 538
ejemplos de, 276
estirado (trefilado), 419
extrusión, 413-414, 538
falla catastrófica, 92
forja, 384-387
fractura, importancia en, 92
fundición incompleta, 277
fundición metálica, 275-280
grietas, 356
huecos, 550
inclusiones, 277
lineal, 53
marcas de hundimiento, 550
moldeo por inyección, 550
placas y hojas laminadas, en, 356-357
planar, 53
porosidad, 277-279, 550
proyecciones metálicas, 275
puntual, 52
resistencia de los metales, como, 51
superficies defectuosas, 275
tipo bamboo, 538
tubo, 413
volumen, 53
Defloculador, uso de, 515
Deformación, 50-54, 57-58, 67, 70-78, 90, 203-204, 437-440
anisotropía, 57
comportamiento anisotrópico, 51
cortante o de cizallamiento, 78, 612
defectos, 51-53
dislocaciones, 53-54
efectos de la velocidad de deformación en los materiales, 74-76, 203-204
elástica, definición de, 50
embutido, 437
endurecimiento, 54
endurecimiento por deformación, 54
endurecimiento por trabajo, 54
ensanchado o estirado, 437
envejecimiento, 90
envejecimiento acelerado, 90
fibrosidad mecánica, 58, 90
formabilidad de las hojas metálicas, 437-440
formación de cuello en un ensayo de tensión, en, 71-73
imperfecciones en la estructura cristalina de los metales, 51-54
ingeniería, 67
ingenieril (*e*), 67
maclaje, 51
monocristales, 50-54
orientación preferida, 58
permanente, definición, 50
plano de deslizamiento, 50
plástica, 50, 57-58, 88, 90
real, definición, 70
reblandecimiento, 77
sistemas de deslizamiento, 51
uniforme, 204
velocidad de, 74-76, 203-204
Deformación plástica, 50-51, 57-58, 67, 88, 90
anisotropía, 57-58
comportamiento anisotrópico, 51
curva esfuerzo-deformación, 67
definición, 50
esfuerzo cortante o de cizallamiento, 50-51
fibración mecánica, 58
fractura dúctil, 88, 90
maclaje, 51
metales policristalinos, de, 57-58
orientación preferida, 58
plano de deslizamiento, 50
Degradación, 109, 203
definición de, 109
envejecimiento térmico, 203
termoplásticos, de, 203
Dendritas, 264, 266-267
columnares, 264
composiciones de, 266-267
con núcleo, 266
formación de metales semisólidos, 267
gradiente de concentración, 266
macrosegregación, 266
microsegregación, 266
multiplicación, 267
reofundición o en estado viscoso, 267
segregación, 266-267
segregación inversa, 267
Denominaciones, 158, 160, 173, 796, 973
abrasivos aglutinados, 796
aceros, 158
aceros al carbono, 158
aceros aleados, 158, 160
aluminio, 173
American Society for Testing and Materials (ASTM), 158
de temple, aluminio, 173
del American Iron and Steel Institute (AISI) para aceros, 158, 160
severidades de temple, 173
Society of Automotive Engineers (SAE), 158
soldaduras, 973
Densidad, 103-106
definición de, 103
relación rigidez a peso, 104
selección de materiales, importancia en
Deposición de película, 875-877
dispositivos microelectrónicos, 875-877
epitaxia, 875-876
técnicas de, 876-877
Deposición de rocío, 498-499
Deposición de vapor, 1065-1068
chapeado iónico, 1067
chisporroteo o pulverización catódica, 1066-1077
de vacío, 1066
física (PVD), 1065-1067
proceso de, 1065
química (CVD), 1067-1068
Deposición electrolítica, 487
Deposición física de vapor (PVD), 657-658, 1065-1067
Deposición química de vapor de temperatura media (MTCVD), 658
Deposición sin electricidad, 1069, 1073
Descarburado, 137
Desensamble, 15, 1185
Desgaste, 626-634, 648, 804-805, 1046-1050
abrasivo, 1048
adhesivo, 1047-1048
características de la superficie, 1046-1050
corrosivo, 1048-1049
de cráter, 632
de las herramientas de corte, 626-634
de los discos de rectificación, 804-805
del flanco, 628-631
del grano por abrasión, 804
por fatiga, 149
por rozamiento de grano (atrición), 804
resistencia, 648, 1050
Deslaminado, 245
Deslizamiento, 50-51, 515-516
banda, 51
definición, 515
fundición, 515-516
plano, 50
sistemas, 51
Desperdicio, de operaciones de cizallado, 431

Desperdicios agrícolas, 213
Desposición química de vapor (CVD), 657-658, 1067-1068
Desvitrificación, definición de, 231, 525
Devanado de filamentos, 546-569
Diagrama constitucional, 118
Diagrama de equilibrio, 118
Diagramas de fase, 118-125, 266
  binarios, 118-121
  fase líquida, 119
  fase sólida, 119
  hierro-carburo de hierro, 121-125
  microestructuras en aceros, desarrollo de, 123-125
  punto eutéctico, 120
  regla de la palanca, 119
  relaciones estructura-propiedad, 265-267
Diagramas de límite de formado (FLD), 438-440
Diagramas de transformación isotérmica (IT), 130
Diagramas tiempo-temperatura-transformación (TTT), 130-132
Diamante, 233-234, 660, 663-664, 793, 1076-1077
  abrasivo, uso como, 793
  aplicaciones de, 234
  características de, 233-234
  herramientas de corte, 663-664
  industrial, 233
  monocristalino, 663
  policristalino (PCD), 663
  recubrimientos, 1076-1077
  sintético, 233
Diente de engrane, 754, 1093
Difusión, 60, 168, 463-465, 500, 632, 996-998
  aplicación aeroespacial, ejemplo de, 997-998
  definición de, 60
  mecanismo, 500, 632
  proceso de formado superplástico/unión por difusión (SPF/DB), 464, 998
  recubrimiento por, 168
  soldadura (DFW), 996-998
  unión por, 464, 996-998
Dimensionamiento, *ver* Tolerancias dimensionales; Tolerancias
Discos o piedras de rectificado, 794-796, 796-798, 804-805, 806-807
  afilado, 806-807
  aglutinantes metálicos, 798
  aglutinantes resinoides, 796, 797
  aglutinantes vitrificados, 796
  ajuste, 806
  costos de, 794, 796
  de hule, 798
  desgaste, 804-805
  formado, 807
  grado y estructura de, 798
  materiales aglutinantes, 794, 796-798
  orgánicos, 796-797
  piedra tapada, 806
  reforzados, 797
  termoplásticos, 797
  tipos de, 795
  uso de, 794
Discos o piedras reforzados, 797
Diseño, 15, 323-332, 387-388, 471-474, 505-507, 528, 572-573, 702-703, 714, 735-737, 745, 755, 771-773, 818, 819-820, 841, 843, 846, 849, 853, 971-974, 1009, 1014, 1019-1020, 1026-1027, 1183-1186, 1238-1242. *Ver también* Diseño asistido por computadora (CAD); Diseño de productos
  ángulo de salida, 326
  áreas planas, 325
  automatización de los procesos de manufactura, 1183-1186
  canales de alimentación, 328
  cavidades por contracción, prevención de, 326
  cerámicos, consideraciones para, 528
  compuertas, 328
  de pases en rodillos, 360
  desensamble, 1185
  doblado de hojas metálicas, 472-474
  ejemplos de, 330-331, 1242, 1245-1246, 1250, 1252
  ensamble, 1184-1185
  ensamble robótico, 1185
  esquinas, ángulos y espesores de sección, 324-325
  estampado, 474
  fijación, 1183-1184
  formas de productos troquelados, 472
  fundición, 323-332
  fundición en molde desechable, 329
  fundición en molde permanente, 330-331
  fundición metálica, consideraciones para, 323-332
  hojas metálicas de embutido profundo, 474
  láminas metálicas, consideraciones para, 471-474
  letreros y marcas, 327
  línea de partición, ubicación de, 327
  manufactura de engranes, 755
  maquinado electroquímico (ECM), 843
  maquinado por descarga eléctrica o electroerosión, 849
  maquinado por rayo láser, 853
  maquinado químico (CM), 841
  maquinado ultrasónico (UM), 819-820
  máquinas herramienta, 771-773
  materiales compósitos, consideraciones para, 572-573
  matrices, 387-388
  metalurgia de polvos (P/M), 505-507
  modelado por computadora, 331-332
  operaciones de acabado, 327
  operaciones de brochado, 745
  operaciones de fresado, 735-737
  operaciones de mandrinado, 704
  operaciones de matriz progresiva, 474
  operaciones de rectificado, 818
  operaciones de soldadura blanda, 1014
  operaciones de soldadura fuerte, 1009
  operaciones de taladrado, 714
  operaciones de unión con adhesivos, 1019-1020
  para desensamble, 15
  para el medio ambiente (DFE), 33. *Ver también* Medio ambiente
  para ensamble (DA), 15
  para reciclado (DFR), 33
  para servicio, 15
  partes fundidas, 324-327
  pasos para, 324
  plásticos, consideraciones para, 572-573
  porosidad, prevención de, 325, 326
  prácticas adecuadas de, 328-329
  procesos de soldadura, 971-974
  procesos de unión, 971-974
  producto, 1238, 1242
  puntos calientes, 325, 326
  rectificado electroquímico (ECG), 846
  roscas de tornillos, 702-703
  selección del proceso de fundición, 327
  sin documentos escritos, definición, 13
  sujeción mecánica, 1026-1027
  tolerancias dimensionales, 326-327
  tolerancias por contracción de los fabricantes de modelos, 326
  verde, 33
  vidrios, consideraciones para, 528
Diseño asistido por computadora (CAD), 13, 1195-1203
  desarrollo de modelos para componentes automovilísticos, 1199-1203
  diseño de productos con, 13
  elementos de, 1196-1203
  Especificación para Intercambio de Datos de Productos (PDES), 1196
  especificaciones de intercambio, 1195-1196
  formato de intercambio de planos (DFX), 1195
  formato inicial de intercambio de gráficas (IGEX), 1195-1196
  ingeniería asistida por computadora (CAE), y, 1195-1203
  uso de, 1195
Diseño de productos, 11-14, 1238-1242
  cantidad de materiales, 1241-1242
  consideraciones para, 1239-1241
  ejemplo de, 1242
  importancia de, 11
  ingeniería asistida por computadora (CAE), 13
  introducción a, 1238-1239
  manufactura asistida por computadora (CAM), 13, 14
  modelado y diseño asistido por computadora (CAD), 13
  producción rápida de prototipos, 14
  producción virtual de prototipos, 14
  prototipos, 14
  sin documentos escritos, 13
Diseño para manufactura (DFM), 14-16. *Ver también* Manufactura
  capacidades de, 15
  definido, 14
  metodologías de, 15-16
  y ensamble (DFMA), 14-16
Dislocaciones, 53-54, 120
  anclamiento, 120
  de extremo, 53-54
  definición de, 53
  metales, reforzamiento de, 53
  tornillo, 53-54
Dispositivos de sujeción del trabajo, tornos, 687-689
Dispositivos microelectromecánicos (dispositivos MEMS), 908-935
  definición, 908
  fabricación de, 908-935
  fabricación electroquímica, 928
  fabricación sin materia sólida, 927-932
  litografía de rayos X multicapa, 925-926
  microestereolitografía, 927-928
  micromaquinado de, 909-920
  proceso HEXSIL, 926-927
  proceso LIGA de microfabricación, 920-927
  proceso SCREAM, 917
  proceso SIMPLE, 918
Dispositivos microelectrónicos, 865-907
  ataque, 885-892
  confiabilidad de, 900-901
  crecimiento de cristales, 874-875
  cuartos limpios, 871-872
  deposición de película, 875-877
  empaque, 897-900
  fabricación de, 868-907
  introducción a, 867-871
  litografía, 878-885
  metalización, 895-897
  oxidación, 877-878
  preparación de obleas (wafer), 874-875
  proceso Czochralsky (CZ), 874
  proceso de dopado por implantación de iones, 893
  proceso de dopaje por difusión, 893
  prueba, 896-897
  rendimiento, 900
  semiconductores, 872-874
  silicio, estructura de, en, 872-874
  superficies de sustrato dopadas, 893-894
  tarjetas de circuitos impresos (PCB), 901-903
  tecnología de circuitos integrados (IC), 868-870
  transistor de semiconductor metal-óxido de efecto de campo (MOFSET), 869, 871
  unión de cables, 897-898
Dispositivos semiconductor metal-óxido (MOS), 867
Distorsión, 95
  de forma, 129
  de tamaño, 129
  definida, 129
Distribución de frecuencias, 1122, 1124
Distribución de peso molecular (MWD), 195
Distribuidor, uso de, 155
Doblado, 79, 440-451, 472-474
  acanalado, 446-447
  características de, 440
  comportamiento mecánico de, 78-79
  consideraciones de diseño para, 472-474
  de cuatro puntos, 79
  de tres puntos, 79
  formado en prensa de cortina, 445-446
  fuerza, 447
  hojas metálicas, 440-451, 472-474
  holgura de doblado, 441
  máquina de cuatro correderas, 446
  operaciones, tipos de, 445-451
  radio mínimo de doblado, 441-443
  rebordeado, 447
  recuperación elástica, 443-444
  rolado, 446
  terminología de, 440-441
  tubo, 448-449
Dolomita, 150
Dopaje, 206, 893-894
  definición de, 206
  proceso de difusión, 893
  proceso de implantación de iones, 893
  superficies de sustrato, dispositivos microelectrónicos, 893-894
Dopantes, uso de, 109
Ductilidad, definición de, 69
Dureza, 79-83, 647-648
  definición de, 79
  dureza en caliente, 82, 647-648
  dureza Mohs, 82
  durómetro, 82
  ensayo Brinell, 80
  ensayo de Vickers, 81
  ensayo Knoop, 81-82
  ensayo Rockwell, 80-81
  ensayos, 79-82
  escleroscopio, 82
  materiales, de, 79-83
  procedimientos de prueba, 83, 85
  resistencia y, 83-83
  zona de deformación, 83
Dureza al rojo o en caliente, 82, 647-648
Dureza Mohs, 82
Durómetro, 82

E

Economía, *ver* Costos
Economía de escala, organización de la manufactura, 41
Ecuación de Taylor para la vida de la herramienta, 628-630
Efecto Bauschinger, 77
Efecto del invar, 108
Efecto piezoeléctrico, 19
Elastómeros, 202, 214-215, 561-562. *Ver también* Hule
  características de, 214
  definición de, 214
  hule, función y desempeño como, 561
  mezcla con, 202
  pérdida por histéresis, 214

procesamiento de, 561-562
propiedades de, 214-215
vulcanización, 214, 561
Electrodeposición, 1069-1072
Electrodos, 847-848, 954-956
denominaciones, 955
EDM sin desgaste, 848
maquinado por descarga eléctrica o electroerosión (EDM), 847-848
recubrimientos, 955-956
soldadura por arco, 954-956
Electroformado, 1069, 1072-1073
Electropulido, 824
Electroquímica, 841-846, 928
capacidades de proceso de ECM, 842-843
fabricación, 928
honeado o asentado, 846
maquinado (ECM), 841-845
maquinado por pulsos (PECM), 844-845
rectificación (ECG), 845-846
Elongación, 355, 435-436
de punto de fluencia, 355, 436
laminación, efectos de, 355
láminas metálicas, 435-436
total, 69
embutido profundo, 451-459, 474
anisotropía, 454-455
borde ondulado, 455-456
capacidad de embutido, 453-456
consideraciones de diseño para, 474
ejemplo de, 458-459
herramientas y equipo para, 458
perlas de embutido, 456
placa de sujeción, 453, 457
planchado, 457
práctica, 456-459
productos de, 451-452
reembutido, 457
relación límite de embutido (LDR), 453
repujado o realzado, 457-458
Emulsiones, 667, 1052
Encamisado, procedimiento de extrusión, 408
Endurecimiento, 54, 134-138, 1061-1063
a la flama, 137-138
borurado, 137-138
carbonitrurado, 137-138
carburizado, 137-138
cianurado, 137-138
de la superficie, 137-138
descarburización, 137
por explosión, 1061-1063
Maraging, 136
por chispa, 1063
por deformación, 54
por envejecimiento, 135
por inducción, 137-138
por láser, 137-138
por precipitación, 134-136
por trabajo, 54
recubrimiento duro, 1062-1063
superficial, 136-137, 1062
Endurecimiento por precipitación (PH), 134-136, 162
aceros inoxidables, 162
definición, 134
envejecimiento, 135-136
fase kappa, 134
fase theta, 134
maraging, 136
proceso de, 135
tratamiento criogénico, 135
Endurecimiento superficial, 136-138, 1062
descarburación, 137
haces de electrones para, 137
procesos, 137
propiedades de la superficie, alteración de, 136
rayos láser para, 137
tratamiento superficial mediante, 1062
Energía, almacenada, 96
Energía específica, 70-71, 96, 622, 801-802
conversión de trabajo en calor, 96
curva esfuerzo-deformación, papel en, 70-71
operaciones de corte, 622
operaciones de rectificación, 801-802
Enfriadores de polímeros, 134
Enfriamiento rápido, 133-134
agitación, 134
capa de vapor de agua, 134
enfriadores de polímeros, 134
medios, 133-134
severidad del enfriamiento, 133
Engranes, 749-755
bruñido, 753-754
características de, 749
cónicos, 752-753
consideraciones de diseño de, 755
cortador tipo piñón, 751
corte de forma, 749-751
economía de la manufactura, 755
formador de cremallera, 751
fresa generadora o madre, 751-752
generación de engranes, 751-752
honeado, 754
índice de calidad de la American Gear Manufacturers Association (AGMA), 755
laminación de engranes, 75
lapeado, 754-755
manufactura, 749-755
números de calidad del Deutches Institut für Normung (DIN), 755
procesos de acabado, 753-755
rasurado, 753
rectificación, 754
recto de evolvente, terminología de, 749
Enlace(s), 196, 220-221, 464, 996-998, 1003-1004, 1014-1022, 1028-1029
adhesivo, 1003-1004, 1014-1022, 1028
cerámicos, 220-221
covalente, 196, 220
difusión, 464, 996-998
electromagnético, 1029
formado superplástico/proceso de unión por difusión (SPF/DB), 464, 998
iónico, 196, 220
polímeros, 196
primarios, 196
solvente, 1029
Enlatado, procedimiento de extrusión, 408
Ensamble, 15, 1180-1183. *Ver también* Sistemas de ensamble
automatizado de alta velocidad, 1181
definición de, 15
eficiencia, evaluación de, 1186
manual, 1180
robótico, 1181
Ensayo
de Charpy, 87
de flexión, 79
de microdureza, 81
de torsión en caliente, 385
del disco, 77
Jominy, 132
Knoop, 81-82
Rockwell, 80-81
Vickers, 81
Ensayos no destructivos (NDT), 971, 1131-1163
holografía, 1135-1136
inspección con partículas magnéticas, 1132-1133
inspección por corrientes de eddy, 1135
inspección térmica, 1135
inspección ultrasónica, 1133
líquidos penetrantes, 1132
métodos acústicos, 1133-1134
radiografía, 1134-1135
soldaduras, 972
Ensayos y pruebas, 64-101, 132-133, 271-272, 385, 437-440, 896-897, 969-971
Brinell, 80
Charpy, 87
de compresión, 76-77
de copa (acopamiento o ahuecamiento), 437-438
de dispositivos microelectrónicos, 896-897
de doblado, 79
de dureza, 79-84
de flexión, 79
de fluidez, 271-272
de formabilidad, 437-440
de impacto, 87
de microdureza, 91
de propiedades de los materiales, 64-101
de recalcado, 385
de tensión, 65, 71-73
de torsión en caliente, 385
destructivas, 970-971, 1136
diagramas límite de formado (FLD), 438-440
disco, 77
Erichsen, 437
espécimen, 65
Jominy, 132
Knoop, 81-82
no destructivas (NDT), 971, 1131-1163
Prueba de endurecimiento por enfriamiento rápido del extremo, 132-133
Rockwell, 80-81
soldaduras, 969-971
termofluencia, 86
Vickers, 81
Envejecimiento, 135-136, 203
acelerado por deformación, 90
artificial, 135
natural, 135
Envolvente de trabajo, centros de maquinado, 764
Epóxicas, propiedades de, 211
Epóxicos reforzadas con fibras, 211
Equilibrio, definición de, 118
Equipo para servicio, diseño de, 1186
Escleroscopio, 82
Escoria, definición, 150
Esferoidita, 127
Esfuerzo(s), 65, 67-69, 77, 78, 86-87, 94-96, 107, 110, 205. *Ver también* Termofluencia
a la tensión, 77
agrietamiento, 94, 96
agrietamiento por esfuerzo-corrosión, 94, 96, 110
al corte, 78
cíclicos, 83
de fluencia, 67
de rotura, 68
de tensión, 77
enblanquecimiento, 205
fractura, 68
ingeniería, 65
ingenieril(es), 65
nominal, 65
real, definición, 69
relajamiento, 86-87, 204
residuales, 94-96
ruptura, 68
térmicos, 107
Esfuerzo cortante, 50-51, 78
cálculo de, 78
crítico, 51
definición, 50
relación b/a, 51
Esfuerzos residuales, 94-96, 357, 419, 803-804, 966-968
agrietamiento por esfuerzo-corrosión, 96
definición, 94
distorsión, 95
estirado o trefilado, 419
gradientes de temperatura, 95
materiales, en, 94-96
metales laminados, 357
operaciones de rectificado, 803
reducción y eliminación de, 96
soldaduras, 966-969
Esmeril, características de, 221
Especificación de intercambio de datos del producto (PDES), 1196
Espumas metálicas, características y usos de, 186
Estampado, 383-384, 424, 474
de tubos, 384
Estaño, 158, 184-185, 335
aleaciones fundidas con base de estaño, 335
babbitts, 184
características y usos de, 184-185
efecto en aceros, 158
metales, blancos, 184
pewter, 184-185
Estereolitografía (SLA), 586-587
Estirado o trefilado, 400-402, 415-420, 422
características de, 402
de perfiles, 417
defectos, 419
diseño de matrices para, 418
equipo, 419-420
esfuerzos residuales, 419
estirado de perfiles, 417
estirado de tubos, 416
estirado múltiple, 417
fuerza, 415-416
introducción a, 400-402
lubricación, 418-418
materiales para matrices para, 418
matrices con forma de cuña, 416
práctica, 416-419
proceso de, 415-416
recubrimiento metálico, 419
trabajo redundante de deformación, 415
vibración ultrasónica, 419
vidrio, 522
Estructura(s)
centrada en el cuerpo (bcc), 47, 48, 51
cristalina, definición de, 47
hexagonales compactas (hcp), 47, 49, 51
reticular, 47
tetragonal centrada en el cuerpo (bct), 128
Estructuras de las máquinas herramienta, 770-774, 784
amortiguamiento, 772
cimentaciones de las máquinas, 773
consideraciones de diseño para, 771-773
costo de las herramientas, 784
distorsión térmica, 772
guías, 773
máquinas hexápodas, 773-774
materiales para, 770-771
rigidez, 772
técnicas de ensamble para, 772
transmisiones de motores lineales, 773
unión de, con resinas, 772
Estructuras tipo panal, 470-471
características de, 470-471
definidas, 470
proceso de corrugación, 471
proceso de expansión, 471
Eutécticas, solidificación de, 264
Eutéctico, punto, definición de, 120
Eutectoide, 124-125
cementita, 124
ferrita, 124
reacción, 124
temperatura, 124-125
Expectativa de vida, producto, 1238, 1243-1244
Exponente (n) de endurecimiento por trabajo, 70
Exponente de endurecimiento por deformación, 70
Extracción de fibras, 245
Extrusión, 400-415, 536-541
características de, 400-402
coaxial, 405
constante, 403

defectos, 413-414, 538
directa, 402, 403
ejemplos de, 404, 408-409
en avance, 402
equipo, 414-415
extrusión en caliente, 405-409
extrusión en frío, 409-413
extrusor de tornillo, 536-537
flujo metálico en, 404-405
fuerza, 403
hidrostática, 402, 413
impacto, 412
indirecta, 402
introducción a, 400-402
lateral, 402
parámetros de, 405
película soplada, ejemplo de, 541
plásticos, 539-541
polvos metálicos, 497
proceso, 402-405, 536-539
productos, procesos para plástico, 539-541
tornillos, secciones de, 536-537
zonas de metal muerto, 404-405
Extrusión en caliente, 405-409
características de, 405-406
diseño de matrices para, 406-407
ejemplos de, 404, 408-409
lubricación, 408
materiales para matrices, 407-408
matrices cuadradas, 406
proceso Sejournet, 408
secciones transversales huecas, 406
tubos, 406
Extrusión en frío, 409-413
características de, 409, 410
ejemplo de, 411
extrusión hidrostática, 413
extrusión por impacto, 412
lubricación, 410
Proceso Hooker, 412
ventajas sobre la extrusión en caliente, 410

F

Fábrica del futuro, concepto de, 35
Fabricación de MEMS sin materia sólida, 927-932
Falla, 87-94, 390, 900-901
catastrófica, 92
dispositivos microelectrónicos, 900-901
fractura, 68, 87-94
fractura dúctil, 88-91
fractura frágil, 91-94
materiales, causas de, 87-94
matrices en operaciones de manufactura, 390
pandeo, 88
rapidez, 900
Fase líquida, definida, 118
Fase líquida en aleaciones metálicas, 119
Fase sólida, 119, 560-561, 571
aleaciones metálicas, 119
formado, plásticos, 560-561
procesamiento, compósitos de matriz metálica, 571
Fatiga, 83, 85, 92-94, 108, 231, 634
curvas S-N, 83, 85
esfuerzos cíclicos, 83
falla, 83
fatiga estática, 231, 528
fatiga térmica, 108, 634
fractura, 92
límite, 85
materiales, de, 83-85
métodos de ensayo, 83
resistencia, mejoramiento de, 92-94
Fenoles, propiedades de, 211
Ferrimagnetismo, 109
Ferrita, 121, 124, 125, 126, 162
aceros inoxidables ferríticos (serie 400), 162
alfa, 121
delta, 121
estabilizadores, 125
estructura de, 121
eutectoide, 124
hierro ferrítico gris, 126
proeutectoides, 124
Ferromagnetismo, definición de, 109
Fibras, 207, 239, 241-244, 525, 542-543
aramídicas, 243
boro, 243
carburadas, 243
clasificación de, 244
conductivas, 243
continua, definición, 244
cortas, 244
de polímeros, 243, 542-543
de refuerzo, 241-244
definidas, 239
discontinuas, 244
elementos de refuerzo de, 244
grafito, 242-243, 543
largas, 244
pirólisis, 242, 543
plásticas, 207
producción de, 542-543
propiedades de, 242
silano, tratamiento con, 241, 245
tamaño y longitud de, 244
tipo E, 241
tipo E-CR, 241
tipo S, 241
torcidas, 243, 542-543
triquitas, 244
vidrio, 241, 245, 525
Fibras de vidrio, 241, 245, 525
características de, 241
procesamiento de, 525
silano, tratado con, 200-201
Fibrilado mecánico, 58, 90
Flamabilidad, plásticos, 208
Fluidez, 270-272
aleación, patrón de solidificación de, 271
definición de, 270
diseño de moldes, influencia de, 271
ensayo de, 271-272
inclusiones, efecto de, 271
índice, 272
materiales para moldes, influencia de, 271
metales fundidos, de, 270-272
sobrecalentamiento, grado de, 271
tensión superficial, efecto de, 271
transferencia de calor, efecto de, 271
vaciado, velocidad de, 271
viscosidad, 270
Fluido viscoso, definición, 202
Fluidos de corte, 665-670, 681, 685
abundante, 667
acción capilar, 666
aceites, 666
aplicaciones de, 667-668
efectos de, 668-669
ejemplo de, 666
emulsiones, 667
lubricación de cantidad mínima (MQL), 669
maquinado casi seco (NDM), 669, 681
maquinado criogénico, 670
maquinado en seco, 669, 681
maquinado, recomendaciones para, 685
niebla, 667-668
operaciones de torneado, 681
resultados de, 665
semisintéticos, 667
sistema de herramientas de corte, a través, 668
sistemas de alta presión, 668
uso de, 665-666
Fluidos dieléctricos, 847
Fluidos para el trabajo de los metales, 1050-1055
aceites, 1052
aditivos, 1053
ceras, 1053
consideraciones ambientales de, 1055
emulsiones, 1052
funciones de, 1052
grasas, 1053
jabones, 1053
lubricantes sólidos, 1053-1054
selección de, 1054-1055
soluciones semisintéticas, 1052-1053
soluciones sintéticas, 1052-1053
uso de, 1050-1051
Flujo del fluido, 267-270
características, 270
continuidad de masa, ley de, 269
diseño del bebedero, 269
flujo laminar, 270
modelado de llenado de molde, 269-270
número de Reynolds, 270
teorema de Bernoulli, 268
turbulencia, 270
Flujo laminar, 270
Fluorocarbonos, propiedades de, 210
Forja
con matriz plana, 373
de desbaste, 374-375
en matriz cerrada, 378
Forjabilidad, 348-387
Forjado, 371-399
a temperatura media, 372-373
acuñado, 380
cabeceado, 380-381
calidad del producto, 379
características de, 373
componentes de la suspensión del automóvil Lotus, 394-395
de precisión, 373, 378-379
defectos, 384, 387
economía de, 392-394
ejemplo de, 375
en caliente, 372
en frío, 372
ensayo de torsión en caliente, 385
estampado de tubos, 384
forjado rotatorio, 383-384
fuerza, 375, 377-378
introducción a, 371-373
isotérmico, 381, 383
laminar, 360, 361
lubricación, 388
máquinas, 390, 392
matrices, 387-390
matriz abierta, 373-375
matriz cerrada, 378
matriz de impresión, 376-379
operación, pasos de, 379
orbital, 383
penetrado, 381, 382
perno escalonado, manufactura de mediante cabeceado y penetrado, 382
progresivo, 383
prueba de recalcado, 385
punzonado de matrices, clavado, 382-383
rotatorio, 383-384
Forjado por impresión de matriz, 376-379
bloqueo, 377
con dado convexo, 376
forjado con dado cóncavo, 376-377
fuerza de forjado, 377-378
insertos de matrices, 376
operaciones de preformado, 376
proceso de, 376-377
rebaba de forja o bigote, 376
Forma esferoidal, 126
Forma nodular, 126
Formabilidad de los materiales, 435-440
anisotropía, 436
diagramas de límite de formado (FLD), 438-440
elongación, 435-436
elongación al punto de cedencia, 436
Formica, uso de, 248
láminas metálicas, 435-437, 437-440
pruebas, 437-440
resistencia al mellado, 437
tamaño de grano, 436-437
Formado
de orificios, hojas metálicas, 449
electrohidráulico, metales en hoja, 467
en frío, 560-561
mediante pulsos magnéticos, hojas metálicas, 466-467
por explosión, láminas metálicas, 465-466
por laminación, hojas metálicas, 448
por láser, láminas metálicas, 467
por martillado, hojas metálicas, 467
por prensado, 424
Formado de metal semisólido, 267, 311-312
comportamiento tixotrópico en, 311-312
crecimiento dendrítico en, 267
procesamiento de estado pastoso, 311
tixoformado, 311
Formado superplástico, 76, 463-465
ductilidad en, 76
ejemplo de, 465
limitaciones de, 464
proceso de unión por difusión (SPF/DB), 464
procesos, hojas metálicas, 463-465
ventajas de, 463
Formado y moldeado, 19, 21-23, 344-346, 347-370, 371-399, 400-423, 424-482, 483-512, 513-533, 534-579, 580-602
Ver también Fundición; Fundición de metales
características de, 346
cerámica, 514-521, 528
cizallado, 426-435
doblado, 440-451
elastómeros, 561-562
embutido profundo, 451-460
especializado, 465-470
estirado o trefilado, 400-402, 415-420
estructuras de panal, 470-471
extrusión, 400-415, 536-543
fibras, 542, 543
forjado, 371, 399
formado de fase sólida, 560-561
formado de hule, hojas metálicas, 460-461
formado en frío, 560-561
importancia de, 344-345
laminación, 347-370
láminas metálicas, 424-482
materiales compósitos, 534-536, 562-579
metalurgia de polvos (P/M), 483-512
moldeado de espuma, 559-560
moldeo de transferencia, 556-558
moldeo por compresión, 556-557
moldeo por inyección, 518-519, 544-552
moldeo por soplado, 552-554
operaciones de manufactura rápida de prototipos, 580-602
plásticos, 534-561, 572-579
polvos metálicos, 483-512
procesamiento de polímeros, 23
procesos de deformación volumétrica, 21
procesos de láminas metálicas, 22
procesos, tipos de, para manufactura, 19, 21-23
rechazado, 461-463, 542-543
rotomoldeo, 554-555
superconductores, 529-530
superplástico, 463-465
termoformado, 555-556
vidrio, 521-528
Formato de intercambio de planos (DFX), 1195
Formato inicial de intercambio de gráficas (IGEX), 1195-1196
Fósforo, efecto en aceros, 157
Fotolitografía, 878, 880-882
Fotorresistente (PR), 880
Fractura, 68, 87-94
agrietamiento por esfuerzo-corrosión, 94
defectos, 92
dúctil, 88-91
esfuerzo, 68

fibración mecánica, 90
formación de huecos, 89-90
fractura por fatiga, 92
frágil, 91-94
fragilización por hidrógeno, 94
inclusiones, 89-90
marcas de playa, 92
materiales, en, 87-94
plano de clivaje, 91
resistencia a la fatiga, 92-94
temperatura de transición, 90, 91
trayectorias intergranulares, 92
trayectorias transgranulares, 92
Fractura del aglutinante, 804-805
Fractura dúctil, 88-91
fibración mecánica, 90
formación de huecos, 89-90
inclusiones, efectos de, 89-90
temperatura de transición, 90, 91
Fractura frágil, 91, 94
agrietamiento por esfuerzo-corrosión, 94
defectos, factor de, 92
ejemplo de, 94
fractura por fatiga, 92
fragilización por hidrógeno, 94
marcas de playa, 92
plano de clivaje, 91
resistencia a la fatiga, 92-94
Fragilidad al azul, 90
Fragilización, 56, 94, 140
de metal sólido, 56
fragilización en caliente, 56
fragilización por hidrógeno, 94
límite del grano, 56
metal líquido, 56
por hidrógeno, 94
por metal líquido, 56
por revenido, 56, 140
templado, 56, 140
Fresa con forma de piñón, generación de engranes, 751
Fresa generadora o madre, generación de engranes, 751-752
Fresado, 723-741
accesorios para, 739, 741
capacidades de proceso, 735
concurrente, 725-726, 729
consideraciones de diseño para, 735-737
convencional, 725-726, 729
dispositivos de sujeción del trabajo, 739
ejemplos de, 728, 732
fresas o cortadores, 724-725, 730-732, 734-735
frontal, 725, 729-732
guía para la resolución de problemas, 737
lineamientos para la operación, 735-737
máquinas de control numérico computarizado (CNC), 739-741
máquinas, 738-741
parámetros de, 726-728
periférico, 724-728
proceso de, 723-724
radial, 725, 732-733
recomendaciones para, 736
Fresado de careado, 725, 729-732
cortadores, 725, 730-731
ejemplo de, 732
fresado concurrente, 729
fresado convencional, 729
marcas de avance, 729-730
proceso de, 729-731
Fresado frontal, 607, 725, 732-733
alta velocidad, 733
definición de, 607
fresa frontal, 725, 732
fresas frontales de punta esférica, 732, 733
fresas frontales huecas, 732
proceso de, 732-733
Fresado periférico, 724-728
ejemplo de, 728
filos (gavilanes) del cortador, 724-725
fórmulas para, 727
fresa, 724-725
fresado concurrente, 725-726
fresado convencional, 725-726
fresado plano, 724-726
parámetros de, 726-728
procesos de, 724-726
Fresadoras de tipo columna y codo, 738-739
Fresadoras tipo cama, 739
Fricción, 748, 1043-1046
ángulo, operaciones de corte, 612
características superficiales de, 1043-1044
coeficiente de, 1044-1046
reducción de, 1044
Fuerzas, 350-352, 375, 377-378, 428, 620-623, 679-681, 800-801
de corte, 620-621, 679
de empuje (Ft), 620-621, 709
de laminado, 350-352
de los rodillos, 350-352
de punzonado, láminas metálicas, 428
forja, 375, 377-378
fuerza de empuje, 620-621, 681
operaciones de corte, 620-623
operaciones de torneado, 679-681
radiales, 681
rectificación, 800-801
Fundente, 150, 1006, 1010
definición de, 150
operaciones de soldadura blanda, 1010
operaciones de soldadura fuerte, 1006
Fundición, 19, 153-156, 259-343, 515-516, 525, 558-559. *Ver también* Fundición de metales a la espuma perdida, 297-300. *Ver también* Fundición de modelo evaporativo
a presión, 305-306
blanca de hierro, 126
características de, 288
centrífuga, 309-310, 525, 559
cerámicos, 515-516
componentes monocristalinos, técnicas para, 312-314
consideraciones de diseño, 323-332
continua ("strand casting"), 154-156
convencional, 312
de cinta, 156
de modelo desechable, *ver* Fundición de modelo evaporativo
de precisión, 296-297
de revestimiento de molde superior e inferior, *ver* Fundición en molde cerámico
definición de, 259
drenado, 515
economía de, 337-339
en molde cerámico, 297, 499
en molde duro, *ver* Fundición en molde permanente
encapsulación, 559
formado de metales semisólidos, 267, 311-312
fundición de metales, 259-343
fundición de molde permanente, 303-312, 330-331
fundición en arena, 268, 289-295
fundición en molde desechable, 287-303, 329
hueca, 305
impregnación, 559
lingotes, 153-154
metales, proceso de, 261
moldes, 262, 269-270
por compresión, 310-311
proceso de cuchilla de doctor, 516
proceso de solidificación direccional, 312
procesos, tipos de, para manufactura, 19, 20
realmente centrífuga, 309-310
refinación, 154
reofundición o fundición en estado viscoso, 267, 312
semicentrifuga, 310
tolerancias dimensionales para, 326-327
ventajas y limitaciones de procesos, 286
Fundición a presión en matriz, también "Inyección de metales", 306-309
agrietamiento por calor, 309
aleaciones, propiedades y aplicaciones de, 308
cámara de inyección, 306
capacidades de, 307-309
matrices para, 308-309
moldeo con insertos, 308
proceso de, 306-307
proceso de cámara caliente, 306
proceso de cámara fría, 306-307
selección de máquinas para, 307-309
Fundición de metales, 259-343
al vacío, 270, 304-305
álabes para turbinas, métodos de, 312-313
aleaciones, 263-265, 332-337
beneficios de, 260
cinta, 156
componentes monocristalinos, técnicas para, 312-314
consideraciones de diseño en, 323-332
contracción, 275
crecimiento de monocristales, 313-314
defectos, 275
economía de, 337-339
ejemplos de, 274, 279-280, 303
en barbotina, 515-516
equipo para, 259-260
filamento, 155-156
fluidez del metal fundido, 270-272
flujo del fluido, 267-270
fundamentos de, 261-284
fundición de molde desechable, 287-303
fundición de molde permanente, 303-312
fundición en arena, 268, 289-295
fundición tixotrópica, 267
giratorio, vidrio, 525
historia de, 285
hornos, 315-316
inspección de, 314-315
introducción a, 261, 285-286, 323
manufactura de forma neta, 260
metal fundido, fluidez de, 270-272
metales, 262-263
moldes, 262, 286
plásticos termofijos, 558-559
prácticas de fusión, 315-316
proceso de fundición convencional, 312
proceso de solidificación direccional, 312
procesos de, 259-260, 285-322
relaciones estructura-propiedad, 265-267
reofundición o en estado viscoso, 267
sistema de alimentación para, 267-268
solidificación, 262-267, 272-274
talleres de fundición, 316-317
termoplásticos, 558, 559
tixotrópicos, 267
transferencia de calor, 271-275
ventajas y limitaciones de, 286
Fundición de modelo evaporativo, 297-300
fundición a la espuma perdida de monobloques, 299-300
proceso de, 297-299
ventajas de, 299
Fundición de molde desechable, 287-303, 329
consideraciones de diseño en, 329
fundición a la espuma perdida, 297-300
fundición de modelo evaporativo, 297-300
fundición de molde cerámico, 297
fundición de molde de yeso, 296-297
fundición de precisión, 296-297
fundición de revestimiento, 300-303
fundición en arena, 289-295
moldeo en cáscara, 295-296
proceso a la cera perdida, 300-303
Fundición de vacío, 270, 304-305
eliminación de escoria o espuma en, 270
proceso de aire (CLA), 304-305
proceso de baja presión de contra-gravedad (CL), 304
proceso de vacío (CLV), 304-305
proceso de, 304-305
Fundición en arena, 268, 289-295
arena para moldeo en verde, 290
contaminantes atrapados en, 268
fundición en arena, 289-291
lanzadores de arena, 293
machos, 292
máquinas para moldeo en arena, 292-293
método de superficie seca, 290
modelos, 291-292
molde de caja fría, 290
molde no cocido, 290
moldeo de grafito compactado, 295
moldeo en vacío, 293
moldeo por impacto, 293
moldeo vertical sin caja, 293
moldes de arena, características de, 290-291
operación de, 293-295
operaciones de acabado para, 294-295
proceso de, 289
proceso V, 293
tipos de arena, 280
tratamiento térmico de, 294
Fundición en molde de yeso, 296-297. *Ver también* Fundición de precisión
autoclave, 296
Proceso Antioch, 296
proceso de, 296-297
Fundición en molde permanente, 303-312, 330-331
consideraciones de diseño en, 330-331
fundición a presión, 305-306
fundición a presión en matriz, también "Inyección de metales", 306-309
fundición centrífuga, 309-310
fundición de vacío, 270, 304-305
fundición en molde de material compósito, 312
fundición hueca, 305
fundición por dado impresor o compresión, 310-311
moldeado de metal semisólido, 267, 311-312
proceso de, 305-306
reofundición o en estado viscoso, 267, 312
Fundición de precisión, 296-297
Fundición por revestimiento, 300-303
de cáscara cerámica, 302
ejemplo de, 303
proceso de, 300-302
Fundido, definición, 178
Fusión de levitación, 316

G

Galena, 184
Galvanizado, 184
Gases en metales, 277-278
Gases licuados para formado de hojas metálicas, 468
Gel sembrado, 793
Gradiente de concentración, 266
Grado de polimerización (DP), 196
Grados de cristalinidad, 199
Grafitización, 126
Grafito, 232-233, 242-243, 543, 641
amorfo, 232
bolas de Bucky, 233
características del, 232-233
de grano fino, 232

definición de, 232
espumas, 233
industrial, 232
fibras, 233, 242-243, 543
fibras conductoras, 243
fibras de carbón, comparación con, 243
maquinabilidad del, 641
micrograno, 232-233
nanotubos, 233
pirólisis, 242, 543
precursores de, 242-243
Granallado, 1060
tipos de tratamientos superficiales, 1060-1061
Granos, 54-56, 58, 60, 262-263, 436-437, 793, 804
abrasivos, 793
columnar, 262
crecimiento del grano, 58, 60
definición de, 54
ejemplo de, 56
fractura del grano, 804
láminas metálicas, 436-437
límites de los granos, 55-56
nucleación, 54-55
nucleación homogénea, 263
número de grano, 793
tamaño del grano, 55-56, 436-437, 793
Granos columnares, definición de, 262
Gravedad específica, definida, 103
Grietas, 53, 413-414, 964-965
definición de, 53
internas, 413-414
soldaduras, 964-965
superficiales, 413
Guías, estructuras de máquinas herramienta, 773

H

Hastelloy, 179
Hematita, 150
Herramientas de corte, 626-638, 647-665
acabado superficial, 635-638
aceros para alta velocidad (HSS), 652
aleaciones de cobalto fundido, 653
astillado, 634
características de, 647-652
carburos, 653-656
cerámicos, 661-663
cerámicos base nitruro de silicio, 663
cerámicos con base de alúmina, 661-662
cermets, 662
clasificación de, 656
costos de las herramientas, 664-665
craterización, 632
curvas de la vida útil de la herramienta, 628-630
desgaste de la herramienta, 626-627
desgaste del flanco, 628, 631
diamante, 663-664
ecuación de Taylor para la vida de la herramienta, 628-630
ejemplos de, 630, 631, 652
insertos, 654-656
integridad superficial, 635-638
línea de la profundidad de corte (DOC), 634
marcas del avance, 637
materiales, 647-665
nitruro de boro cúbico (cBN), 662-663
profundidad del desgaste, 628-631
propiedades de, 649
reacondicionamiento, 664-665
recubiertas, 656-661
reforzadas con triquitas, 664
supervisión de las condiciones de la herramienta, 634-635
técnica de emisión acústica (AE), 635
velocidad óptima de corte, 631
vida útil de la herramienta, 626-638
Híbridos, definidos, 241
Hidrógeno, efecto en aceros, 158
Hidrometalurgia, 178
Hierro, 124-125, 150-151, *Ver también* Hierros fundidos
alto horno, 150-151
arrabio, 151
de grafito compactado, 127
dúctil, 126
elementos de aleación en, 124-125
escoria, 150
gama, 122
maleable, 127
materias primas para, 150
mena, 150
metal caliente, 151
producción de, 150-151
Hierros fundidos, 125-127, 334-337, 640, 770-771
bastidores de la máquinas herramienta, 770-771
blanca, 336
definición de, 125
dúctil, 126, 336
fundición de, 336-337
grafito compactado, 127, 336-337
gris, 126, 335-336, 770-771
maleable, 127, 336
maquinabilidad de, 640
nodular, 126, 336
propiedades de, 334
Hilo, definición, 244
Hojas, operaciones de laminado, 349, 356-357
Hojas delgadas, características de, 349
Hojas metálicas, 22, 424-482
abocardado, 449-450
abombado, 450
acanalado, 446-447
anisotropía, 436
bandas Lüders, 436
características de, 426, 436
cizallamiento, 426-435
conformación por estirado, 451
consideraciones de diseño para, 471-474
cosido, 450
diagramas de límite de formado (FLD), 438-440
doblado, 440-541
economía de, 476-477
ejemplos de formado, 431-432, 450, 458-459
elongación, 435-436
elongación del punto de fluencia, 436
embutido profundo, 451-459, 474
equipo para, 474-476
estampado, 424, 474
estirado, 437
estructuras de panal, 470-471
formabilidad, 435-437
formado a martillo, 467
formado de hule, 460-461
formado de orificios rebordeados, 449
formado electrohidráulico, 467
formado explosivo, 465-466
formado láser, 467
formado por laminado, 448
formado por pulso magnético, 466-467
formado superplástico, 463-465
fuerza de punzonado, 420
gases licuados, 468
introducción a, 424-425
manufactura de platillos, 468-470
matrices segmentadas, 450
métodos de corte, 435
mezclas de gases, 468
microformado, 467
penetrado, 449
plegado, 450
proceso Guerin, 460
procesos, 22
productos de, 424
profundidad de punzón (*d*), 437
prueba Erichsen, 437
pruebas, 437-440
pruebas de formado de depresión o copa, 437-438
rebordeado, 447
rechazado, 461-463
recuperación elástica, 443-444
resistencia al mellado, 437
tamaño de grano, 436-437
Hojeamiento, 965-966
Holgura, 426, 433
Homopolímero, 197
Honeado o asentado, 754, 821-822, 846
acabado mediante, 821-822
dientes de engranes, 754
electroquímico, 846
Horno(s), 142-144, 150-153, 315-316, 500
alto, 150-151
atmósferas en, 143-144
básico al oxígeno, convertidor, 152, 153
carga, 151
continuos, 143, 500
crisol, 152, 316
cubilotes, 316
de arco eléctrico, 151-152, 315
de baño de sales, 143
de caja, 142
de canal, 316
de carretilla, 142-143
de crisol, 316
de empape, uso de, 153
de fosa, 143
de hogar abierto, 151
de inducción, 152, 315-316
de núcleo, 316
de tratamiento térmico, 142-144
de vacío, 152
eléctrico, 151-152
elevador, 143
fundición metálica, 315-316
fusión por levitación, 316
lanza, 152
olla de traslado, 152
por lotes, 142-143
tipo campana, 143
toberas, 150
usos de, 142
Huecos, 53, 89-90
Hule, 202, 214-215, 460-461, 516-562, 798
calandreado, 561-562
definido, 214
discos o piedras de rectificado, 798
látex, 215
natural, 215
polímeros modificados, 202
procesamiento de, 561
procesos de formado, hojas metálicas, 460-461
productos discretos, 562
sintético, 215
triturado, 561
vulcanización de, 197, 214, 561

I

Impacto mecánico, 634
Imperfecciones, 51-54
Implantación de iones, 1068
Impresión tridimensional (3DP), 589-590, 591
Impureza, definida, 52
Inclusiones, 53, 89-90, 271, 962-963
definición de, 53
efectos de, 89-90
escoria, 962-963
fluidez, efectos en, 271
Inconel, 178
Índice de calidad de la American Gear Manufacturers Association (AGMA), 755
Inducción, 137-138, 143, 152
calentamiento, 143
endurecimiento, 137-138
horno eléctrico, 152
Infiltración de lodo, 571
Infiltración química de vapor, 572
Ingeniería asistida por computadora (CAE), 13, 1195-1203
aplicaciones de, 1195
diseño asistido por computadora (CAD) y, 1195-1203
especificaciones de intercambio, 1195-1196
uso de, 13
Ingeniería concurrente, 11-14, 1267-1268
Ingeniería simultánea, *ver* Ingeniería concurrente
Inmersión en caliente, 1074
Inoculante, definido, 267
Insertos, herramientas de corte, 654-656, 660
características de los rompedores de viruta, 656
recubiertos de diamante, 660
uso de, 654-656
Instalación rápida de herramientas, 597-599
Instrumentos
analógicos de medición, 1088-1089
digitales de medición, 1088-1089
graduados en línea, 1089, 1090
Integración a ultra-gran escala (ULSI), 869
Integración de muy grande escala (VLSI), 869
Inteligencia artificial (AI), 35, 1230-1233
concepto de, 35
ingeniería del conocimiento, 1231
lógica difusa, 1233
objetivo de la, 1230-1231
procesamiento de lenguaje natural, 1232
redes neuronales, 1233
sistemas expertos, 1231-1232
visión de máquina, 1232
Interferometría láser, 1098
International Committee of Foundry Technical Associations, 275, 277
International Organization for Standardization (ISO), 39, 656, 657, 1119-1121
Normas de administración de la calidad y de aseguramiento de la calidad, 1119
serie ISO 14000, 1120-1121
serie ISO 9000, 39, 1119-1120
Sistemas de administración ambiental (EMS), 1120
Interpolación, manufactura NC, 1158-1159
Invar, 179

K

Kaizen, 1111, 1242
Kanban, 1226-1227
Kevlar, características de, 243
Kovar, 179

L

Laminación de cuerdas, 362-364
Laminación plana, 349-358
consideraciones geométricas, 352-354
defectos en placas y láminas, 356-357
ejemplo de, 351
ensanchado de lámina, 353-354
esfuerzos residuales, 357
espacio de laminación, 349
fuerza del rodillo, 350-352
laminación Steckel, 352
números de calibre, 357-358
práctica de, 354-356
proceso de, 349-350
punto neutral, 350
punto no deslizante, 350
requerimiento de potencia, 350
rugosidad superficial, 357
torque, 350
traqueteo, 354
vibración, 354
Laminado, 347-370, 497-498, 522
compuesto o en tándem, 359
de anillos, 360-362
de forma, 360, 361
de superficie, 436
de tubos, 365
defectos en placas y hojas, 356-357
definido, 124
ensanchado de lámina, 353-354
hojas, 349, 522
introducción a, 347-349
inverso, 358
lubricantes, 360

manufactura de segmentos de cubierta de un motor de cohete sólido, 366-368
materiales de los rodillos, 359-360
metales, proceso de, 347-370
molinos, 358-360, 365-366
oblicuo, 360, 362
placas, 348-349
polvos, 497, 498
proceso de laminado en caliente, 354-355
proceso de laminado en frío, 355
procesos de laminación de formas, 360-366
procesos de laminado plano, 349-358
Steckel, 352
traqueteo, 354
vibración, 354
vidrio, proceso de, 522
Lanzadores de arena, 293
Lapeado, 754-755, 822-823
Látex, 215
Latón, 177
Lecho fluidizado, 143
Ley de Hooke, 68
Limado, 748-749
limas rotativas, 748
proceso de, 748-749
rebabas, 748-749
Límite de resistencia a la fatiga, 85
Límites de fase, definidos, 53
Límites de los granos, 53, 55-56, 86
definición de, 55
deslizamiento, 86
fragilización, 56
fragilización en caliente, 54
imperfeción planar, como una, 53
influencia de, 56
Límites y ajustes, 1107
Limonita, 150
Limpieza con chorro de granalla o arena, 294, 826
Limpieza de superficies de productos, 1078-1080
Línea de profundidad de corte (DOC), 634
Línea de solidus, definición, 118
Lingotes, 153-154
acero calmado, 154
acero efervescente, 154
acero semicalmado, 154
cavidad por contracción, 154
definición, 153
fundición, 153-154
rechupe, 154
sopladuras, 154
Litografía, 878-885, 925-928
características de, 879
de haz de iones (Haz-I), 882-883
de rayos X multicapas, 925-926
dispositivos microelectrónicos, 878-885
ejemplo de, 884-885
fotolitografía, 878, 880-882
fotorresistente (PR), 880
haz de electrones (haz e), 882-883
haz de iones (haz I), 882-883
microestereolitografía, 927-928
por rayos X, 882
por ultravioleta extremo (EUV), 882
proceso de, 878
proceso SCALPEL, 883
rayos X multicapa, 925-926
rayos X, 882
ultravioleta extrema (EUV), 882
Litografía de haz de electrones, 882-883
consideraciones de diseño de, 855
corte mediante arco de plasma, 854-855
proceso de, 854
Lixiviado selectivo, 110
Longitud digital fotoeléctrica, 1098
Longitud original de calibración, 65
Lubricantes, 208, 360, 388, 408, 410, 418-419, 489, 515, 669, 1050-1055. *Ver también* Fluidos de corte; Fluidos para trabajo de metales
aditivo plástico, como un, 208
agente divisor, como, 388
aplicaciones de, 1050-1051
cantidad mínima de lubricación, 669
cerámicos, uso de, en, 515
estirado en húmedo, 418
estirado en seco, 418
estirado o trefilado, 418-419
extrusión en caliente, 408
extrusión en frío, 410
fluidos para trabajo en metales, 1052-1055
laminado de metales, 360
matrices para forja, 388
polvos metálicos, en, 489
recubrimiento metálico de, 419
sólidos, 1053-1054
tratamiento superficial mediante, 1050-1051
vibración ultrasónica, 419

M

Machueleado, 716
maclación, definida, 51
Macrosegregación, definida, 266
Madera, maquinabilidad de, 641
Magnesio, 157, 174-176, 332, 641
aleaciones forjables, 176
aleaciones fundidas con base de magnesio, 332
características y usos de, 174
denominación de, 174-176
efecto de, en aceros, 157
maquinabilidad de, 641
método de reducción térmica, 176
método electrolítico, 176
producción de, 176
propiedades de, 176
Magnetostricción, definición, 109
Mandriles de sujeción motorizados, uso de, 689
Mandriles, uso de, 689
Mandrinado, 675, 690, 703-704
accionamiento del torno para, 690
agujeros de plantilla, 704
consideraciones de diseño para, 704
formas producidas por, 675
fresas, 703
máquinas, 703-704
proceso de, 703-704
Manganeso, efecto del, en los aceros, 157
Mantenimiento total productivo (TPM), 1153
Manufactura, 1-42, 64-101, 1084-1277
acabado superficial, importancia de, 29
administración de calidad total (TQM), 38
ágil, 37
ambiente competitivo, 1142-1277
análisis de valor, 1266
aseguramiento de la calidad, 38-39, 1110-1141
asistida por computadora (CAM), 13-14, 1191-1217
aspectos comunes de, 1084-1141
automatización, 1144-1190
capacidades de proceso, 1253-1257
competitividad global, 39-41, 41-42
consecuencias de selecciones inapropiadas, 31
control estadístico, 1121-1123, 1124-1131
costos, 29-31, 39-41, 1261-1268
de clase mundial, 39, 41-42
de forma neta, 31-32
de objetos laminados (LOM), 592
de partículas balísticas, 589-590
de ultraprecisión, 29
definida, 1-2
demandas y tendencias de, 3-4
desarrollo histórico de los materiales y de los procesos, 5-7
directa, 594-596
diseño consciente del medio ambiente, 32-33
diseño para manufactura (DFM), 14-16
ejemplos de, 8-11, 18-19, 26-29, 32, 36-37, 1259-1261
esbelta, 1227-1228
historia de, 4-11
holónica, 1224-1225
ingeniería concurrente, 11-14, 1267-1268
inspección, 1137
instrumentos y máquinas de medición, 1096-1101
integrada por computadora (CIM), 4, 33-37, 1218-1237
introducción a, 1-42
materiales, propiedades de, 17, 43-45, 64-101
materiales, selección de, 16-19, 1246-1250
medición en, 1085-1109
métodos de procesamiento, categorías de, 19-25
metrología en ingeniería, 1085-1109
normas de calidad, 1119-1121
precisión dimensional, importancia de, 29
proceso de diseño de producción, 11-14
procesos de diseño, 11-14, 1238-1242
producción esbelta, 37-38
productos, 2, 13, 38-39, 1238-1277
productos continuos, 3
productos discretos, 3
prototipos, 14
prueba, 1132-1136
rápida (RM), 594-595
redes de comunicaciones en, 1228-1230
revolución industrial, 4
selección de proceso, 19-32, 1257-1261
sostenible, 1245-1246
tendencias en, 41-42
tolerancia dimensional, 1085, 1101-1107
Manufactura asistida por computadora (CAM), 13, 14, 1191-1217
aplicaciones de, 1203-1204
diseño asistido por computadora (CAD) y, 1195-1203
ingeniería asistida por computadora (CAE), 1195
introducción a, 1191
manufactura integrada por computadora (CIM), 4, 33-37, 1192-1195
partes, sistemas de clasificación y codificación (C/C), 1211-1215
planeación de procesos asistidos por computadora (CAPP), 1204-1206
simulación de procesos y sistemas de manufactura, 1206-1208
sistemas, 1191-1192
sistemas de codificación, 1211-1215
tecnología de grupos, 1208-1211
uso de, 13-14, 1203
Manufactura celular (CM), 35, 1219, 1220
celda de manufactura, 1219
celdas de manufactura flexible (FMC), 1219
concepto de, 35
diseño de la célula, 1220
ejemplo de, 1220
uso de, 1219
Manufactura de forma neta, 31, 260, 483, 605-606
ejemplo de, 32
fundición metálica, 260
importancia de, 31, 605-606
metalurgia de polvos (P/M), 483
Manufactura de orificios, 426-435, 703-718
cizallado, 426-435
escariado, 714-715
fuerza del punzón, 428
importancia de, 704-705
machueleado, 716-718
perforado, 703-704
taladrado, 704-714
Manufactura integrada por computadora (CIM), 4, 33-37, 1192-1195, 1218-1237
aplicaciones de, 34-35
base de datos, 1194-1195
consideraciones económicas de, 1233-1234
control adaptable (AC), 34
control numérico computarizado (CNC), 34
efectividad de, 34-35
ejemplo de, 36-37
fábrica del futuro, concepto de, 35
impacto histórico de, 4
inteligencia artificial (AI), 35, 1230-1233
introducción a, 1218-1219
manejo de materiales, automatizado, 34
manufactura celular (CM), 35, 1219-1220
manufactura esbelta, 1227-1228
manufactura holónica, 1224-1225
método de, 1192-1193
planeación de procesos asistidos por computadora (CAPP), 35
producción justo a tiempo (JIT), 35, 1225-1227
redes de comunicaciones, 1228-1230
robots industriales, 34
sistemas de ensamble, automatizados y robóticos, 35
sistemas expertos (ES), 35
sistemas flexibles de manufactura (FMS), 35, 1221-1224
subsistemas, 1193-1194
tecnología de grupos (GT), 35
Máquina(s)
de forjado de alto índice de energía (HERF), 392
de medición por coordenadas (CMM), 1098-1100
dedicadas, 31
herramienta, 605-606
hexápodas, 773-774
Maquinabilidad de los materiales, 638-642
cerámicos, 641
compósitos, 641
factores de, 638
grafito, 641
madera, 641
maquinado asistido térmicamente, 641-642
metales ferrosos, 638
metales no ferrosos, 640
polímeros, 641
Maquinado, 19, 24, 603-759
abrasivo, 605, 790-834
aserrado, 745-748
asistido térmicamente, 641-642
brochado, 742-745
cantidad mínima de lubricación (MQL), 669
características de los procesos, 676
careado (refrentado), 675
casi seco (NDM), 669
centros, 760-770
cepillado de mesa móvil, 741
cepillado mesa fija, 741-742
corte, 605, 607-673, 958-959
cortes de acabado, 653, 681
cortes de desbaste, 653-681
costo por pieza, minimización, 784-786
de alta velocidad, 781-782
de ultraprecisión, 782
definido, 604
diferentes formas, 723-759
duro, 781-782
economía de, 783-786
electroquímico por pulsos (PECM), 844-845
estructuras de las máquinas herramienta, 770-774, 784
factores que influyen, 610
fluidos de corte, 665-670
formas redondas, 674-722
fresado, 724-741
fundamentos de, 607-646

herramientas de corte, 626-638, 647-665
limado, 748-749
machueleado, 716-718
mandrinado, 675, 703-704
manufactura de engranes, 749-755
manufactura de orificios, 674-676, 703-715
maquinabilidad de los materiales, 638-642
maquinado ultrasónico rotatorio (RUM), 819
máquinas herramienta, 605-606
micromaquinado, 20
moleteado, 676
por chorro de abrasivo (AJM), 858
por flujo de abrasivo, 826-827
procesos, 603-626, 674-723
procesos avanzados, 605, 606, 760-789
procesos de remoción de material, 605
rebabeo, 825-828
rectificación, 798-818
retenedor de tornillo para hueso, manufactura de un, 171-718
rimado o escariado, 714-715
roscado, 676
seccionado, 676
seco, 669
taladrado, 675, 704-714
térmicamente asistido, 641-642
tipos de procesos de manufactura, 19-20, 34
torneado, 607-608, 674-686, 696-700
tornos, 686-703
traqueteo, 775-778
ultrasónico (UM), 818-820
velocidad de remoción de material (MRR), 679, 685-686, 709, 710
vibración, 775-778
Maquinado avanzado, 760-789, 835-864. *Ver también* Control numérico computarizado (CNC)
características de los, 837
centros de maquinado, 760-770
conceptos del, 760-789
economía del, 858
estructuras de las máquinas herramienta, 770-774
implantes biomédicos, maquinado electroquímico de, 843-844
introducción al, 760-761, 835-836
maquinado de alta precisión, 782-783
maquinado de alta velocidad (HSM), 778-781
maquinado duro, 781-782
maquinado electroquímico (ECM), 841-845
maquinado electroquímico por pulsos (PECM), 844-845
maquinado por chorro abrasivo (AJM), 858
maquinado por chorro de agua (WJM), 855-857
maquinado por descarga eléctrica (o electroerosionado, EDM), 846-851
maquinado por haz de electrones (EBM), 845-855
maquinado por rayo láser (LBM), 851-854
maquinado químico, 836-841
procesos, 835-864
rectificado electroquímico, 845-846
Stents, manufactura de, 858-861
Maquinado de alta velocidad (HSM), 778, 781
características de las máquinas herramienta, 779
maquinado de limpieza fina, 780
maquinado de media luna roja, 780
maquinado en seco de motores de hierro fundido, 779-780
proceso de, 778-781
tiempo de corte, 779
velocidades de corte, 778
velocidades de rotación del husillo, 778
Maquinado por abrasión, 790-834, 828-834
compatibilidad entre la pieza de trabajo y el material, 793-794
de chorro de agua (AWJM), 855-857
economía de las, 828-829
introducción al, 790-792
maquinado ultrasónico, 818-820
operaciones de acabado, 820-825
operaciones de rebabeo, 825-828
rectificado, 794-818
Maquinado por chorro de agua (WJM), 855-857
abrasivo (AWJM), 855-857
proceso de, 855-856
ventajas de, 856
Maquinado por descarga eléctrica o electroerosión (EDM), 846-851
alambre EDM, 840-850
capacidades de proceso de, 848
consideraciones de diseño de, 849
electrodos, 847-848
fluidos dieléctricos, 847
principio de operación, 846-847
rectificación (EDG), 850-851
Maquinado por rayo láser (LBM), 851-854
aplicaciones de, 851
capacidades de proceso de, 853
consideraciones de diseño para, 853
ejemplo de, 854
proceso de, 851-853
Maquinado químico (CM), 836-841
consideraciones de diseño para, 841
fresado, 836-839
troquelado, 839-840
troquelado fotoquímico, 840
Maquinado ultrasónico (UM), 818-820
consideraciones de diseño para, 819-820
maquinado ultrasónico rotatorio (RUM), 819
proceso de, 818-819
Maraging, 136
Marcas de avance, 637, 729-730
Marcas de playa, 92
Martemplado, 136
Martensita, 126, 128-129
estructura de, 128
estructura tetragonal centrada en el cuerpo (bct), 128
hierro gris martensítico, 126
revenida, 129
tratamiento térmico de, 128-129
Martillos, forjado, 392
Martillos de caída, forja, 392
Materiales, 43-258, 359-360, 638-642, 647-665, 1163-1165, 1246, 1250-1252 *Ver también* propiedades de materiales
aleaciones metálicas, 114-148
apariencia de, 17
arcilla, 221
carburos, 223
cerámicos, 219-229, 231-232, 641
cermets, 224
comportamiento de, 43-45, 64-101
compósitos, 238-258, 641
compósitos de matriz cerámica (CMC), 253-254
compósitos de matriz metálica (MMC), 251-253
consecuencias de selecciones inapropiadas de, 31
conservación de, 213
costo y disponibilidad de, 17
de herramientas de corte, 647-665
diamante, 233-234
disponibilidad de, 17
ejemplos de selección de, 18-19, 110-111
elastómeros, 202, 214-215
fundamentos de, 43-258
grafito, 232-233, 641
hule, 202, 214-215
inadecuados para ingeniería, 219-220
ingeniería, 44
madera, 641
manejo, automatización de, 1163-1165
maquinabilidad de, 638-642
metales, estructura de, 46-63
metales ferrosos y aleaciones, 149-168, 638-640
metales laminados, 359-360
metales y aleaciones no ferrosas, 169-190, 640-641
nanocerámicos, 224
nitruros, 223
orgánicos naturales, 192
óxidos cerámicos, 221-222
para herramientas y matrices, para trabajo de los metales, 165
plásticos biodegradables, 212-214
plásticos reforzados, 239-251
plásticos termofijos, 204-206, 211, 641
polímeros, 191-218, 641
polímeros orgánicos sintéticos, 193
porcelana, 221
propiedades de, 64-114, 208-211, 214-215, 224-227, 647-652
propiedades de manufactura de, 17, 43-45, 64-101, 172
propiedades físicas de, 16, 102-113, 226-227
propiedades mecánicas de, 16, 64-101, 159, 162, 192, 225-226
propiedades químicas de, 17
prueba de, 64-101
reciclado de, 18
selección de, 16-19, 1246-1250
sialón, 223
sílice, 224
sintéticos, 192
sustitución de, 1250-1252
tendencias en manufactura, 41
termoplásticos, 202-206, 208-211, 641
tipos de, para manufactura, 16
tratamiento térmico, estructura y reforzamiento mediante, 114-148
vida útil de, 18
Matriz(es), 239, 244, 387-390, 405-408, 416-418, 429-430, 433-435, 450, 474. *Ver también* Fundición a presión; Aceros para herramientas y matrices; Compósitos
ángulos de salida, 388
bloque de la matriz, 389
cambio rápido de herramientas de, 389
cizallado, 429-430, 433-435
compuesta, 434
con forma de cuña, 416
corte, 429
costo de, 389-390
cuadradas, 406
de araña, 406-407, 539
de transferencia, 435
definición, 239
diseño de, 387-388, 406-407, 417-418, 474
estampado de matrices, 389
estirado o trefilado, 417-418
extrusión en caliente, 405-408
falla de, 390
forja, 387-388
forma de, 433-434
formado de láminas metálicas, 429-430, 433-435, 450, 474
funciones de, en plásticos reforzados, 244
línea de partición, 387
lubricación, 388, 408
manufactura de, 388-389
materiales, 244
materiales para, 388, 407-408, 418, 435
polímero, 239
preformas, 387
progresivas, 434-435, 474
requisitos para forja, 387
segmentadas, 450
suaje, 430
Mazarotas, 267, 291
abiertas, 291
ciegas, 291
fundición, uso de, en 267, 291
Medición, 1085-1109
ángulo, 1090
automatizado, 1100-1101
cabezas de tornillos, 1093
calibradores, 1093-1096, 1096-1097
características de los instrumentos, 1101
características geométricas de, 1091-1093
características geométricas del maquinado, 1105
dientes de engranes, 1093
dimensionamiento, 1101-1107
ejemplos de, 1087, 1099-1100
instrumentos analógicos, 1088-1089
instrumentos de línea graduada, 1089-1090
instrumentos digitales, 1088-1089
instrumentos y máquinas modernas, 1096-1100
interferometría láser, 1098
introducción a, 1085-1086
límites y ajustes, 1107
lineales, 1089-1090
longitud comparativa, 1090
longitud digital fotoeléctrica, 1098
máquinas de medición de coordenadas (CMM), 1098-1100
métodos e instrumentos tradicionales, 1089-1096
metrología en la ingeniería, 1085
micrómetros láser, 1097-1098
normas de, 1086
partes, características geométricas de, 1087-1089
perfil, 1093
planicidad, 1091
proyectores ópticos de contornos, 1093
rectitud, 1091
redondez, 1091-1093
símbolos para, 1106
tolerancias, 1101-1107
Medio ambiente, 32-33, 1055. *Ver también* Reciclamiento
diseño para el medio ambiente (DFE), 33
diseño para reciclado (DFR), 33
diseño verde, 33
diseño y manufactura con conciencia del medio ambiente, 32-33
fluidos para trabajo de metales, efectos de, 1055
Melamina, propiedades de, 211
Mena beneficiada, 150
Metaestable, definido, 125
Metales, 46-63, 114-190, 259-343, 347-512, 638-641, 968-969
acero, 116, 123-125, 134-136, 150-165, 638-640
acero inoxidable, 134, 161-163, 640
aceros al carbono, 156-159
aceros aleados, 156-161
aceros para herramentales y matrices, 163-165
aleación, 47
aleaciones, 108, 114-148, 149-468
arreglos atómicos en, 47
blancos, 184
caliente, 151
cizallado, 426-435
contracción, 274-275
costo por unidad de volumen, 170
crecimiento de grano, 58, 60
deformación de monocristales, 50-54
deformación plástica en metales policristalinos, 57-58

doblado, 440-451
embutido profundo, 451-460
estirado, 400-402, 415-420
estructura cristalina de, 47-49
estructura de, 46-63
estructuras de panal, 470-471
extrusión, 400-415, 536-543
ferrosos, 127-134, 149-168, 638-640, 969
fluidez de fundido, 270-272
forjado, 371-399
fundición, 153-156, 259-343
fundidos, 270-272, 277-278
gases en, 277-278
granos, 54-56
hierro, 124-125, 150-151
imperfecciones en la estructura cristalina de, 51-54
introducción a, 46-47
laminación, 347-370
láminas metálicas, 424-482
límites de grano, 53, 55-56
lingotes, 153-154
maquinabilidad de, 638-641
metalurgia de polvos (P/M), 483-512
no ferrosos, 169-190, 640, 969
nobles, *ver* Metales preciosos
polvos metálicos, 483-512
preciosos, características y usos de, 185
puros, 115, 262-263
recocido, 58-59
recristalización, 58-60
recuperación, 58-59
refractarios, 181-183
soldabilidad de, 968-969
solidificación de, 262-267, 272-274
trabajado en frío, 60
trabajo a temperatura media, 60
trabajo en caliente, 60
tratamiento térmico, 114-115, 122-123, 127-148
Metales no ferrosos y sus aleaciones; Aceros amorfos, 186
acero, 116, 123-125, 337
austenita, 122-123
cementita, 123
compuestos intermetálicos, 116
de alta temperatura, 179, 336
de baja expansión, 108
de baja fusión, 183-185
definición de, 115
diagramas de fase, 118-125
diagramas de fase hierro-carburo de hierro para, 121-125
estructura de, 115-117
ferrita, 121
ferrosos, 127-134, 149-168, 336-337
fundición, 332-339
fundición a presión en matriz, propiedades y aplicación de la, 308
herramientas de corte de cobalto colado, 653
hierros fundidos, 125-127, 334-337
memoria de forma, 185, 1026
no ferrosos, 169-190, 332-336
propiedades de, 171
refractarios, 181-183
resistente al calor, 179
sistema hierro-carbono, 121-123
sistemas bifásicos, 117
solidificación de, 263-265, 271
soluciones sólidas, 116
superaleaciones, 178, 179-180
tratamiento térmico de, 114-115, 122-123, 127-132
velocidades de enfriamiento, efectos de, 265
Metales refractarios, 181-183
características y usos de, 181-182
molibdeno, 182
niobio, 182
tantalio, 183
tungsteno, 182
Metales y aleaciones no ferrosas, 134-136, 169-190, 332-336
aleaciones amorfas, 186
aleaciones con memoria de forma, 185
aleaciones de bajo punto de fusión, 183-185
aluminio, 170-174, 332
berilio, 183
características de, 170
cobre, 176-178, 332
espumas metálicas, 186
estaño, 184-185, 335
fundición de, 332-336
introducción a, 169
magnesio, 174-176, 332
metales preciosos, 185
metales refractarios, 181-183
molibdeno, 183
nanomateriales, 186-187
niobio, 183
níquel, 178-179
plomo, 183, 335
propiedades de, 335
superaleaciones, 179-180
tantalio, 183
titanio, 180-181
tratamiento térmico de, 134-136
tungsteno, 182
vidrios metálicos, 186
zinc, 184, 335
zirconio, 183
Metalurgia de olla, 154
Metalurgia de polvos (P/M), 483-512
aleación mecánica, 487, 488
atomización, 485-487
capacidades de proceso de, 508
carbonilos, 487
compactación, 490-499
consideraciones de diseño para, 505-507
deposición electrolítica, 487
deposición por rocío, 498-499
economía de, 508-509
ejemplos de, 496-497, 502-503, 504
extrusión, 497
factor de forma (SF), 489
formado de forma neta, 483
introducción a, 483-484
laminación, 497-498
materiales, troquel y matriz, 499
mezcla, 489-490
moldeo por inyección de polvos (PIM), 497
moldes cerámicos, 499
nanopolvos, 488
operaciones de acabado para, 503
polvos metálicos, producción de, 484-490
polvos microencapsulados, 488
prensado isostático, 494-497
reducción de, 487
riesgos de, 490
sinterización, 499-503
tamaño, forma y distribución de partículas, 488-489
trituración o pulverización, 487
Método(s)
de baño, 667
de cristalización progresiva, 313-314
de Deming, 1113-1114
de la zona flotante, 313-314
de niebla, 667-668
de reducción térmica, 176
de vidrio flotado, 522
electrolítico, 176
Juran, 1114
precursor de polímeros, 572
Métodos Taguchi, 1114-1119
desarrollo de, 1114-1115
diseño experimental, 1115
ejemplos de, 1117, 1119
función pérdida, 1116-1117
interacción de funciones del equipo, 1115
manufactura de televisiones utilizando, 1118
robustez, 1116
Metrología en ingeniería, *ver* Medición
Mezclas, 202
de polvos metálicos, 480-490
de gas para formado de láminas metálicas, 468
miscibles, 202
Microestereolitografía, 927-928
Microestructuras en aceros, desarrollo de, 123-125
Microfabricación LIGA, 920-927
ejemplo de, 924-925
litografía multicapa de rayos X, 925-926
proceso de, 920-923
proceso HEXSIL, 926-927
Microformado, hojas metálicas, 467
Micromanufactura, 865-867, 868-907
análisis de, 865-867
definición, 865
dispositivos MEMS, fabricación de, 908-935
dispositivos microelectrónicos, 868, 907
dispositivos MOS, 867
micromaquinado, 909-920
nanomanufactura, 866
sistemas microelectromecánicos (MEMS), 867, 908-935
Micromaquinado, 909-920
dispositivos MEMS, 909-920
ejemplo de, 913-971
proceso de, 909-920
proceso SCREAM, 917
proceso SIMPLE, 918
superficial, 910-912
unión por difusión de silicio y ataque con reactivo profundo (SFB-DRIE), 918
volumétrico, 910
Micrómetros láser, 1097-1098
Microporosidad, definición, 174
Microsegregación, definición, 266
Minimolinos, 365-366
Modelado
asistido por computadora, 13, 331-332, 1199-1203
de redes mediante ingeniería láser (LENS), 593
por deposición fundida (FDM), 584-586
Modelos, 291. *Ver también* Moldes
de bolas o esferas, 47-49
de placa bipartidos, 291
de una pieza, 291
diseño de, 291
divididos, 291
elaboración rápida de prototipos con, 291
fundición en arena, uso en, 291
Módulo
de corte, 78
de elasticidad (E), 68
de Poisson, 68
de rigidez (G), 78
de ruptura, 79
de Young, 68
elástico de plásticos reforzados, 247-248
Moldes, 262, 269-270, 286, 289-295, 312, 546-547. *Ver también* Modelos
arena para moldeo en verde, 290
arena, características de, 290-291
compósitos, 286
de bebedero caliente, 546-547
de caja fría, 290
de canal frío, 546
de materiales compósitos, 286, 312
desechables, 286
fundición, uso en, 262
fundición en arena, 289-291
lanzadores de arena, 293
llenado, modelado de, 269-270
máquinas para moldeo de arena, 292-293
moldeo con grafito compactado, 295
moldeo en vacío, 293
moldeo por impacto, 293
moldeo por inyección, 546-547
moldeo vertical sin caja, 293
permanentes, 286
proceso V, 293
sin cocción, 290
superior, uso de, en fundición, 290
Moldeado plástico de los cerámicos, 516-518
Moldeo
con insertos, 308, 547
de bolsa de vacío, 565-566
de grafito compactado, 295
de transferencia de resinas, 567
de vacío, 293
en cáscara, 295-296
por contacto, 566-567
por impacto, 293
por inyección de polvos (PIM), 497
por reacción-inyección (RIM), 551-552
por transferencia, 557-558
por transferencia/inyección, 567
rotatorio, 554-555
vertical sin caja, 293
Moldeo de espumas, 559-560
estructurales, 560
perlas de poliestireno, 559-560
poliuretano, 560
proceso de, 559-560
Moldeo por compresión, 556-557, 565
capacidades de proceso, 556-557
plásticos reforzados, 556-557
plásticos termofijos, 556-557
Moldeo por inyección, 518-519, 544-552
capacidades del proceso, 549-550
cerámico, 518-519
componentes múltiples, 547
de plásticos, 554-552
defectos en, 550
ejemplo de, 551
máquinas para, 550-551
moldeo con punto frío, 549
moldeo de insertos, 547
moldeo por reacción-inyección (RIM), 551-552
moldes para, 546
proceso de, 544-547
prótesis de cadera, manufactura, 547-549
sobremoldeo, 549
Moldeo por soplado, 552-554
de capas múltiples, 552, 553
ensanchado, 552, 553
extrusión, 552, 553
inyección, 552, 553
parisón, 552
plásticos, 552-554
Moleteado, 676, 690
Molibdeno, 157, 163-164, 182, 641-652
acero de alta velocidad serie M, 163-164, 652
características y usos de, 182
efecto en aceros, 157
maquinabilidad de, 641
producción de, 182
Molino(s)
de desbaste, 358
de laminación de conjunto, 358
de laminación de cuatro rodillos, 358
de laminación de tres rodillos, 358
de laminación dúo, 358
de laminación Pilger, 365
integrados, 365
Sendzimer, 358-359
Zl, 358
Monel, 178
Monocristal, 313-314
alabes, 313
crecimiento, 313-314
dopantes, 313
método de cristalización progresiva, 313-314
método de la zona flotante, 313-314
proceso Czochralski (CZ), 313-314
Monómero, definición, 194
Movimientos interfaciales relativos, 981

N

Nailons, propiedades de los, 210
Nanocerámicos, características de, 224
Nanofabricación, 21, 29

Nanomateriales, características y usos de, 186, 187
Nanopolvos, 488
Nanotubos, características de, 233
Negro de humo, 207
  uso de, 232
Nichrome, 179
Niobio, 157, 183
Níquel, 157, 178-641
  características y usos de, 178-179
  denominación de, 178
  efecto en aceros, 157
  hastelloy, 179
  inconel, 178
  invar, 179
  kovar, 179
  maquinabilidad de, 641
  monel, 178
  nichrome, 179
  producción de, 179
  propiedades de, 179
  superaleaciones, 178-180, 641
Nitruro de boro cúbico (cBN), 223, 662-663, 793
  abrasivo, uso como, 793
  características de, 223
  herramientas de corte, 662-663
Nitruro de silicio (Si_3N_4), 223, 663
  características de, 223
  cerámicos, 663
  herramientas de corte, 663
Nitruro de titanio (TiN), 223, 658
Nitruros, características de, 223
Nivel de calidad de aceptación (AQL), 1131
Normalizado, 139
Normas de calidad, 39, 656-657, 1119-1121
  análisis de, 1119
  International Organization for Standardization (ISO), 656, 657, 1119-1121
  norma QS 9000, 39, 1120
  serie ISO 1400, 1119-1120
  serie ISO 9000, 39, 1119-1120
Nucleación, 54-55
  homogénea, 263
Número(s)
  de Reynolds (Re), 270
  de calibre, 357-358
  de calidad del Deutches Institut für Normung (DIN), 755

O

Operación(es)
  de cepillado de mesa fija, 741-742
  de cepillado en mesa móvil, 741
  de matriz progresiva, 474
Orientación, definición, 204
  preferida, 58
Oro, características y usos de, 185
Outsourcing, definición, 30
Oxidación, 110, 877-878
  dispositivos microelectrónicos, 877-878
  húmeda, 878
  reacción química mediante, 110
  seca, 877-878
  selectiva, 878
Óxidos cerámicos, características de, 221-222
Oxígeno, efecto en el acero, 158

P

Palanquillas, 355
Pallets o tarimas, centros de maquinado, 763
Palpador o sonda de contacto, centros de maquinado, 764-765, 766
Pandeo, 88
Parison, definición, 552
Partes, sistemas de clasificación y codificación (C/C), 1211-1215
Partes intercambiables, 4
Partículas, 488-489, 515
  aditivos, 515
  cerámicos, materias primas para, 515
  de segunda fase, 117
  distribución, 489
  factor de forma (SF), 489
  polvos metálicos, 488-489
  tamaño, 488-489
Pasivación, 110-161
Paso de superficie, 355
Pelado, 540, 619
Películas, 540-541
  de polímeros, 540
  de termoformado, 555-556
  delgadas, 540
  plásticas, 540
  producción de, 540-541
  sopladas, 540-541
Penetración, 381-382
  hojas metálicas, 449
Pérdida por histéresis, elastómeros, 214
Perforado o niblado en operaciones de cizallamiento, 430-431
Perforado rotativo de tubo, 364-365
Perlita, 124, 126, 127
  estructura de, 124
  fina, 127
  gruesa, 127
  hierro gris perlítico, 126
  tratamiento térmico de, 127
Pewter, 184-185
Picado, definido, 110
Piezas en bruto, 426, 431-432, 452-453, 458-472
  cizallado de, 426
  consideraciones de diseño para, 472
  embutido profundo, uso en, 452-453
  placa de sujeción, 452, 458
  soldado a medida, 431-432
  soldado a tope, 431-432
Pirofórico, definición, 174
Pirólisis, proceso de, 242, 543
Pirometalurgia, 178
Placas, características de, 348-349
Placas, defectos en el laminado, 356-357
Planchado, prácticas de embutido profundo, 457
Planchón, definición, 355
Planeación de procesos asistidos por computadora (CAPP), 35, 1204-1206
  concepto de, 35
  elementos de, 1205
  hoja de ruta, 1204
  planeación de recursos de manufactura (MRP-II), 1205-1206
  planeación de requerimientos de materiales (MRP), 1205-1206
  sistema generador, 1205
  sistema variante, 1205
Planeación de recursos para manufactura (MR-II), 1205-1206
Planeación de requerimientos de materiales (MRP), 1205-1206
Plano de clivaje, 91
Planos basales, definición de, 47
Plasma, definición, 946
Plásticos, 202, 214-215, 534-561, 572-579. *Ver también* Polímeros; Plásticos reforzados
  características de, 535
  consideraciones de diseño para, 572-573
  definición, 192
  economía del procesamiento, 574
  elastómeros, 202, 214-215
  formado de fase sólida, 560-561
  formado en frío, 560-561
  formado y moldeo de, 534-579
  fundición, 558-559
  introducción a, 534-536
  moldeo de espumas, 559-560
  moldeo por compresión, 556-557
  moldeo por inyección, 544-552
  moldeo por soplado, 552-554
  moldeo por transferencia, 557-558
  moldeo rotatorio, 554-555
  pelado, 540
  película soplada, 540, 541
  películas, producción de, 540-541
  pellets (partículas), 541
  perlas de poliestireno, 559-560
  proceso de coextrusión, 540
  proceso de extrusión, 536-539
  reacción-inyección (RIM), 551-552
  reforzado con fibra de vidrio (GFRP), 241
  reforzados con fibra (FRP), 239, *ver* Plásticos reforzados
  reforzados con fibra de carbono (CFRP), 242
  termoformado, 555-556
  tubería rígida, 540
  tubos y tuberías, 539-540
Plásticos biodegradables, 212-214
  aplicaciones de, 213
  desperdicios agrícolas, 213
  fermentación del azúcar, 213
  reciclado de, 213-214
  símbolos de reciclado para, 213
  sistema de base almidón, 212-213
  sistema de base láctica, 213
  uso y desarrollo de, 212
Plásticos reforzados, 239-251, 562-570. *Ver también* Fibras
  aplicaciones de, 248-251
  compósitos de matriz metálica (MMC), comparación con, 251
  compuesto de moldeo grueso (TMC), 565
  compuesto de moldeo volumétrico (BMC), 565
  compuesto para moldeo de hojas (SMC), 563-565
  compuestos de matriz de polímero (PMC), 239, 562
  consideraciones de calidad en el procesamiento, 570
  definición, 239
  delaminación de, 245
  devanado de filamentos, 568-569
  ejemplos de, 249-251, 567-568, 570
  estructura de, 239-244
  extracción de fibras, 245
  fibra de carbono (CFRP), 242
  fibra de vidrio (GFRP), 241
  fibras de refuerzo para, 241-244
  fibras, 239, 241-244
  impregnado de fibras, 563-565
  materiales para la matriz en, 244
  módulo elástico de, 247-248
  moldeo, 565-567
  preimpregnados, 563
  procesamiento de, 244-248
  propiedades de, 244-248
  pulformado, 569
  pultrusión, 569
  reforzado con fibras (FRP), 239
  resistencia de, 247-248
Plásticos termofijos, 197, 204-206, 211, 244, 554-559, 641, 1029
  aplicaciones de, 211
  características de, 206-207
  estructura de, 197
  fundición, 558-559
  maquinabilidad de, 641
  materiales para matrices, como, 244
  moldeo por compresión, 556-557
  moldeo por transferencia, 557-558
  moldeo rotativo, 554-555
  operaciones de unión, 1029
  propiedades de, 211
  reacción de cadena cruzada, 206
  reacción de curado, 206
Plastificantes, 207
Plata, características y usos de, 185
Platino, características y usos de, 185
Platos de arrastre, uso de, 689
Plegado, 1025
  o doblez de bordes, hojas metálicas, 450
Plomo, 157, 183, 335
  aleación para soldadura blanda, 181-184
  aleaciones fundidas con base plomo, 335
  características y usos de, 183
  efecto de, en aceros, 157
  galena, 184
Polea grande, uso de, 420
Poliacrilonitrilo (PAN), uso como precursor, 242-243
Poliamidas, propiedades de, 210
Policarbonatos, propiedades de, 210
Policristales, definición, 54
Poliésteres, propiedades de, 210-211
Poliestireno, 210, 559-560
Polietilenos, propiedades de, 210
Poligonización, definición, 59
Poliimidas, propiedades de, 210, 211
Polimerización, 194-199
  adición, 195
  condensación, 195
  copolímeros,197-198
  de crecimiento en cadena, 195
  de crecimiento por pasos, 195
  de reacción en cadena, 195
  de reacción por pasos, 195
  definición, 194
  distribución de peso molecular (MWD), 195
  ejemplo de, 198-199
  enlaces químicos, 196
  grado de (DP), 196
  homopolímero, 197
  peso molecular, 195
  polímeros de cadena cruzada, 196
  polímeros de red, 197
  polímeros lineales, 196
  polímeros ramificados, 196-197
  por adición, 195
  por condensación, 195
  reacción en cadena, 195
  reacción en pasos, 195
  reacción, 194
  terpolímeros, 197
  vulcanización, 197, 214
Polímeros, 191-218, 239-251, 540, 542-543, 641, 771. *Ver también* Plásticos; Plásticos reforzados; Termoplásticos; Plásticos termofijos
  aditivos en, 207-208
  amorfos, 199
  Baquelita, 192
  características de quemado, 208
  celuloide, 192
  celulosa, 192
  concretos, 771
  cristalinidad, 199-200
  de cadena cruzada, 197
  de enlace cruzado o entrelazados, 197
  definidos, 194
  dopaje, 206
  ejemplos de uso de, 198-199, 206, 212
  elastómeros, 202, 214-215
  eléctricamente conductores, 206
  en red, 197
  estructura de, 193-202
  estructura molecular de, 194
  estructuras de las máquinas herramienta, 771
  fibras, 243, 542-543
  fibras aramídicas, 243
  fibras de refuerzo, producción de, 542-543
  fundido, producción de fibra torcida a partir de, 243
  historia de, 192-193
  hojas, producción de, 540
  hules, 214-215
  introducción a, 191-193
  Kevlar, 243
  lineal, 196
  lineales, 196
  maquinabilidad de, 641
  materiales orgánicos naturales, de, 192
  mezclas, 202
  monómeros, 194
  orgánicos sintéticos, 193
  películas, producción de, 540
  películas delgadas, producción de, 540
  peso molecular, 193
  plásticos biodegradables, 212-214
  plásticos reforzados, 239-251

plásticos termofijos, 204-206, 211
polimerización, 194-199
propiedades mecánicas de, 192
ramificados, 196-197
rayón, 192
reciclamiento, 213-214
red, 197
sintéticos, 193
temperatura de transición vítrea (Tg), 200-201
térmicamente conductores, 206
termoplásticos, 202-206, 208-211
torcido, 243, 542-543
ventajas de, 191-192
Polimorfismo, 48
Polipropilenos, propiedades de, 210
Polisulfonas, propiedades de, 210-211
Poliuretano, 215, 560
Polvos metálicos, *ver* Metalurgia de polvos (P/M)
Polvos microencapsulados, 488
Porcelana, características de, 211
Porosidad, 277-279, 325, 326, 962. *Ver también* Contracción
cavidad por contracción, 279
contracción, 277
diseño para evitar la, 325, 326
enfriadores, 277
fundición metálica, causas de, 277-279
gases, acumulación de, 278
microporosidad, 277
puntos calientes, 325-326
reducción de, 277
soldaduras, 962
Potencia para operaciones de corte, 620-623
Precipitados, definidos, 134
Precisión dimensional, importancia de, 29
Preimpregnados, 563
Prensado, 494-497, 518-519, 523-524
cerámicos, 518-519
en caliente, 519
en húmedo, 518
en seco, 518
isostático, 494-497, 518
metalurgia de polvos (P/M), 494-497
proceso de prensa y soplado, 523
vidrio discreto, 523-524
Prensado isostático en caliente (HIP), 494-497, 519
cerámico, 519
metalurgia de polvos (P/M), 494-497
Prensado isostático en frío (CIP), 494-495
Prensas, 390-392, 414-415, 424-426, 474-476
estampado, 424
extrusión, 414-415
forjado, 390-392
formado de hojas metálicas, 474-476
hidráulicas, 391, 414-415
mecánicas, forjado, 391
selección de, 475-476
tipos de, 474
Prensas de tornillo, forjado, 392
almohadillas o peines para roscar, 702
consideraciones de diseño de, 702-703
corte, 700-403
definición, 700
machueleado, 701
machuelos, 700
medición de, 1093
rectas, 700
Prensas hidráulicas, 391, 414-415
extrusión, 414-415
forjado, 391
horizontales, 414
verticales, 415
Preparación de obleas, 874-875
Presión hidrostática, 76
Primero las ganancias, organización para la manufactura, 41
Probabilidad, definida, 1130
Procesamiento
de estado pastoso, 311
de fase líquida, compósitos de matriz metálica, 570-571
de polímeros, 23
termoquímico, 141
Proceso(s)
a la cera perdida, 300-303. *Ver también* Fundición por revestimiento
aditivo, 583-593
Antioch, 296
convencional de fundición, 312
Czochralski (CZ), 313-314, 874
de deformación volumétrica, 21
de cámara caliente, fundición a presión en matriz, 306
de cámara fría, fundición a presión en matriz, 306-307
de cuchilla de doctor, 516-517
de electromigración, 895-896
de laminación de relevado, 355
de laminación en frío, 355
de laminado de forma, 360-365
de laminado en caliente, 354-355
de laminado en conjunto, 355
de moldeado, 345
de molde completo, *ver* Fundición de modelo evaporativo
de planarización, 896
de reducción, polvos metálicos, 487
de síntesis química, 571-572
de soldadura con electrodo consumible, 948-954
de soldadura con electrodo no consumible, 944-947
de sol-gel, 571-572
de solidificación direccional, 312
de torneado, 518
Guerin, 460
HEXSIL, 926-927
Hooker, 412
Mannesmann, 364-365
por hundimiento o asentamiento, 525
SCALPEL, 883
SCREAM, 917
Sejournet, 408
SIMPLE, 918
sustractivo, 582-583
V, 293
Procesos de moldeo, 293, 295, 497, 518-519, 544-558, 565-568, 574
características de la producción, comparativo, 574
cerámicos, 518-519
compresión, 556-557, 565
de bolsa de vacío, 565-566
de contacto, 566-567
de plásticos, 544-554, 559-560
de transferencia, 557-558
de transferencia de resinas, 567
de vacío, 293
ejemplos de, 567
en cáscara, 295-296
insertos, 308, 547
inyección, 518-519, 544-552
inyección de polvos (PIM), 497
moldeo de espumas, 559-560
moldeo de grafito compactado, 295
moldeo vertical sin caja, 293
plásticos reforzados, 565-568
por impacto, 293
reacción-inyección (RIM), 551-552
rotomoldeo, 554-555
soplado, 552-554
transferencia/inyección, 567
Producción, 2, 11-14, 30, 40-41
definición, 2
económica, consideraciones de diseño para, 40-41
nominal, 30
proceso de diseño, 11-14
tendencias de manufactura en, 41
virtual de prototipos, 14, 594
Producción justo a tiempo (JIT), 35, 1225-1227
concepto de, 35, 1225
ejemplo de, 1227
kanban, 1226-1227
sistema de empuje, 1226
sistema de tracción (o de jale), 1226
uso de, 1226
ventajas de, 1226
Producción por lotes, 31
Producción rápida de prototipos, 14, 291, 580-602
alineadores (o frenos) ortodóncicos, manufactura, 595-596
características de, 582
curado de piso sólido (SGC), 592-593
diseño de producción, 14
ejemplos de, 587-588, 590-591, 598-599
estereolitografía (SLA), 586-587
formado neto mediante ingeniería láser (LENS), 593
introducción a, 580-582
manufactura de objetos laminados (LOM), 592
manufactura de partículas balísticas, 589-590
manufactura directa, 594-596
manufactura rápida (RM), 594-595
modelado por deposición de material fundido (FDM), 584-586
modelos para fundición en arena, técnicas para, 291
operaciones, 580-602
proceso aditivo, 583-593
proceso sustractivo, 582-583
producción virtual de prototipos, 594
propiedades mecánicas de los materiales, 582
sinterización láser selectiva (SLS), 588-589
Productividad, definida, 4
Productos, 2, 13, 38-39, 1110-1141, 1238-1277
administración de la calidad total (TQM), 38
análisis de valor, 1266-1267
aseguramiento de la calidad, 38-39, 1110-1141
calidad, 1110-1112,1242-1243
capacidades de procesos de manufactura, 1253-1257
ciclo de vida, 13, 1244-1246
confiabilidad, 1131
continuos, 3
control estadístico de calidad (SQC), 1121-1123
control estadístico de proceso (SPC), 1124-1131
costos de manufactura, 1261-1268
defectos, niveles de, 38
definición, 2
diseño, 11-14, 1238-1242
ensayos destructivos, 1136
ensayos no destructivos, 1132-1136
expectativa de vida, 1112, 1243-1244
ingeniería concurrente para contenedores de solución intravenosa, 1267-1268
inspección automatizada, 1137
integridad, 38
kaizen, 1111, 1242
manufactura sustentable, 1245-1246
normas de calidad, 1119-1121
reducción de costos, manufactura, 1261-1268
responsabilidad, 39
retorno económico por calidad (ROQ), 1112, 1243
selección de materiales, 1246-1250
selección de procesos, 1257-1261
sustitución de materiales, 1250-1252
Productos discretos, 3
de vidrio, 523-524
Proeutectoide, 124
Profundidad de corte, 607-609, 798
grano, operaciones de rectificado, 798
operaciones de corte, 607-609
piedras o discos, operaciones de rectificado, 798
Programación, manufactura NC, 1160
Propiedades de los materiales, 16, 64-101, 102-114, 208-211, 214-215, 224-227, 230-231, 238-258, 333, 335, 501-502, 582, 647-652
aceros, 159
aceros inoxidables, 162
agrietamiento por esfuerzo-corrosión, 94, 96, 110
aleaciones fundidas, 333
calor específico, 106-107
calor y temperatura, 96-97
cerámicos, 219-229, 231-232
compósitos, 238-258
compresión, 76-77
conductividad eléctrica, 108-109
conductividad térmica, 107
curvas esfuerzo-deformación, 65-68, 70-71, 73-74
densidad, 103-106
dilatación térmica, 107-108
doblado, 78-79
ductilidad, 69
dureza, 79-84, 647-648
efecto piezoeléctrico, 19
efectos de la presión hidrostática, 76
efectos de la radición, 76
efectos de la temperatura, 73-74
efectos de la velocidad de deformación, 74-76
ejemplo para la selección de, 110-111
elastómeros, 215
ensayo de tensión, 65, 71-73
ensayos, 64-101
esfuerzo real y deformación real, 69-70
esfuerzos residuales, 94-96
estabilidad química, 648
falla, 87-94
fatiga, 83-85
ferrimagnetismo, 109
ferromagnetismo, 109
fibras de refuerzo, 242
físicas, 16, 102-113, 226-227, 231
formación de cuello, deformación en el, 71-73
fractura, 68, 87-94
herramientas de corte, 647-652
hierros grises fundidos, 335
hules, 214-215
impacto, 87, 648
introducción a, 64-65, 102
magnetostricción, 109
manufactura, 64-101
mecánicas, 16, 64-101, 159, 162, 192, 225-226, 231, 333, 335, 501-502, 582
ópticas, 109, 200, 227, 231
plásticos, 192
plásticos reforzados, 244-248
plásticos termofijos, 211
polvos metálicos, 501-502
producción rápida de prototipos, 582
punto de fusión, 106
químicas, 17, 648
resistencia a la corrosión, 109-111
resistencia al desgaste, 648
resistencia al impacto térmico, 648
sinterización, 501-502
superplasticidad, 76
tensión, 65-76
termofluencia, 86-87
termoplásticos, 208-211
tipos de, 16
torsión, 78
vidrios, 230-231
Propiedades ópticas de los materiales, 109, 200, 227, 231
cerámicos, 227
polímeros, 200
tipos de, 109
vidrios, 231
Prototipo(s),
en el diseño de producción, 14
uso de, 580

Proyectores ópticos de perfiles, 1093
Prueba(s)
  Brinell, 80
  de doblado, 79
  de recalcado, 385
  de templabilidad del extremo templado, 132-133
  destructivas, 970-971, 1136
Pulformado, 569
Pulido, 823
  químico-mecánico, 823-824
Pultrusión, 569
Punto de fusión, definición, 106
Punto neutral, laminado plano, 350
Puntos calientes, consideraciones de diseño de fundición, 325
Punzonado de cavidades, clavado, 382-383

R

Radiación, efectos en los materiales, 76
Radiación infrarroja, corte, 626
Radio de punta, operaciones de torneado, 678
Rango de congelación, 264
Rasurado, 619, 753
Reacondicionamiento, 664-665, 711-712
Rebaba, 480, 705, *Ver también* Rebabeo
Rebabeo, 748, 825-828
  acabado vibratorio, 826
  chorro de arena o abrasivo, 826
  energía térmica, 826
  maquinado de flujo abrasivo, 826, 827
  operación de, 825-828
  operaciones de limado, 748
  procesos, 825
  robótico, 826-828
Rebordeado, hojas metálicas, 447
Recalcado, definición, 373
Rechazado de tubos, 463
Rechupe, desarrollo de, en lingotes, 154
Reciclamiento, 18, 33, 213-214
  consideración para la selección de materiales, 18
  diseño para el reciclaje (DFR), 33
  plásticos, símbolos para, 213
  plásticos biodegradables, 213-214
Recocido, 58-60, 137, 139-142, 525-527, 528
  bainitizado (ausrevenido), 140-141
  completo, 139
  cristal a prueba de balas, 527
  de proceso, 139-140
  de relevado de esfuerzos, 96, 140
  definición de, 58
  en proceso, 139
  esferoidizado, 139
  esferoidizante, 139
  estirado (trefilado), 140
  intermedio, 139
  martemplado, 141
  normalizado, 139
  operación de acabado, como, 528
  proceso, 139, 140
  proceso estructural, 58-60
  proceso físico, 139
  proceso termoquímico, 141
  relevado de esfuerzos, 140
  revenido, 140, 526
  subcrítico, 139
  técnicas para, 525-527
  temperatura, 139
  templado químico, 526
  temple interrumpido, 141
  temple térmico, 526
  total, 139
  usos de, 137
Recristalización, 58-60
Rectificación, 745, 794-796, 796-798, 798-808, 808-818, 845-846, 850-851
  agrietamiento por calor, 803
  alta remoción de material mediante, 815
  aplanamiento, 801
  chispas, 803
  cilíndrica, 810-811
  consideración de diseño para, 818
  de avance lento, 815
  de cuerdas, 811-812
  de dientes de engranes, 754
  de roscas, 811-812
  de superficie, 809-810
  definición de, 798
  discos o piedras, 794-798, 804-807
  ejemplos de, 802, 805, 812-813
  electroquímica (ECG), 845-846
  energía específica, 801-802
  esfuerzos residuales, 803
  fluidos, 816-817
  fuerzas, 800-801
  interna, 813
  máquinas, 808-818
  operaciones, 808-818
  por descarga eléctrica (EDG), 850-851
  proceso, 798-808
  profundidad de corte del disco, 798
  profundidad de corte del grano, 798
  quemado, 803
  relación, 805
  revenido, 803
  seguridad en, 817-818
  sin centros, 813-814
  temperatura, 802-803
  traqueteo, 817
Rectificado cilíndrico, 810-811
Rectificado de avance lento, 815
Rectificado por banda, terminado mediante, 820-821
Rectificado por descarga eléctrica o electroerosión (EDG), 850-851
Recubrimiento, 1062, 1067, 1069-1073
  electrodeposición, 1069-1072
  electroformado, 1069, 1072-1073
  iónico, 1067
  mecánico, 1062
  sin electricidad, 1069, 1073
Recubrimientos, 254, 656-661, 1054, 1063-1068, 1073-1078 *Ver también* Recubrimiento
  características de, 658
  carbono similar al diamante (DLC), 1077
  carburo de titanio, 659
  cerámicos, 659, 1075-1076
  compósitos en, ejemplos de, 254
  de conversión, 1054, 1073-1074
  de fases múltiples, 659-660
  deposición física de vapor (PVD), 657-658, 1065-1067
  deposición química de vapor (CVD), 657-658, 1067-1068
  deposición química de vapor de temperatura media (MTCVD), 658
  diamante, 660, 1076-1077
  difusión, 1068
  esmaltes de porcelana, 1075
  herramientas de corte, 656-661
  materiales para, 657-661
  métodos de, 657-661
  nitruro de titanio, 659
  orgánicos, 1075
  pintado, 1077-1078
  proceso de inmersión en caliente, 1074
  procesos de deposición de vapor, 1065-1068
  procesos de rocío térmico, 1063-1065
Recuperación, 58-59
Recuperación elástica, 443-444
  compensación para, 444
  definido, 443
  fórmula para, 443
  negativo, 444
Redes neuronales artificiales (ANN), 35
Reducción de área, 69
Refinación, 154
Refinación por inyección, 154
Refinamiento secundario, 154
Refractarios, definición, 181
Regla de Chvorinov, 272
Regla de la palanca, 119
Reglas de Hume-Rotery, 116
Relación límite de embutido (LDR), 453
Relación resistencia a peso, 104
Relación rigidez a peso, 104
Relaciones estructura-propiedad, 53, 265-267
Remaches, 1024
Rendimiento, dispositivos microelectrónicos, 900
Reofundición o en estado viscoso, 267, 312
Repujado o realzado, práctica de dibujo profundo, 457-458
Requerimientos seis sigma, 38, 1123
Resistencia
  a la flexión, 79
  a la ruptura transversal, 79
  a la tensión, 68
  al mellado, hojas metálicas, 437
  de los plásticos reforzados, 247-248
  dieléctrica, definida, 108
  específica, 104-106
  última a la tensión (UTS), 68, 73
Resistividad eléctrica, definición de, 108
Retardantes a la flama, plásticos, 208
Retorno económico por calidad (ROQ), 1112, 1243
Revenido, 129, 137, 140
  definido, 129
  endurecimiento superficial, uso para, 137
  proceso de recocido, 140
Revestimiento, chapeado, 405, 1062
Revestimiento, definición, 301
Revolución industrial, 4
Rigidez, 68, 772
  específica, 104-105
Rimado o escariado, 690, 714-715
  función del torno para, 690
  proceso de, 714
  rimas o escariadores, 714-715
Robots, 1165-1171, 1185
  aplicaciones de, 1170-1171
  clasificación de, 1168-1170
  componentes de, 1166-1168
  controlados numéricamente, 1169
  de secuencia fija, 1168
  de secuencia variable, 1168
  diseño para el ensamble mediante, 1185
  historia de, 1165-1166
  industriales, 34
  inteligentes, 1169-1170
  reproductor de movimientos, 1169
  selección de, 1171
Rociado de combustión, 1063-1065
Rompevirutas, 616-618, 656, 743
  brochas, características en, 743
  características de corte, 616-617
  uso de, 616-618
Rugosidad, superficie, 1040-1042
Ruptura, 86

S

Salida, 326, 350, 388
  ángulos, 388
  diseño de fundición, consideraciones para, 326
  laminación plana, máxima posible, 350
Seccionado, 291, 676, 690
  agentes, 291
  formas producidas por, 676
  funcionamiento del torno para, 690
  línea de, 290
Segregación
  inversa, definida, 267
  normal, definición, 266
  por gravedad, definida, 267
  tipos de, 266-267
Selenio, efecto en aceros, 157
Semiconductores, 109, 872-874
  arseniuro de galio, 873-874
  definición, 109
  dispositivos microelectrónicos, 872-874
  silicio, 872-874
Sensibilidad a las muescas, 87
Sensores (detectores), 1171-1176
  análisis de, 1171-1172
  clasificación de, 1172
  de contacto o tactilar, 1173
  ejemplo de aplicación de, 1175
  en línea, 1100
  fusión, 1175
  inteligentes, 1175
  tecnología de, 1171-1176
  visual, 1173-1174
Severidad al temple, 133
Sialón, 223, 663
Silano, 241, 245
Silicato de aluminio litio, características de, 225
Sílice, 224, 230
Silicio, 157, 872-874
  dispositivos microelectrónicos, 872-874
  efecto en aceros, 157
  estructura de, 873-874
Siliconas, propiedades de, 211, 215
Sinterización, 499-503, 519, 588-589
  cerámicos, 519
  ejemplo de, 502-503
  hornos de sinterización continua, 500
  mecanismo de difusión, 500
  mecanismos, 500
  proceso de, 499-503
  propiedades mecánicas de, 501-502
  sinterización selectiva láser (SLS), 588-589
  temperatura y tiempo, 499
  transporte de la fase vapor, 500
Sistema(s)
  de administración ambiental (EMS), 1120
  de clasificación y codificación (C/C), 1211-1215
  de contorneado, manufactura NC, 1157
  de control, manufactura NC, 1157-1159
  de dos fases, 117
  de fase, 117
  expertos (ES), 15, 35
  hierro-carbono, 121-123, 123-125
  KK-3, 1215
  MultiClass, 1215
  nanoelectromecánicos (NEMS), 21
  Opitz, 1213
  punto a punto, manufactura NC, 1157
  Unificado de Numeración (UNS), 158, 173
Sistemas automatizados, 34-35, 1100-1101, 1137
  detector en línea, 1100
  ensamble, 35, 1180-1183
  inspección, 1137
  manejo de materiales, 34
  medición con, 1100-1101
  rimado o escareado, 131
  tecnología de los detectores, 1137
Sistemas de ensamble, 35, 1180-1183, 1184-1185
  asíncronos, 1182
  concepto de, 35
  continuos, 1182
  desarrollo de, 1180
  diseño de, 1184-1185
  flexibles, 1182-1183
  síncronos, 1181-1182
Sistemas flexibles de manufactura (FMS), 35, 1151, 1221-1224
  concepto de, 35
  desarrollo de, 1151
  ejemplo de, 1223-1224
  elementos de, 1222-1223
  justificación económica de, 1223
  programación, 1223
  uso de, 1221-1222
Sistemas microelectromecánicos (MEMS), 21, 867, 908-935, *ver también* Dispositivos microelectromecánicos (dispositivos MEMS)
  acelerómetro para bolsas de aire automotrices, manufactura de, 928-932

definidos, 908
fabricación de dispositivos, 908-935
importancia de, 21
introducción a, 867, 908-909
Sobrecalentamiento, grado de, 271
Sobreenvejecimiento, 136
Society of Automotive Engineers (SAE), denominaciones para aceros, 158
Soldabilidad de los materiales, 1010
Soldabilidad de los materiales, 968-969
Soldadura, 938-939, 940-979, 980-1002, 1003-1009, 1009-1014
a tope por presión (FW), 992-994
blanda, aleaciones para 183-184, 939, 1003-1004, 1009-1014
categorías de, 938-939
con electroescoria (ESW), 953-954
con hidrógeno atómico (AHW), 947
consideraciones de diseño de, 971-972
de arco, 944-947, 948-954, 954-956
de arco con núcleo de fundente, 925-953
de costura, *ver* Soldadura por resistencia (RW)
de costura por resistencia (RSEW), 990-991
de estado sólido, 939, 980-1002
de haz de electrones (EBW), 956
de materiales ferrosos, 969
de materiales no ferrosos, 969
de oxígeno y combustible gaseosos (OFW), 941-944
de pernos por presión y alta corriente (SW), 994
economía de, 998-999
ejemplos de, 957-958, 974
eléctrica por gas (EWG), 953
en frío (CW), 981-982
fuerte, 939, 1003-1009
por difusión (DFW), 996-998
por explosión (EXW), 995-996
por fricción (FRW), 983-986
por fusión, 938, 940-979
por gas de presión, 944
por haz de electrones (EBW), 956
por percusión (PEW), 994
por puntos, *ver* Soldadura de puntos por resistencia (RSW)
por rayo láser (LBW), 956-958
por resistencia (RW), 986-995
por resistencia de alta frecuencia (HFRW), 991-992
por resistencia de proyecciones
procesos de electrodo consumible, 948-954
procesos de electrodo no consumible, 944-947
prueba de soldaduras, 969-971
selección de proceso, 972-974
ultrasónica (USW), 982-983
unión por laminado, 981-982
Soldadura blanda, 939, 1003-1004
aplicaciones de, 1013
consideraciones de diseño para, 1014
de olas, 1012
ejemplo de, 1012-1013
fundentes, 1010
proceso de, 1009
proceso de unión, 939, 1003-1004
reflujo, 1011-1012
soldabilidad de los materiales, 1010
técnicas de, 1010-1013
tipos de, 1009-1010
Soldadura con oxígeno y combustible gaseosos (OFW), 941-944
equipo para, 943-944
metales de relleno, 944
pasos para, 943
proceso de, 941-944
soldadura por gas a presión, 944
tipo flama, 942
Soldadura de estado sólido, 939, 980-1002
introducción a, 980-981
movimientos interfaciales relativos en, 981
presión en, 980
soldadura a tope por presión (FW), 992-994
soldadura de pernos por presión y alta corriente (SW), 994
soldadura en frío (CW), 981-982
soldadura por difusión (DFW), 996-998
soldadura por explosión (EXW), 995-996
soldadura por fricción (FRW), 983-986
soldadura por percusión (PEW), 994
soldadura por resistencia (RW), 986-995
soldadura ultrasónica (USW), 982-983
unión por difusión en, 980
unión por laminado, 981-982
Soldadura de puntos por resistencia (RSW), 987-990
botón de soldadura, 987
ejemplo de, 989-990
máquinas para, 988
pruebas, 989
Soldadura en frío (CW), 981-982
ejemplo de, 982
proceso de, 981
Soldadura fuerte, 939, 1003-1009
análisis de, 1003, 1004
diseño, 1009
fundentes, 1006
metales de relleno, 1005-1006
métodos de, 1007-1009
proceso de, 939, 1004-1005
resistencia de la unión, 1006-1007
Soldadura por arco, 944-956
con núcleo de fundente, 925-953
de plasma (PAW), 946-947
de tungsteno y gas (GTAW), 946
desarrollo de, 944
electrodos para, 954-956
electrogas (EGW), 953
escoria eléctrica (ESW), 953-954
hidrógeno atómico (AHW), 947
metal y gas (GMAW), 950-952
metálico protegido (SMAW), 948, 949
metálico y gas (GMAW), 950-952
plasma (PAW), 946-947
proceso de electrodo consumible, 948-954
procesos de electrodo no consumible, 944-947
sumergido (SAW), 948, 950
tungsteno y gas (GTAW), 946
Soldadura por fricción (FRW), 983-986
inercia, 984
lineal, 985
proceso de, 983-984
soldadura por agitación (FSW), 983-984
Soldadura por fusión, 938, 940-979
características de, 941
definición de, 938, 940
introducción a, 940-941
soldabilidad de los metales para, 968-969
soldadura con oxígeno y combustible gaseosos, 941-944
soldadura por arco, 944-947, 948-954, 954-956
soldadura por haz de electrones (EBW), 956
soldadura por rayo láser (LBW), 956-958
Soldadura por resistencia (RW), 986-995
de alta frecuencia (HFRW), 991-992
ejemplos de, 989-990, 995
proceso de, 986-987
soldadura a tope por presión (FW), 992-994
soldadura de costura (RSEW), 990-991
soldadura de pernos por presión y alta corriente (SW), 994
soldadura por percusión (PEW), 994
soldadura por proyección (RPW), 992
soldadura por puntos (RSW), 987-990
Soldaduras, 960-971
calidad de, 962-968
daño superficial a, 966
denominaciones de, 973
esfuerzos residuales en, 966-968
fusión incompleta de, 963
grietas en, 964-965
hojeamientos, 965-966
inclusiones de escoria en, 962-963
penetración incompleta de, 963
perfil de, 963-964
porosidad en, 962
prueba de, 969-971
relevado de esfuerzos de, 968
solidificación de, 960-961
unión, zonas de, 960-962
zona afectada por el calor, 961-962
Solidificación, 262-267, 271, 272-274. *Ver también* Dendritas
aleaciones, 263-265, 271
comportamiento tixotrópico en, 267
convección, 267
ejemplo de, 274
eutéctica, 264
frontal, 262
gradientes térmicos, 267
granos columnares, 262
metales puros, 262-263
microgravedad y, 267
patrón de, 271
regla de Chvorinov, 272
relaciones estructura-propiedad, 265-267
segregación, tipos de, 266-267
tiempo de solidificación, 272-274
velocidades de enfriamiento, efectos de, 265
zona de congelamiento, 264
zona pastosa, 264
Soluciones sólidas, 116-119
diagramas de fase, determinación mediante, 119
intersticial, 116
reglas de Hume-Rothery, 116
substitucionales, 116
Soluto, definición, 116
Soplado, vidrio discreto, 523-524
Soplado y proceso de soplado, 523
Sopladuras, definidas, 154
Soportes, 1176-1179, 1183-1184
consideraciones de diseño para, 1183-1184
del rodillo, laminado plano, 351
desarrollo de modulares, 1178-1179
dispositivo de cama de clavos, 1177
flexibilidad de, 1176
materiales de cambio de fase, 1177-1178
modulares, 1176-1177
sistemas inteligentes, 1176
sujeción de fuerza ajustable, 1177
usos de, 1176
Sujeción, mecánica, 939, 1004, 1023-1027
ajuste instantáneo o agarre, 1025
ajuste por contracción, 1026
aleaciones con memoria de forma, 126
consideraciones de diseño de, 1026-1027
engargolado, 1025
pespunteo y engrapado de metales, 1024-1025
plegado, 1025
prensado, 1026
preparación de orificios, 1023
proceso de unión de, 939, 1004
remaches, 1024
sujetadores roscados, 1023
ventajas de, 1023
Sujetadores roscados, 1023
Superacabado, 822
Superaleaciones, 178, 179-180
características y usos de, 179
con base de cobalto, 180
con base de hierro, 180
con base de níquel, 180
definición, 178
propiedades de, 180
Superconductores, 108, 529-530
cintas, producción de, 529-530
de alta temperatura (HTSC), 529
de baja temperatura (LTSC), 529
definición, 108
procesamiento de, 529
Superenfriados, definidos, 229
Superficie descarburada, 144
Superficie, 29, 137-138, 271, 357, 635-638, 809-810, 1034-1083
acabado, 29, 635-638
carbono similar diamante, 1077
chapeado o revestimiento, 1062
deposición de vapor, 1065-1068
desempeño de la parte, influencia de, 1034-1035
desgaste, 1046-1050
ejemplos de tratamiento, 1065, 1069, 1076
electrochapeado, 1069-1072
electroformado, 1069, 1072-1073
endurecimiento, 137, 138
endurecimiento por chispa, 1063
endurecimiento superficial, 1062
esmaltado de porcelana, 1075
estructura, 1037-1038
fluidos para trabajos de los metales, 1050-1055
fricción, 1043-1046
herramientas de corte, 635-638
implantación de iones, 1068
inmersión en caliente, 1074
integridad, 635-638, 1034, 1037-1038
introducción a, 1036, 1059-1060
limpieza, 1078-1080
lubricación, 1050-1051
pintura, 1077-1078
rectificación, 809-810
recubrimiento de diamante, 1076-1077
recubrimiento por difusión, 168
recubrimiento sin electricidad, 1069, 1073
recubrimientos de conversión, 1073-1074
recubrimientos orgánicos, 1075
revestido mecánico, 1062
revestimiento duro, 1062
rociado térmico, 1063-1065
rugosidad, 357, 1036, 1040-1042
tecnología, 1034-1083
tensión, efecto de, en la fluidez, 271
terminología de acabados, 1039
textura, 1038-1042, 1077
tratamiento láser, 1068-1069
tratamientos, 1059-1083
Superficies para pintado, 1077-1078
Superplasticidad, 76
Supervisión del acondicionamiento de herramientas, 634-635

T

Tablas de control, 38, 1124-1129
constantes, 1126
distribución de frecuencias, 1124
ejemplo de, 1128-1129
límites de control, 1124-1125
Shewart, 1124-1125
uso de, 38
Taconita, 150
Taladrado de cañones, 707-708
Taladrado, 675, 690, 704-714
broca helicoidal, 706
brocas, tipos de, 705-707
capacidades de, 706
consideraciones de diseño para, 714
de cañones, 707-708
dispositivos portapiezas, 714
ejemplo de, 710
especificaciones de tamaño, 710
fuerza de empuje, 709

guía para la resolución de problemas de, 71
máquinas, 712-714
materiales para brocas, 710
múltiple, 714
operación del torno para, 690
práctica de, 710-712
reacondicionamiento de brocas, 711-712
rebaba, creación de, 705
recomendaciones para, 711
torque, 709-710
trepanado, 708-709
velocidad de remoción de material (MRR), 709
vida de la broca, medición de, 712
Talleres, 31
Talleres de fundición, 316-317
automatización de, 317
definición de, 316
operaciones de, 317
Tambor, uso de, 420
Tamboreo, 77, 374
Tantalio, 157, 183, 641
características y usos de, 183
efecto en aceros, 157
maquinabilidad de, 641
Tarjetas de circuitos impresos (PCB), 901-903
Técnica de caja de volteo, 295
Tecnica de emisión acústica (AE), 635
Tecnología de circuitos integrados (IC), 868-870
Tecnología de grupos (GT), 35
Tecnología de la información (IT), uso de, en el mercado global, 42
Tela tejida, definición, 244
Telurio, efecto en aceros, 157
Temperatura, 59-60, 73-74, 90, 91, 200-203, 263-265, 623-626, 802-803
constante, 118
de corte, 623-626
de Curie, 121
de líquido, 118
de recocido, 139
de recristalización, 59-60
de sólido, 118
de transición de vidrio, 200-201
de transición vitrea, 200-201
de transición, 90, 91
distribución, 624-626
efectos en las curvas esfuerzo-deformación, 73-74
elevación, 96
eutectoide, 124-125
fem térmica, 626
gradiente térmico, 265
homóloga, 60
medición, técnicas en la zona de corte, 626
operaciones de rectificación, 802-803
papel de, en la conversión de trabajo a energía, 96-97
rango de congelación, 264
termopares, 626
termoplásticos, efectos de, en, 202-203
velocidades de enfriamiento, efectos de, 265
zona pastosa, 264
Templabilidad de los materiales, 132-134
aleaciones ferrosas, 132-134
banda, 132
definición de, 132
ensayo de Jominy, 132
medios de enfriamiento para, 133-134
prueba de extremo templado, 132-133
Temple de interrumpido, 141
Tenacidad, definición, 71
Tenacidad al impacto, 87, 648
Tensión, 65-76, 71-73
curvas esfuerzo-deformación, 65-68, 70-71
deformación en el cuello en, 71-73
ductilidad, 69
efectos de la presión hidrostática, 76
efectos de la radiación, 76
efectos de la temperatura, 73-74
efectos de la velocidad de deformación, 74-76
ensayo, 65, 71-73
esfuerzo real y deformación real, 69-70
materiales en, 65-76
superplasticidad, 76
Teorema de Bernoulli, 268
Térmico(a), 107-108, 265, 634, 648, 772, 826, 1063-1065
conductividad, 107
dilatación, 107-108
distorsión, diseño de máquinas herramienta, 772
esfuerzos, 107
fatiga, 108, 634
gradiente, 265
impacto, 108
rebabeo de energía, 826
resistencia al impacto, 648
rocío, 1063-1065
Terminado en tambor, 826
Termofijos, *ver* Plásticos termofijos
Termofluencia, 86-87, 204
deslizamiento en los límites del grano, 86
ensayo, 86
etapas de, 86
relajamiento de esfuerzos, 86-87, 204
ruptura, 86
termoplásticos, 204
Termoformado, 555-556
Termoplásticos, 202-206, 208-211, 244, 554-556, 558-559, 641, 797, 1027-1029
absorción de agua, 205
aglutinantes para discos para rectificación, 797
aplicaciones de, 208-211
características de, 202
colado, 558-559
cuarteaduras, 204
definición, 202
deformación uniforme, 204
degradación de, 203
ejemplo de, 206
envejecimiento térmico, 203
maquinabilidad de, 641
materiales para matrices, como, 244
moldeo rotatorio, 554-555
nombres comerciales de, 209
operaciones de unión, 1029-1030
orientación, 204
propiedades de, 208-211
propiedades térmicas y eléctricas, 205-206
relajamiento de esfuerzos, 204
sujeción mecánica, 128
temperatura, efecto de, 202-203
termofluencia o flujo plástico, 204
termoformado, 555-556
unión electromagnética, 1029
unión por adhesivos, 1028
unión por solventes, 1029
Terpolímeros, 197-198
Titanio, 158, 180-181, 223, 641
aleaciones forjables, 181
características y usos de, 180-181
comercialmente puro, 180
efecto en aceros, 158
esponja, 181
intermetálicos de aluminuro de titanio, 181
maquinabilidad de, 641
proceso Kroll, 181
producción de, 181
propiedades de, 181
Tixotrópico, 267, 311-312
comportamiento, 267, 311-312
formado de metal semisólido, en, 311-312
fundición, 267
tixoformado, 311
Toberas, 150
Tocho o *bloom*, definición de, 355
Tolerancias, 1101-1107
asignación de, 1103
características geométricas de, 1105-1106
control de, 1102-1103
dimensionales, 1102-1103
importancia de, en la manufactura, 1101-1102
Tolerancias dimensionales, 326-327, 357, 1102-1103
control de, 1102-1103
definición de, 1102
fundición, 326-327
medición de, 1102
metales laminados, 357
Torcedor, 243, 542
Torcida en seco, producción de fibra, 243
Torcido, 243, 461-463, 525, 542-543
al corte, 462-463
convencional, 461-462
de fibras de polímeros, 243, 542-543
de vidrio, 525
definido, 542
en gel, 542-543
en húmedo, 542
en seco, 243, 542
fundido, 243, 542
hojas metálicas, 461-463
proceso de, 461-463, 542-543
torcedor, 243, 542
Torneado, 607-608, 674-686, 696-700
ángulos de herramientas en, 678
capacidades de proceso, 696-697
capacidades de producción, 696
consideraciones de diseño para, 697-700
cortes de acabado, 681
cortes de desbaste, 681
definición, 607-608
ejemplos de, 685-686
fluidos de corte, 681, 685
formas producidas mediante, 674
fuerzas en, 679-681
guía para la resolución de problemas, 699
índice de remoción de material, 679, 685-686
introducción a, 674-676
parámetros y fórmulas para, 680
proceso de, 676-686
recomendaciones de herramientas para, 682-684
recomendaciones de materiales para, 682-684
velocidades de corte, recomendaciones para, 682, 684
Tornos, 686-703, 767
accesorios para, 689
automáticos, 691
bancada, 686
boquilla, 689
cabezal, 687
cabezal móvil, 687
capacidad de producción, 700-697
carro, 687
centros de torneado, 767
componentes, 686-687
controlados por computadora, 693-700
de banco, 691
de propósito especial, 691
de torreta, 692-693
dispositivos de sujeción del trabajo, 687-689
especificaciones de, 687, 688
historia de, 686
mandriles de centro, 689
mandriles de potencia, 689
máquinas de barra automática, 691-692
operaciones de, 675, 690-691
platos de arrastre, 689
tipos de, 691-696
tornillo de avance, 686
torreta, 692-693
trazador, 691
varilla de avance, 687
Torque, operaciones de taladrado, 709-710
Torsión, 78
Trabajado en frío, definido, 60
Trabajo, 54, 77, 96-97
a temperatura media, definido, 60
conversión de, a calor, 96-97
de prensado, 424
en caliente, definición de, 60
endurecimiento, 54
energía almacenada, 96
reblandecimiento, 77
Transferencia de calor, 271, 272-275
contracción, 275
efecto sobre capacidad de fundición, 271
fluidez de la fundición, efecto en, 271
fundición de metales, importancia en, 272-275
regla de Chvorinov, 272
tiempo de solidificación, 272-274
Transformación polimórfica, 122
Transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (MOFSET), 869, 871
Transmisiones de motores lineales, estructuras de las máquinas herramienta, 773
Transporte de fase vapor, 500
Traqueteo, 354, 697-700, 775-778, 817
factores que influyen en, 776
operaciones de laminación, 354
operaciones de rectificación, 817
operaciones de torneado, 697-700
reducción, 778
regenerativo, 776
resultados de, 775
vibración autoexcitada, 776
Tratamiento por solución, 135
Tratamiento térmico, 114-115, 122-123, 127-148
aceros inoxidables, 134
agrietamiento por temple, 129
aleaciones ferrosas, de, 127-132, 132-134
aleaciones no ferrosas, 134-136
austenita, importancia de, 122-123
austenita retenida, 129
bainita, 127-128
consideraciones de diseño para, 144
diagramas de transformación isotérmica (IT), 130
diagramas de transformación-tiempo-temperatura, 130-132
distorsión a partir de, 129
ejemplo de, 142
endurecimiento por precipitación, 134, 135-136
endurecimiento superficial, 136-137
esferoidita, 127
hornos y equipo para, 142-144
introducción a, 114-115
martensita, 128-129
martensita templada, 129
perlita, 127
recocido, 137, 139-142
revenido, 129
templabilidad, 132-134
transformaciones de fase mediante, 127-128
tratamiento por solución, 135
Tratamientos láser, 1068-1069
Tratamientos superficiales mecánicos, 1060-1062
Trayectorias de fractura intergranular, 92
Trayectorias de fracturas transgranulares, 92
Trazas de elementos, 158
Trepanación, 708-709
Triquitas, 244, 644
Trituración, polvos metálicos, 487
Tronzado, definición de, 607
Troquelado, 429, 839-841
definición, 429
fino, 429
fotoquímico, 840-841
químico, 839-840

Tungsteno, 158, 163-164, 182, 641, 652
acero de alta velocidad serie T, 163-164, 652
características y usos de, 182
efecto en aceros, 158
maquinabilidad de, 641
Turbulencia, flujo del fluido, 270

U

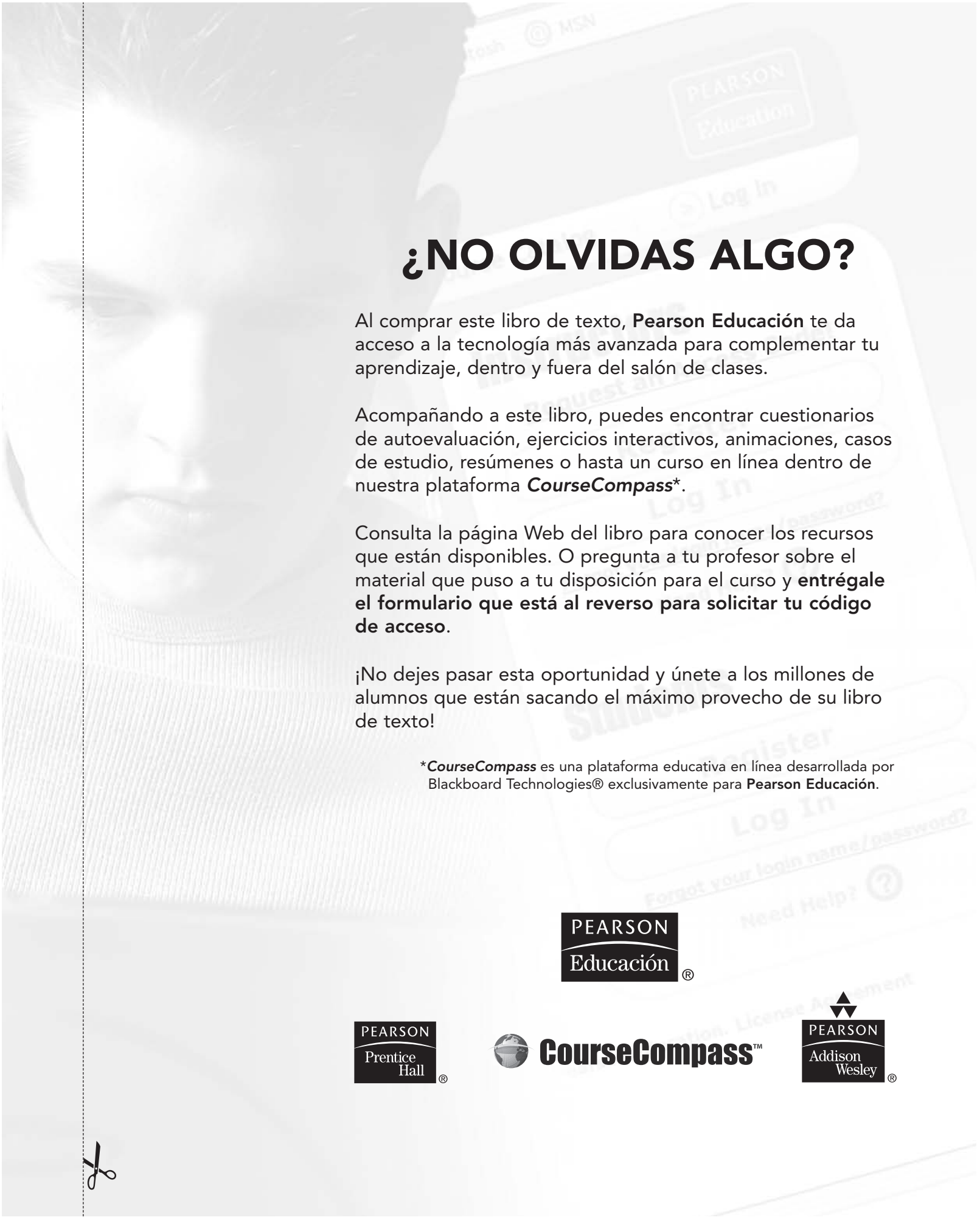
Ultraprecisión, 29, 782-783
capacidades de, 782
consideraciones para, 783
corte a régimen dúctil, 783
manufactura, 29
maquinado, 782-783
torneado de diamante, 782
Unido, 20, 25, 936-1033
cerámicos, 1029-1030
clasificaciones de la American Welding Society (AWS), 937-938
compactación de métodos, 939
definido, 936-937
economía de, 1030
importancia de, 936-937
introducción a, 936-939
plásticos termofijos, 1029
procesos de manufactura, tipos de, 20, 25
soldadura blanda, 939, 1003-1004, 1009-1014
soldadura de estado sólido, 939, 980-1002
soldadura fuerte, 1003-1009
soldadura por fusión, 938, 940-979
sujeción, mecánica, 939, 1004, 1023-1027
termoplásticos, 1027-1029
unión con adhesivos, 939, 1003-1004, 1014-1022
vidrios, 1030
Unión con adhesivos, 939, 1003-1004, 1014-2022
aplicaciones de la, 1018-1019
capacidad de proceso de, 1017-1018
consideraciones de diseño para la, 1019, 1020
curado con luz para productos médicos, 1020-1022
preparación de la superficie, 1017
proceso, 939, 1003-1004, 1014
Unión de cables, dispositivos microelectrónicos, 897-898
Unión por difusión de silicio y ataque con reactivo profundo (SFB-DRIE), 918
Uniones secundarias, 196
Urea, propiedades de, 211

V

Vacante, definición, 52
Valor, 2, 1266
agregado, 2
análisis, 1266
definido, 2
Vanadio, efecto en aceros, 158
Velocidad de avance, definición de, 607-608
Velocidad de deformación, 74-76, 203-204
endurecimiento, 74
exponente de sensibilidad, 74-76
materiales, efectos en, 74-76
Velocidad de remoción de material (MRR), 679, 685-686, 709, 710
ejemplo de, 710
operaciones de taladrado, 709
operaciones de torneado, 679, 685-686
Vibración, 354, 697-700, 775-778
amortiguamiento, 776-778
autoexcitada, 776
efectos de, 354, 697-700
forzada, 775-776
laminado, 354
operaciones de torneado, efectos de, 697-700
reducción, 778
resultados de, 775
ultrasónica, 419
Vida de las herramientas, 626-638, 785
Vidrios, 229-231, 513, 521-528, 1029-1030. *Ver también* Cerámicos vidriados; Fibras de vidrio
a prueba de balas, 527
categorías de, 521
comercial, 230
con 96% de sílice, 230
consideraciones de diseño de, 528
de aluminosilicato, propiedades de, 230
de borosilicato, propiedades de, 230
de sílice fundido, propiedades de, 230
de sosa-cal, propiedades, 230
definición de, 229
discretos, 523-525
duros, 230
en placa, 521-522
formado y moldeado de, 521-525
formador de vidrio, 230
fundición centrífuga, 525
hoja plana, 521-522
intermedios, 230
introducción a, 513
laminados, 526-527
metálicos, 229
metálicos, características y usos de, 186
método flotado, 522
modificadores, 230
operaciones de acabado de, 527-528
operaciones de unión, 1029-1030
plomo alcalino, propiedades de, 230
por hundimiento o asentamiento, 525
prensado, 523-524
procesamiento de, 521-528
proceso de estirado, 522
proceso de laminación, 522
propiedades de, 230
propiedades físicas de, 231
propiedades mecánicas de, 231
propiedades ópticas de, 231
recocido, 525-527
rotación, 525
soplado, 523-524
suaves, 230
superenfriamiento de, 229
técnicas de reforzamiento, 525-527
templado químico, 526
templado térmico, 526
templados, 526
tipos de, 230
tubos, 522-523
varillas, 523
Virutas, 607-609, 613-619, 700
aserrada, 615-616
borde acumulado o recrecido (BUE), 614-615
contacto controlado sobre las herramientas, 618
continuas, 613-614
corte oblicuo, 607-609
discontinuas, 616
eliminación por corte, 607-609
manejo, 700
materiales no metálicos, 618
rizo de viruta, 616
sistemas de recolección, 700
tipos de, 613-618
Viscosidad, 270
Vulcanización, 197, 214, 561

Z

Zinc, 184, 335
aleaciones fundidas con base de zinc, 335
características y usos de, 184-185
galvanizado, 184
producción de, 184
Zirconia, características de, 221
Zirconia parcialmente estabilizada (PSZ), características de, 221-222
Zirconio, 158, 183, 641
características y usos de, 183
efecto en aceros, 157
maquinabilidad de, 641
Zona(s)
de cizallamiento, operaciones de corte, 610-611
de deformación, 83
pastosa, 264
de metal muerto, 404-405



¿NO OLVIDAS ALGO?

Al comprar este libro de texto, **Pearson Educación** te da acceso a la tecnología más avanzada para complementar tu aprendizaje, dentro y fuera del salón de clases.

Acompañando a este libro, puedes encontrar cuestionarios de autoevaluación, ejercicios interactivos, animaciones, casos de estudio, resúmenes o hasta un curso en línea dentro de nuestra plataforma ***CourseCompass****.

Consulta la página Web del libro para conocer los recursos que están disponibles. O pregunta a tu profesor sobre el material que puso a tu disposición para el curso y **entrégale el formulario que está al reverso para solicitar tu código de acceso**.

¡No dejes pasar esta oportunidad y únete a los millones de alumnos que están sacando el máximo provecho de su libro de texto!

****CourseCompass*** es una plataforma educativa en línea desarrollada por Blackboard Technologies® exclusivamente para **Pearson Educación**.

PEARSON Educación®

PEARSON Prentice Hall®

CourseCompass™

PEARSON Addison Wesley®

SOLICITUD DE CÓDIGO DE ACCESO PARA *COURSECOMPASS*

DATOS DEL ALUMNO

Nombre completo | e-mail

DATOS DE LA INSTITUCIÓN

Nombre de la institución | Campus o Facultad

Dirección | Ciudad y estado | País

Nombre del profesor | e-mail del profesor

Nombre de la materia | Grado (Nº semestre, trimestre, etc.) | Nombre de la carrera

DATOS DEL LIBRO

Título | Edición | Autor | ISBN

¿Es el texto principal? Sí ◯ No ◯

¿Dónde adquiriste el libro?

¿Consideras adecuado el precio? Sí ◯ No ◯

¿Cuentas con una computadora propia? Sí ◯ No ◯

¿Cuentas con acceso a Internet? Sí ◯ No ◯

¿Cuentas con laboratorio de cómputo en tu escuela? Sí ◯ No ◯

¿Has utilizado anteriormente esta u otra plataforma en línea? Sí ◯ No ◯

¿Cuál?

¿Ayudó a mejorar tu desempeño? Sí ◯ No ◯

¿Por qué?

¿Utilizas actualmente algún otro libro de Pearson Educación? Sí ◯ No ◯

¿Cuáles?

1. Título | edición | Autor

Materia | Profesor | ¿CourseCompass? Sí ◯ No ◯

2. Título | edición | Autor

Materia | Profesor | ¿CourseCompass? Sí ◯ No ◯

PARA LLENAR POR EL PROFESOR

(Llenar una sola por grupo y entregar al frente con el resto de las solicitudes)

Clave del curso (Course ID)[1] | ISBN del curso[1]

Fecha de inicio del curso | Culminación | Límite para registro de alumnos[2]

Número de códigos solicitados | Total de alumnos en el grupo | Teléfono de contacto

¿Existe el libro en biblioteca? Sí ◯ No ◯ | Fecha de entrega de solicitudes

¿Le gustaría recibir información sobre otros materiales de Pearson Educación? Sí ◯ No ◯

[1] Entre a la sección **Course List** haciendo clic en la pestaña **Courses** de CourseCompass. La información aparece debajo de cada curso de su lista.
[2] En la sección **Course List**, hacer clic en el botón **Course Settings** de este curso y luego en la liga **Course Dates**. La fecha límite para inscripción aparece como **Enrollment End Date**.

Para mayor información, entre a **www.pearsoneducacion.net/coursecompass**
o escríbanos a **editorialmx@pearsoned.com**

REFERENCIAS A DIFERENTES TEMAS EN ESTE LIBRO

Consideraciones de diseño en el procesamiento

Fundición metálica	Sección 12.2
Forjado	Sección 14.6
Formado de lámina metálica	Sección 16.13
Metalurgia de polvos	Sección 17.6
Moldeado de cerámicos	Sección 18.5
Procesamiento de polímeros	Sección 19.15
Maquinado	Diferentes secciones en los capítulos 23 y 24
Procesos abrasivos	Sección 26.5
Maquinado avanzado	Diferentes secciones en el capítulo 27
Procesos de unión	Diferentes secciones en los capítulos 30 a 32

Propiedades materiales

Tablas 2.1, 2.2, 2.3 y figuras 2.4, 2.6, 2.8, 2.14, 2.15, 2.16 y 2.28
Tablas 3.1, 3.2, 3.3 y figuras 3.1 y 3.2
Tablas 5.2, 5.4 y 5.6
Tablas 6.2 a 6.10
Tablas 7.1 a 7.3
Tablas 8.2 y 8.3
Tabla 9.2 y figuras 9.3, 9.5 y 9.7
Tabla 10.1
Tabla 11.3
Tablas 12.3, 12.4 y 12.5 y figura 12.4
Tablas 16.3 y 16.4
Tablas 17.3, 17.4, 17.5 y figura 17.10
Tabla 20.2
Tablas 22.1, 22.2, 22.5 y figuras 22.1 y 22.9
Tabla 26.1
Tabla 32.3

Características de manufactura de los materiales

Tabla I.3
Tabla 5.6
Tabla 6.4
Tabla 8.3
Tabla 10.1
Tablas 12.2 y 12.6
Tabla 14.3
Tablas 16.2 y 16.3 y figura 16.34
Sección 21.7
Figura 22.2
Sección 30.9.2

Capacidades de los procesos de manufactura

Tablas 11.1 y 11.2
Tabla III.1
Tabla 14.1
Tabla 16.1
Sección 17.7 y figura 17.14
Tabla 18.1
Tablas 19.1 y 19.2
Tabla 20.1
Tablas 23.1, 23.6, 23.8 y 23.10
Tablas 26.3 y 26.4
Tabla 27.1
Tablas 28.1 y 28.2
Tabla 29.1
Tabla VI.1
Tabla 30.1
Tabla 32.4
Tabla 34.1
Tablas 40.2 y 40.3

Tolerancias dimensionales y acabado superficial

Tabla 11.2
Tablas 23.1 y figuras 23.13 y 23.14
Figura 27.4

Costos generales y economía

Tabla I.4
Tabla 6.1
Sección 12.6
Sección 14.9
Sección 16.15
Sección 17.8 y tabla 17.6
Sección 19.16
Figura 24.34
Sección 25.8
Sección 26.9 y figura 26.34
Sección 27.10
Sección 31.8
Sección 32.7
Tablas 40.2, 40.5 y 40.9

FACTOR DE CONVERSIÓN PARA UNIDADES SI

PROPIEDAD	PARA CONVERTIR DE	A	MULTIPLICAR POR
Aceleración	pie/s^2	m/s^2	3.048×10^{-1}
Ángulo	grado	rad	1.745×10^{-2}
	minuto	rad	2.909×10^{-4}
	segundo	rad	4.848×10^{-6}
Área	$pulg^2$	m^2	6.452×10^{-4}
	pie^2	m^2	9.290×10^{-2}
	$pulg^2$	mm^2	6.452×10^{2}
	pie^2	mm^2	9.290×10^{4}
Densidad	$lb/pulg^3$	kg/m^3	2.768×10^{4}
Energía	pie · lb	J	1.356
	Btu	J	1.054×10^{3}
	caloría	J	4.184
	watt · h	J	3.600×10^{3}
Fuerza	kgf	N	9.807
	lb	N	4.448
Longitud	pulg	m	2.540×10^{-2}
	pie	m	3.048×10^{-1}
Masa	lb	kg	4.536×10^{-1}
	tonelada (métrica)	kg	1.000×10^{3}
	tonelada (corta)	kg	9.072×10^{2}
Potencia	hp	W	7.457×10^{2}
	Btu/min	W	1.757×10
	pie · lb/min	W	2.260×10^{-2}
Presión, esfuerzo	$lb/pulg^2$	Pa	6.895×10^{3}
	bar	Pa	1.000×10^{5}
	atmósfera	Pa	1.013×10^{5}
Térmica	Btu/h · pie · °F	W/m · K	1.730
	cal/s.cm · °C	W/m · K	4.184×10^{2}
	Btu/lb · °F	J/kg · K	4.184×10^{3}
Torque	lb · pulg	N · m	1.130×10^{-1}
	lb · pie	N · m	1.356
Velocidad	pie/min	m/s	5.080×10^{-3}
	rpm	rad/s	1.047×10^{-1}
Volumen	$pulg^3$	m^3	1.639×10^{-5}
	pie^3	m^3	2.832×10^{-2}
	$pulg^3$	mm^3	1.639×10^{4}
	pie^3	mm^3	2.832×10^{7}
	galón (EUA)	litro	3.785
OTRAS CONVERSIONES	$lb/pulg^2$	kgf/mm^2	7.030×10^{-4}
	$lb/pulg^3$	g/cm^3	2.768×10
	kg/mm^2	MPa	9.807
	Btu/h · pie · °F	cal/s · cm · °C	4.134×10^{-3}
	onza	g	2.835×10
	micropulgada	micra	2.540×10^{-2}
	angstrom	m	10^{-10}
	tonelada métrica	kg	10^{3}
	tonelada corta	lb	2.240×10^{3}

Esta nueva edición de Kalpakjian está dirigida a los estudiantes de las licenciaturas de manufactura, en el nivel técnico, de ingeniería en manufactura, ingeniería mecánica e ingeniería industrial.

El contenido se actualizó en su totalidad y aborda aspectos fundamentales para la manufactura moderna, desde los temas tradicionales —como los procesos de fundición, formado, maquinado y unión—, hasta temas avanzados como la fabricación de dispositivos microelectrónicos y sistemas microelectromecánicos (MEMS).

Lo nuevo en esta edición:

- Cada capítulo comienza con una breve descripción de los objetivos del capítulo, los temas por tratar y su relevancia.
- Presenta dos capítulos relativos a los temas de dispositivos microelectrónicos y microelectromecánicos y sistemas de manufactura, incluyendo el MEMS.
- Se incluyen alrededor de 120 ejemplos y estudios de caso.
- Se actualizaron las preguntas y los problemas de cada capítulo, de los cuales aproximadamente 20% son nuevos.
- La mayoría de las ilustraciones se modificaron para mejorar el impacto gráfico y la claridad, además de agregar una gran cantidad de fotografías.



CourseCompass es una plataforma para cursos en línea que Pearson Educación ofrece como apoyo para sus libros de texto. Este libro cuenta con un curso precargado en *CourseCompass*, que incluye lecturas en PowerPoint, recursos para el profesor, manual de soluciones, proyectos para tareas y *Test Gen* (generador de exámenes).

Para mayor información visite la página:

www.pearsoneducacion.net/kalpakjian

ISBN 970-26-1026-5

PEARSON Educación ®

Visítenos en:
www.pearsoneducacion.net