
JOHN A. SCHEY
Procesos de manufactura
Mc Graw Hill
TERCERA EDICIO
03200117412

La obra que usted tiene en sus manos le abre las puertas hacia un panorama completo en el rubro de la manufactura, que incluye los métodos y procesos más novedosos empleados en la industria. Sólidos fundamentos en ingeniería de materiales se combinan con la cobertura del diseño y las especificaciones de procesos mayores, para dar al lector una referencia que le permita entender el ambiente de la manufactura actual.

Además, se le agregó una cobertura innovadora en cuanto a materiales y diseños, tratamiento de superficies y fabricación de semiconductores y dispositivos MEMS. Los recientes desarrollos tecnológicos se resaltan en todos los capítulos sobre procesos. También se abordan temas como competencia global, desarrollo sustentable, reciclaje e ingeniería concurrente. El diseño se ha enfatizado a través de todo el libro, destacando la relación entre los diseñadores de producto y los ingenieros de manufactura para la creación de productos viables.

El estudiante encontrará un texto claro y accesible en su lectura. Todos los problemas han sido revisados, ampliados y separados en tres grupos: de repaso, de razonamiento y específicos que requieren de respuestas cuantitativas. Se adiciona una guía de clasificación de procesos en cada capítulo, así como tablas de resumen sobre los procesos y las capacidades para una fácil referencia. El libro contiene abundantes ilustraciones y fotografías para favorecer la comprensión de los diversos temas.

Asimismo, está disponible un sitio en internet (http://mhhe.com/schey/), donde encontrará información sobre el libro, el autor, así como diversas ligas a temas de estudio relacionados.

ISBN 970-10-3573-9

9 789701 035733

McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V.

A Subsidiary of The McGraw Hill Companies

www.mcgraw-hill.com.mx

PROCESOS DE MANUFACTURA

PROCESOS DE MANUFACTURA

Tercera edición

John A. Schey

University of Waterloo, Ontario

Traducción:

Ing. Javier León Cárdenas

Traductor profesional

Revisión técnica:

M.C. Juan Carlos Pedroza Montes de O.

Coordinador del Área Automotriz
ITESM-CEM

M.C. James de Gomar

Profesor del Departamento de Mecánica
ITESM-CEM

Dr. Dagoberto de la Serna

Profesor del Departamento de Mecánica
Universidad Iberoamericana

M.I. Miguel Chacón Paz

Profesor Investigador
UAM-Azcapotzalco

McGRAW-HILL

MÉXICO • BUENOS AIRES • CARACAS • GUATEMALA • LISBOA • MADRID
NUEVA YORK • SAN JUAN • SANTAFÉ DE BOGOTÁ • SANTIAGO • SÃO PAULO
AUKLAND • LONDRES • MILÁN • MONTREAL • NUEVA DELHI
SAN FRANCISCO • SINGAPUR • ST. LOUIS • SIDNEY • TORONTO

Gerente de producto: Sergio Cervantes González
Supervisor de edición: Felipe Hernández Carrasco
Supervisor de producción: Zeferino García García

PROCESOS DE MANUFACTURA
Tercera edición

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra,
por cualquier medio, sin autorización escrita del editor.

DERECHOS RESERVADOS © 2002, respecto a la primera edición en español por
McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V.
A Subsidiary of The McGraw-Hill Companies
Cedro Núm. 512, Col. Atlampa
Delegación Cuauhtémoc
06450 México, D.F.
Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana, Reg. Núm. 736

7050

ISBN 970-10-3573-9

Translated from the third English edition of
INTRODUCTION TO MANUFACTURING PROCESSES
JOHN A. SCHEY
Copyright © 2000, by The McGraw-Hill Companies, Inc.
All rights reserved.
ISBN 0-07-031136-6

1234567890 09876543201

Impreso en México Printed in Mexico

Esta obra se terminó de
imprimir en Diciembre del 2001 en
Programas Educativos S.A. de C.V
Calz. Chabacano No. 65-A
Col. Asturias C.P. 06850 México, D.F
Empresa certificada por el Instituto Mexicano
de Normalización y Certificacion A.C. bajo la
Norma ISO-9002,1994/NMX-CC-04: 1995 con
el núm. de registro RSC-048 y bajo la Norma
ISO-14001:1996/SAA-1998, con el núm. de
registro RSAA-003

A Gitta, por sus años de ayuda y apoyo

ACERCA DEL AUTOR

El Dr. John A. Schey estudió en su natal Hungría. Recibió su grado de Ingeniero Diplomado en Metalurgia de la Universidad Técnica Jozsef Nador, Sopron, en 1946, y se le otorgó el grado de Cand. Tech. Sci. (doctoral) por parte de la Academia de Ciencias, Budapest, en 1953. Recibió el grado de Dr. Ing. *Honoris Causa* en 1987 de la Universidad de Stuttgart, y en 1989 de su alma máter (actualmente Universidad of Miskolc).

El Dr. Schey ha sido jefe de tecnología en la Fábrica Metalúrgica en Csepel, Budapest (1947-1951); profesor adjunto en la Universidad Técnica de Miskolc, Hungría (hasta 1956); jefe de departamento en los laboratorios de investigación de la British Aluminium Co. Ltd., Inglaterra (hasta 1962); consultor metalúrgico en jefe en el Instituto de Investigación del IIT, Chicago (hasta 1968); profesor de ingeniería metalúrgica en la Universidad de Illinois en Chicago (hasta 1974), y profesor en el Departamento de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Waterloo, Ontario, donde actualmente tiene el título de profesor emérito distinguido.

Es miembro de la Academia Nacional de Ingeniería de EUA, miembro extranjero de la Academia de Ciencias Húngaras, miembro honorario de la Academia de Ingeniería Húngara, miembro de la junta de gobierno de la ASM International y de la Society of Manufacturing Engineers; asimismo, es un Ingeniero en Manufactura Certificado.

En 1984 obtuvo el premio Dofasco del Instituto Canadiense de Minería y Metalurgia, en 1974 se hizo acreedor de la medalla de oro de la Society of Manufacturing Engineers, y en 1966 obtuvo el Premio W.H.A. Robertson del Instituto de Metales, Londres, Inglaterra.

Es el autor de numerosos libros y publicaciones de investigación en procesos de manufactura, procesos de trabajo en metales y sobre la tribología del trabajo en metales, entre los que está la monografía *Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication, and Wear* (American Society for Metals, 1983). Ha sido asesor de más de sesenta industrias y posee ocho patentes.

PREFACIO

En los más de veinte años que han pasado desde la publicación de la primera edición de este libro, el estudio de la manufactura ha encontrado su debido lugar en el programa de estudios de ingeniería. Los cursos de manufactura se ofrecen en varios niveles, desde cursos de repaso dados a los estudiantes universitarios de primer año hasta cursos intensivos diseñados para los estudiantes avanzados. También existe un número creciente de programas de postgrado, dirigidos a la educación de profesionales capaces de manejar empresas con base en una tecnología sólida. Para cumplir con estas demandas diversas, varias instituciones han adoptado o están en proceso de desarrollar una variedad de técnicas nuevas. En este tiempo también se ha visto un crecimiento espectacular de la tecnología de información, y esto ha tenido un gran efecto no sólo en la tecnología de manufactura sino también en la forma en que se aplica la enseñanza de la manufactura. Cada año, docenas de metodologías innovadoras, muchas de las cuales usan la Red informática como complemento o como educación a distancia, se presentan en conferencias dedicadas a la enseñanza de la manufactura.

También ha habido un cambio marcado en las actitudes de la industria hacia sus clientes: ciertamente la distancia entre el productor y el consumidor se está cerrando. La ingeniería concurrente, con retroalimentación del consumidor, se ha hecho una realidad en muchas compañías.

Todo esto tiene implicaciones para el estudiante y para el ingeniero practicante. Actualmente se encuentra disponible una gran cantidad de información, no sólo en forma impresa sino también en Internet, y existe una abundancia creciente de software que ayuda a diseñar productos y procesos. Sin embargo, nada de esto puede ser utilizado efectivamente a menos que se tenga un entendimiento efectivo de los fundamentos físicos de los procesos. Este entendimiento debe, por lo tanto, ser el objetivo de cualquier curso sobre manufactura, independientemente del nivel de su presentación.

La segunda edición de este libro se enfocó en fomentar este entendimiento al incorporar material base que algunos estudiantes pueden desconocer. La presente edición continúa enfatizando las bases físicas y su relación con los procesos reales, pero con algunos cambios importantes. Considerando los antecedentes muy variados de los estudiantes y de los ingenieros practicantes, se ha incrementado el número de capítulos para permitir la separación del material base de los capítulos propios. Aquellos estudiantes que sólo hayan cursado química y física en la preparatoria pueden obtener de estos capítulos una base suficiente para el subsiguiente tratamiento de los procesos; los que tengan conocimiento de materiales y de mecánica los pueden leer como un repaso, con atención en sus implicaciones en los procesos de manufactura, y en la calidad y las propiedades del producto. A estos capítulos de material de apoyo les sigue un análisis de los procesos. Aun una descripción breve de procesos individuales podría ocupar varios volúmenes; por lo tanto, aquí el énfasis es sobre los principios físicos que con frecuencia son comunes a procesos aparentemente no relacionados y que se pueden aplicar para hacer juicios fundamentados sobre la factibilidad de una solución propuesta.

Aunque los temas comunes se intercalan a lo largo del libro, se reconoce que, con frecuencia, el maestro tendrá que seleccionar un número limitado de temas y presentar-

los en un orden diferente del que está en el texto. Para facilitar esto, se hacen abundantes referencias a los elementos esenciales que preceden un análisis dado. Con estas consideraciones en mente, el material se divide en tres grupos amplios.

En los capítulos del 1 al 5 se prepara el tema: en el capítulo 1 se ofrece un panorama general de la importancia de la manufactura para la humanidad; en el capítulo 2 se resume la interacción del diseño y la manufactura y se introducen los conceptos básicos del control del proceso; el capítulo 3 trata de la geometría, las dimensiones y la calidad de la superficie, y el capítulo 4 de las propiedades de servicio que se esperan de un producto manufacturado. En los dos últimos de estos capítulos también se analizan las técnicas de medición que se usarán para el control de la manufactura. El capítulo 5 es nuevo limitando su enfoque a las interacciones entre el diseño del producto, la selección de materiales y la elección del proceso en la ingeniería concurrente. El reciclaje y las preocupaciones higiénicas y ecológicas se abordan en este capítulo y en todo el libro.

Los capítulos del 6 al 20 tratan los procesos en la secuencia a la que usualmente el material se sujeta. Primero se demuestran los conceptos básicos y sus aplicaciones para los metales: en el capítulo 6 se analiza la solidificación en la preparación para la fundición (capítulo 7) y la soldadura (capítulo 18), y el capítulo 8 sirve como preparación para los procesos de deformación, como la deformación volumétrica (capítulo 9) y el trabajo de lámina metálica (capítulo 10). Las tecnologías de partículas se presentan primero para los metales (capítulo 11) luego, después de una introducción a la estructura y las propiedades de las cerámicas, para el procesado de las mismas (capítulo 12). Los antecedentes de los plásticos (capítulo 13) forman los cimientos para un tratamiento mucho más amplio del procesamiento de plásticos (capítulo 14), y todo el material anterior se vuelve a ver en el nuevo capítulo 15 sobre compuestos. A la remoción de metal por formación de rebabas (capítulo 16) y por técnicas no tradicionales (capítulo 17) le siguen los procesos aditivos de unión (capítulo 18) con su aplicación a la fabricación sólida de forma libre. Un nuevo capítulo sobre tratamientos superficiales (capítulo 19) reúne estas muy variadas tecnologías. A una breve introducción a la electrónica de estado sólido le sigue un análisis de procesos para la manufactura de dispositivos de estado sólido, y esto proporciona los cimientos de la microfabricación para la producción de sistemas microelectromecánicos, con seguridad una de las áreas de crecimiento en la manufactura.

Los dos últimos capítulos se dedican a la organización y los aspectos competitivos de la manufactura, incluyendo una exploración de la competencia entre los procesos analizados en la sección principal.

Los nuevos desarrollos se subrayan en todos los capítulos de procesos. De esta forma, el estudiante tendrá una idea de las tecnologías de punta y de la manufactura de precisión. Ejemplos tomados de aplicaciones recientes demuestran la importancia de los principios y las técnicas. Donde se justifica, se incluyen tratamientos cuantitativos, con frecuencia con el uso de hojas electrónicas de cálculo.

Para la práctica de la ingeniería concurrente, el ingeniero de manufactura debe ser capaz de interactuar con los diseñadores del producto, y el diseñador del producto debe tener al menos un sentido básico de las consecuencias del proceso de una decisión de diseño. Por esta razón, las implicaciones de diseño de los procesos se subrayan desde el principio hasta el fin. Así, el diseño de un producto se puede desarrollar y juzgar no con base en reglas estériles, sino con un entendimiento más completo del razonamiento que

hay detrás de estas reglas. Para ayudar a una mejor comprensión de las relaciones del proceso, se proporciona una clasificación de los procesos en cada capítulo de procesos y se resumen en tablas. Junto con los resúmenes de fin de capítulo, éstas se pueden usar para obtener una apreciación de las tecnologías que se omitieron debido a restricciones de tiempo.

Se aumentó el número de problemas y se presentan en tres grupos; preguntas sencillas de repaso, problemas que requieren un juicio razonado y problemas que requieren respuestas cuantitativas. Varios de ellos son adecuados para exámenes.

Para los que adopten el libro se proporciona un *manual del maestro*. Como quizás el material que se presenta aquí no pueda estudiarse en un curso de un semestre, se dan sugerencias para ayudar a elegir secciones para cursos con propósitos diferentes, con la consideración debida para el nivel de preparación de los estudiantes. Se dan soluciones completas para todos los problemas, incluso para las preguntas de repaso. Puesto que con demasiada frecuencia es aceptable más de una alternativa, las respuestas se dan con explicaciones y sugerencias, y se proporcionan detalles suficientes para permitir los comentarios por parte de los asistentes de maestro. Las deducciones de las ecuaciones del libro se demuestran en una forma adecuada para su reproducción y distribución a los estudiantes. Se incluyen sugerencias para ayudas de enseñanza.

Tengo una gran deuda con muchos colegas, quienes revisaron críticamente secciones específicas, particularmente con H.W. Kerr, A. Plumtree, C. Tzoganakis, R. Varin y M. Worswick, de la University of Waterloo, y D. Edeltein, del centro de investigación T.J. Watzon de IBM. Además de las compañías y los individuos reconocidos específicamente en el libro, recibí valiosa información de P.H. Abramowitz y D.A. Yeager (Ford), T. Altan (Ohio State University), R.A. Crockett (Lockheed Martin), K.F. Hens (Thermat), T.E. Howson (Wyman-Gordon), M.L. Devenpeck y H.R. Zonker (Alcoa), S.R. Larrabee y C.J. Rogers (Modine), F. Norris (Howmet), J.D. Schreiber (American Superconductor), J. Stump (GE Aircraft Engines) y A.J.K. Tumban (Tumban Marketing).

Me he beneficiado enormemente con los valiosos comentarios y críticas de los revisores del manuscrito, L.R. Cornwell (Texas A&M University), A.S. El-Gizawy (Universidad de Missouri en Columbia), J.G. Lenard (Universidad de Waterloo, Ontario), D.G. Tomer (Rochester Institute of Technology) y A.A. Tseng (Arizona State University). Hicieron sugerencias valiosas los encargados del plan de revisión, X.D. Fang (Iowa State University), J.K. Gershenon (University of Alabama), D. Hall (Louisiana Technological University), D.W. Radford (Colorado State University) y J. Warner (Milwaukee School of Engineering).

Por supuesto que fui muy afortunado por tener el apoyo del personal de McGraw-Hill, en particular de Jonathan Plant, editor, y de Kristen Druffner, asistente editorial; de Kimberly Moranda, gerente del proyecto, y de Rose Range, coordinador de suplementos. También estoy en deuda con John Corrigan y Debra Riegert, quienes iniciaron esta revisión. Al igual que en las ediciones previas, mi esposa Gitta compartió la tarea y proporcionó apoyo a través de muchos largos meses.

Waterloo, Ontario, mayo de 1999

John A. Schey

CONTENIDO

Capítulo 1

Introducción a la manufactura 3

1-1 Desarrollos históricos 3
- 1-1-1 Primeros desarrollos 3
- 1-1-2 La primera Revolución Industrial 4
- 1-1-3 La segunda Revolución Industrial 4

1-2 Función económica de la manufactura 7
1-3 La manufactura como una actividad técnica 9
1-4 Alcance y propósito del libro 13
1-5 Resumen 15
Lecturas adicionales 16

Capítulo 2

Manufactura 21

2-1 La empresa de manufactura 21
- 2-1-1 Desarrollo de especificaciones 22
- 2-1-2 Diseño conceptual 23
- 2-1-3 Diseño del producto 23
- 2-1-4 Hacer o comprar 25
- 2-1-5 Diseño del proceso 25
- 2-1-6 Producción 27
- 2-1-7 Relaciones con el cliente 27

2-2 Manufactura secuencial 28
2-3 Ingeniería concurrente o simultánea 29
2-4 Manufactura integrada por computadora 30
2-5 Control de los procesos de manufactura 31
- 2-5-1 Estrategias de control 31
- 2-5-2 Automatización 34
- 2-5-3 Control numérico 34

2-6 Resumen 38
Lecturas adicionales 39

Capítulo 3

Atributos geométricos de las piezas manufacturadas 43

3-1 Forma 43
- 3-1-1 Clasificación de la forma 44
- 3-1-2 Tecnología de grupo 44
- 3-1-3 Movimiento y control de máquinas herramientas 46

3-2 Dimensiones 48
- 3-2-1 Unidades dimensionales 48
- 3-2-2 Tolerancias dimensionales 49

3-3 Desviaciones de forma y posición 51
3-4 Metrología de ingeniería 52
- 3-4-1 Principios de medición 53
- 3-4-2 Calibradores 56
- 3-4-3 Dispositivos graduados de medición 58
- 3-4-4 Medición comparativa de la longitud 61
- 3-4-5 Dispositivos ópticos 63
- 3-4-6 Máquinas de medición 63

3-5 Topografía superficial 65
- 3-5-1 Rugosidad y ondulación 65
- 3-5-2 Acabado superficial y tolerancias 67
- 3-5-3 Medición de la rugosidad superficial 71

3-6 Resumen 72
Problemas 73
Lecturas adicionales 75

Capítulo 4

Atributos de servicio de los productos manufacturados 77

4-1 Propiedades mecánicas en tensión 78
- 4-1-1 El ensayo de tensión 78
- 4-1-2 Interacciones equipo/proceso 81
- 4-1-3 Resistencia en tensión 82
- 4-1-4 Ductilidad en tensión 85
- 4-1-5 Aseguramiento del incremento de la ductilidad 90
- 4-1-6 Efectos de muesca 90
- 4-1-7 Ensayos de flexión 91

4-2 Energía de impacto y tenacidad a la fractura 93
4-3 Compresión 95
4-4 Dureza 98
4-5 Fatiga 100
4-6 Propiedades a temperatura elevada 103
4-7 Esfuerzos residuales 106
4-8 Ensayos no destructivos (NDT) 108
4-9 Propiedades físicas 110

4-9-1 Densidad 110
4-9-2 Propiedades tribológicas 111
4-9-3 Propiedades eléctricas 115
4-9-4 Propiedades magnéticas 116
4-9-5 Propiedades térmicas 116
4-9-6 Propiedades ópticas 118
4-10 Propiedades químicas 118
4-11 Resumen 118
Problemas 120
Lecturas adicionales 122

Capítulo 5

Materiales en el diseño y la manufactura 125
5-1 Diseño 125
5-2 Tipos principales de materiales en ingeniería 129
5-2-1 Metales 129
5-2-2 Cerámicos 133
5-2-3 Plásticos 134
5-2-4 Estructuras compuestas 135
5-2-5 Uniones 137
5-3 Aspectos ambientales 137
5-3-1 Impacto en el diseño 137
5-3-2 Impacto en la manufactura 138
5-4 Reciclaje 139
5-4-1 Metales 139
5-4-2 Cerámicos 140
5-4-3 Plásticos 141
5-4-4 Compuestos 142
5-5 Resumen 142
Lecturas adicionales 142

Capítulo 6

Solidificación y tratamiento térmico de metales 145
6-1 Solidificación 145
6-1-1 Metales puros 146
6-1-2 Soluciones sólidas 148
6-1-3 Sistemas eutécticos 152
6-1-4 Sistemas peritécticos 154
6-1-5 Fases intermetálicas 155
6-1-6 Solidificación no en equilibrio 156
6-1-7 Nucleación y crecimiento de granos 158
6-2 Reacciones de estado sólido 160
6-2-1 El sistema hierro-carburo de hierro 160
6-3 Relaciones estructura-propiedad 163
6-3-1 Metales y aleaciones de una sola fase 163
6-3-2 Materiales de dos fases 166
6-3-3 Aleaciones ternarias y de componentes múltiples 170
6-3-4 Inclusiones 171
6-3-5 Gases 172
6-3-6 Efectos del tamaño del grano 174
6-4 Tratamiento térmico 176
6-4-1 Recocido 176
6-4-2 Endurecimiento por precipitación 176
6-4-3 Tratamiento térmico del acero 179
6-4-4 Tratamiento superficial del acero 182
6-5 Resumen 183
Problemas 184
Lecturas adicionales 185

Capítulo 7

Fundición de metales 189
7-1 Estructura y propiedades de las fundiciones 189
7-1-1 Solidificación de fusiones 190
7-1-2 Macrosegregación 193
7-2 Propiedades de las fundiciones 193
7-2-1 Viscosidad 194
7-2-2 Efectos superficiales 196
7-2-3 Fluidez 196
7-3 Aleaciones para fundición 198
7-3-1 Materiales ferrosos 199
7-3-2 Materiales no ferrosos 203
7-4 Fusión y vaciado 207
7-4-1 Fusión 207
7-4-2 Vaciado 209
7-4-3 Aseguramiento de la calidad 210
7-5 Procesos de vaciado 211
7-5-1 Clasificación 211
7-5-2 Fundición de lingotes 212
7-5-3 Fundición de formas 214
7-5-4 Vaciado en molde desechable, modelo permanente 221
7-5-5 Fundición en molde desechable, modelo desechable 229

7-5-6 Fundición en molde permanente 232
7-5-7 Fundición centrífuga 238
7-6 Procesos de acabado 240
7-6-1 Limpieza y acabado 240
7-6-2 Cambio de las propiedades después de la fundición 240
7-7 Aseguramiento de la calidad 241
7-7-1 Inspección 241
7-7-2 Defectos de fundición 242
7-8 Capacidades del proceso y aspectos del diseño 243
7-8-1 Capacidades del proceso 243
7-8-2 Diseño de piezas 245
7-9 Resumen 250
Problemas 251
Lecturas adicionales 256

Capítulo 8

Deformación plástica de los metales 259
8-1 Propiedades de los materiales 260
8-1-1 Esfuerzo de fluencia en el trabajo en frío 260
8-1-2 Fluencia discontinua 265
8-1-3 Texturas (anisotropía) 267
8-1-4 Efectos del trabajo en frío 271
8-1-5 Recocido 273
8-1-6 Trabajo en caliente 276
8-1-7 Interacciones entre la deformación y la estructura 281
8-2 Mecánica del procesado por deformación 286
8-2-1 Criterios de cedencia 286
8-2-2 Esfuerzo relevante de fluencia 289
8-2-3 Efectos de la fricción 290
8-2-4 Lubricación 294
8-2-5 Deformación no homogénea 296
8-2-6 Factibilidad volumétrica 298
8-2-7 Formabilidad de láminas 300
8-3 Aleaciones forjadas 301
8-3-1 Aceros al carbono 301
8-3-2 Aceros aleados 303
8-3-3 Materiales no ferrosos 303
8-4 Resumen 306
Problemas 307
Lecturas adicionales 310

Capítulo 9

Procesos de deformación volumétrica 313
9-1 Clasificación 313
9-1-1 Temperatura de deformación 314
9-1-2 Propósito de la deformación 315
9-1-3 Análisis 316
9-2 Forjado en matriz abierta 318
9-2-1 Recalcado axial de un cilindro 319
9-2-2 Forjado de piezas rectangulares de trabajo 325
9-2-3 Forjado en matriz abierta 330
9-2-4 Capacidades del proceso y aspectos del diseño 335
9-3 Forjado por matriz de impresión y matriz cerrada 338
9-3-1 Forjado por matriz de impresión 338
9-3-2 Forjado por matriz cerrada 345
9-3-3 Laminado con forjado y estampado rotatorio 346
9-3-4 Capacidades del proceso y aspectos del diseño 347
9-4 Extrusión 349
9-4-1 Proceso de extrusión 349
9-4-2 Extrusión en caliente 351
9-4-3 Extrusión en frío 353
9-4-4 Fuerza de extrusión 354
9-4-5 Capacidades del proceso y aspectos del diseño 357
9-5 Equipo de forjado y de extrusión 360
9-5-1 Herramientas y matrices 361
9-5-2 Martinetes 364
9-5-3 Prensas 366
9-6 Estirado 369
9-6-1 Proceso de estirado 369
9-6-2 Fuerzas 371
9-6-3 Capacidades del proceso y aspectos del diseño 372
9-7 Laminado 373
9-7-1 Laminado plano 373
9-7-2 Laminado de formas 376
9-7-3 Laminado de anillos 376
9-7-4 Laminado transversal 377
9-7-5 Requerimientos de fuerzas y potencia 379
9-7-6 Capacidades del proceso y aspectos del diseño 382

9-8 Resumen 386
Problemas 387
Lecturas adicionales 393

Capítulo 10

Procesos de conformado de lámina 395
10-1 Materiales en lámina 395
10-1-1 Aceros 396
10-1-2 Metales no ferrosos 399
10-1-3 Topografía superficial 400
10-2 Clasificación 400
10-3 Cizallado 400
10-3-1 Proceso de cizallado 402
10-3-2 Fuerzas 403
10-3-3 Perfeccionamiento de la calidad del corte 405
10-3-4 Procesos 406
10-4 Doblado 409
10-4-1 Proceso de doblado 410
10-4-2 Límites del doblado 411
10-4-3 Esfuerzos y recuperación elástica 412
10-4-4 Métodos de doblado 415
10-5 Formado por estirado 418
10-5-1 Procesos del formado por estirado 418
10-5-2 Formabilidad en el estirado 419
10-5-3 Diagrama de límite de conformado 420
10-6 Embutido profundo 422
10-6-1 El proceso de embutido 422
10-6-2 Razón límite de embutido 426
10-6-3 Embutido secundario 428
10-7 Estirado-embutido 429
10-8 Prensado 433
10-9 Procesos especiales 435
10-10 Matrices y equipo para el conformado de lámina metálica 441
10-11 Alcances del proceso y aspectos del diseño 442
10-12 Resumen 446
Problemas 447
Lecturas adicionales 452

Capítulo 11

Metalurgia de polvos 455
11-1 Clasificación 455
11-2 El polvo 456
11-2-1 Producción de polvos 456
11-2-2 Caracterización de polvos 459
11-2-3 Preparación del polvo 460
11-2-4 Mezclado 461
11-3 Consolidación de polvos 462
11-3-1 Compactación en frío 463
11-3-2 Moldeo por inyección 468
11-4 Sinterizado y acabado 468
11-4-1 Sinterizado 468
11-4-2 Acabado 472
11-5 Compactación en caliente 473
11-6 Productos de la metalurgia de polvos 475
11-7 Capacidades del proceso y aspectos del diseño 478
11-8 Electroformado 481
11-9 Resumen 483
Problemas 484
Lecturas adicionales 486

Capítulo 12

Procesamiento de cerámicas 489
12-1 Características de las cerámicas 490
12-1-1 Enlace y estructura 490
12-1-2 Propiedades de las cerámicas 492
12-2 Clasificación de los procesos para cerámicas 495
12-3 Materiales cerámicos 497
12-3-1 Cerámicos naturales 497
12-3-2 Cerámicos manufacturados 499
12-4 Procesamiento de cerámicos en partículas 499
12-4-1 Preparación de polvos 500
12-4-2 Consolidación de polvos cerámicos 501
12-4-3 Secado y maquinado en crudo 503
12-4-4 Sinterizado 504
12-4-5 Compactación en caliente 505
12-4-6 Aplicaciones 506
12-4-7 Capacidades del proceso y aspectos del diseño 510
12-5 Vidrios 510
12-5-1 Estructura y propiedades de los vidrios 512
12-5-2 Procesos de manufactura 514
12-5-3 Recubrimientos 522

12-5-4 Capacidades del proceso y aspectos del diseño 522
12-6 Resumen 523
Problemas 524
Lecturas adicionales 526

Capítulo 13

Polímeros y plásticos 529
13-1 Reacciones de polimerización 530
13-2 Polímeros lineales (termoplásticos) 532
13-2-1 Estructura de los polímeros lineales 532
13-2-2 Fuentes de resistencia 534
13-2-3 Polímeros cristalinos y amorfos 536
13-2-4 Reología de los polímeros lineales 539
13-3 Polímeros con enlaces cruzados (termoestables) 545
13-4 Elastómeros 547
13-5 Aditivos y rellenos 549
13-5-1 Aditivos 550
13-5-2 Rellenos 551
13-6 Propiedades de servicio de los plásticos 552
13-6-1 Propiedades mecánicas 552
13-6-2 Propiedades físicas y químicas 556
13-7 Plásticos 557
13-7-1 Termoplásticos 558
13-7-2 Termofijos 563
13-7-3 Elastómeros 566
13-8 Resumen 566
Problemas 567
Lecturas adicionales 569

Capítulo 14

Procesamiento de plásticos 571
14-1 Clasificación 571
14-2 Vaciado 572
14-3 Procesamiento por fusión (moldeo) 574
14-3-1 Principios del procesamiento por fusión 574
14-3-2 Extrusión 576
14-3-3 Moldeo por inyección 585
14-3-4 Otras técnicas de moldeo 589
14-3-5 Capacidades del proceso y aspectos del diseño 592
14-4 Procesamiento en el estado elástico 597
14-4-1 Moldeo por soplado 597
14-4-2 Termoformado 600
14-4-3 Estirado en frío 603
14-4-4 Formado en matrices acopladas 603
14-4-5 Capacidades del proceso y aspectos del diseño 603
14-5 Técnicas del procesamiento para granulados 604
14-6 Plásticos celulares o espumas 604
14-7 Procesamiento de elastómeros 606
14-8 Equipo para procesamiento de plásticos 606
14-9 Resumen 607
Problemas 608
Lecturas adicionales 610

Capítulo 15

Compuestos 613
15-1 Clasificación de los compuestos 614
15-1-1 Compuestos particulados 614
15-1-2 Reforzamiento fibroso 614
15-2 Fibras de refuerzo 618
15-3 Compuestos de matriz polimérica 619
15-3-1 Polímeros 619
15-3-2 Aplicación de los polímeros 620
15-4 Fabricación de compuestos de matriz polimérica 622
15-4-1 Procesos en molde abierto 622
15-4-2 Pultrusión 625
15-4-3 Moldeo en matrices acopladas 625
15-4-4 Capacidades del proceso y aspectos del diseño 627
15-5 Compuestos de matriz metálica 628
15-6 Compuestos de matriz cerámica 630
15-7 Resumen 632
Problemas 633
Lecturas adicionales 635

Capítulo 16

Maquinado 637
16-1 Proceso de corte de metal 638
16-1-1 Corte ortogonal ideal 638
16-1-2 Fuerzas en el corte 640
16-1-3 Corte ortogonal realista 643
16-1-4 Corte oblicuo 650

16-1-5 Fuerzas y requirimientos de energía 652
16-1-6 Temperaturas 655
16-1-7 Fluidos de corte 657
16-1-8 Vida de las herramientas 660
16-1-9 Calidad de la superficie 665
16-2 Material de trabajo 668
16-2-1 Maquinabilidad 668
16-2-2 Materiales maquinables 669
16-2-3 Materiales ferrosos 670
16-2-4 Materiales no ferrosos 673
16-3 Herramientas de corte 674
16-3-1 Materiales de la herramienta 674
16-3-2 Construcción de herramientas 681
16-3-3 Portaherramientas y aditamentos 682
16-4 Clasificación 683
16-4-1 Formado 683
16-4-2 Generación 685
16-5 Maquinado de un solo punto 686
16-5-1 Herramienta 686
16-5-2 Torneado 688
16-5-3 Perforado 690
16-5-4 Perforación de cañones y trepanado 692
16-5-5 Careado 692
16-5-6 Formado 692
16-5-7 Torno automático 692
16-5-8 Torno revólver 693
16-5-9 Máquinas automáticas para la fabricación de tornillos 694
16-5-10 Cepillado y acepillado 697
16-6 Maquinado de puntos múltiples 697
16-6-1 Taladrado 697
16-6-2 Fresado 701
16-6-3 Aserrado y limado 705
16-6-4 Escariado y corte de roscas 706
16-6-5 Producción de engranes 706
16-7 Elección de las variables del proceso 709
16-7-1 Velocidades y avances de corte 710
16-7-2 Tiempo y potencia de corte 714
16-7-3 Elección de la máquina herramienta 715
16-7-4 Control numérico y automatización 716
16-7-5 Optimización del proceso de corte 719
16-8 Maquinado abrasivo 722
16-8-1 Clasificación 723
16-8-2 El proceso del maquinado abrasivo 723
16-8-3 Abrasivos 725
16-8-4 Esmerilado 726
16-8-5 Otros procesos con abrasivos aglutinados 732
16-8-6 Procesos con abrasivos sueltos 733
16-9 Capacidades del proceso y aspectos del diseño 736
16-9-1 Aspectos del diseño 737
16-9-2 Maquinado de precisión 740
16-10 Resumen 742
Problemas 743
Lecturas adicionales 750

Capítulo 17

Procesos no tradicionales de maquinado 753
17-1 Clasificación 753
17-2 Maquinado químico (MQ) 754
17-3 Maquinado electroquímico (ECM) 756
17-4 Maquinado por descarga eléctrica (EDM) 758
17-5 Maquinado por haz de alta energía 761
17-5-1 Maquinado por haz de electrones (EBM) 761
17-5-2 Maquinado por rayo láser (LBM) 762
17-6 Maquinado de materiales no metálicos 765
17-6-1 Maquinado de materiales cerámicos 765
17-6-2 Maquinado de plásticos 766
17-6-3 Maquinado de compuestos 767
17-7 Capacidades del proceso y aspectos del diseño 767
17-8 Resumen 768
Problemas 769
Lecturas adicionales 771

Capítulo 18

Procesos de unión 773
18-1 Clasificación 773
18-2 Uniones mecánicas 775
18-3 Soldadura de estado sólido 777
18-3-1 Soldadura en frío (CW) 778
18-3-2 Soldadura por difusión 780
18-3-3 Soldadura en caliente 781
18-3-4 Soldadura por fricción (FRW) 782

18-4 Soldadura por fusión 783
18-4-1 Unión por fusión 784
18-4-2 Soldabilidad y calidad de la soldadura 788
18-4-3 Materiales soldables 791
18-5 Soldadura por resistencia 794
18-6 Soldadura con arco eléctrico 798
18-6-1 Soldadura con electrodo no consumible 800
18-6-2 Soldadura con electrodo consumible 801
18-6-3 Soldadura de pieza de trabajo consumible 804
18-7 Otros procesos de soldadura y de corte 805
18-7-1 Fuentes químicas de calor 806
18-7-2 Soldadura con haz de alta energía 807
18-7-3 Corte 810
18-8 Unión en estado líquido-solido 810
18-8-1 Enlace 811
18-8-2 Soldadura fuerte 813
18-8-3 Soldadura blanda 815
18-9 Uniones adhesivas 817
18-9-1 Características de los adhesivos estructurales 817
18-9-2 Tipos de adhesivos y su aplicación 819
18-10 Unión de plásticos y cerámicos 821
18-10-1 Unión de plásticos 821
18-10-2 Unión de cerámicos 822
18-11 Capacidades del proceso y aspectos del diseño 823
18-12 Laminados 828
18-13 Fabricación de formas sólidas libres 829
18-13-1 Propósitos de la fabricación de formas libres 830
18-13-2 Procesos de fabricación de formas sólidas libres 832
18-14 Resumen 834
Problemas 835
Lecturas adicionales 838

Capítulo 19

Tratamientos superficiales 841
19-1 Clasificación 841
19-2 Procesos de remoción 842
19-3 Recubrimientos de conversión 843
19-4 Tratamientos por calor 844
19-4-1 Tratamiento térmico de la superficie 844
19-4-2 Recubrimiento por difusión 845
19-4-3 Recubrimiento por inmersión caliente 846
19-4-4 Recubrimientos por sobrecapas de soldadura 846
19-5 Recubrimientos metálicos 849
19-5-1 Electrodeposición 849
19-5-2 Recubrimiento sin electricidad 850
19-5-3 Metalización de plásticos y cerámicos 851
19-6 Deposición física por vapor (PVD) 852
19-6-1 PVD térmica 852
19-6-2 Deposición de metal por bombardeo iónico 853
19-6-3 Recubrimiento iónico 855
19-6-4 Carburación y nitruración por plasma 855
19-7 Deposición química por vapor (CVD) 855
19-8 Implantación de iones 857
19-9 Recubrimientos orgánicos 858
19-10 Capacidades del proceso y aspectos del diseño 860
19-11 Resumen 861
Problemas 862
Lecturas adicionales 863

Capítulo 20

Manufactura de dispositivos semiconductores 865
20-1 Elementos de dispositivos semiconductores 867
20-1-1 Semiconductor 867
20-1-2 Dispositivos semiconductores 870
20-1-3 Circuitos integrados 873
20-2 Manufactura de obleas de silicio 875
20-2-1 Producción de EGS 876
20-2-2 Crecimiento de cristales 877
20-2-3 Preparación de las obleas 878
20-3 Fabricación de dispositivos 879
20-3-1 Perfil de la secuencia del proceso 880
20-3-2 Técnicas básicas de fabricación 880
20-3-3 Para cambiar la composición de la superficie 881

20-3-4 Deposición de películas superficiales 883
20-3-5 Litografía 888
20-3-6 Ataque químico 891
20-3-7 Integración del proceso 893
20-3-8 Encapsulado 896
20-4 Circuitos impresos 901
20-4-1 Métodos de fabricación de película delgada 901
20-4-2 Circuitos de película gruesa 902
20-4-3 Soldadura 903
20-5 Microfabricación 905
20-5-1 Técnicas de microfabricación 905
20-5-2 Nanotecnología 908
20-6 Resumen 910
Problemas 911
Lecturas adicionales 911

Capítulo 21

Sistemas de manufactura 915
21-1 Movimiento de materiales 915
21-1-1 Movimiento manual del material 916
21-1-2 Movimiento mecanizado de materiales 916
21-1-3 Robots 918
21-2 Organización de la producción 921
21-2-1 Características de la producción 921
21-2-2 Método óptimo de manufactura 922
21-2-3 Organización para la producción en masa 924
21-2-4 Organización de la producción en lotes 926
21-2-5 Organización del ensamble 930
21-2-6 Programación del ensamble 932
21-3 Administración de la calidad 933
21-3-1 Aseguramiento de calidad 935
21-3-2 Aspectos estadísticos de la manufactura 936
21-3-3 Control de aceptación 936
21-3-4 Control estadístico del proceso 937
21-4 Administración de la manufactura 943
21-4-1 Organización de la compañía 943
21-4-2 Ingeniería de manufactura 945
21-5 Resumen 946
Problemas 947
Lecturas adicionales 947

Capítulo 22

Aspectos competitivos de los procesos de manufactura 951
22-1 Competencia en la economía global 951
22-2 Costos de manufactura 953
22-2-1 Costo y productividad 953
22-2-2 Costos de operación (costos directos) 955
22-2-3 Costos indirectos 956
22-2-4 Costos fijos 957
22-3 Competencia entre los procesos de manufactura 957
22-4 Competencia entre materiales 958
22-5 Identificación del enfoque óptimo 960
22-6 Resumen 967
Problemas 968
Lecturas adicionales 970

Apéndice A

Tabla de conversión 971

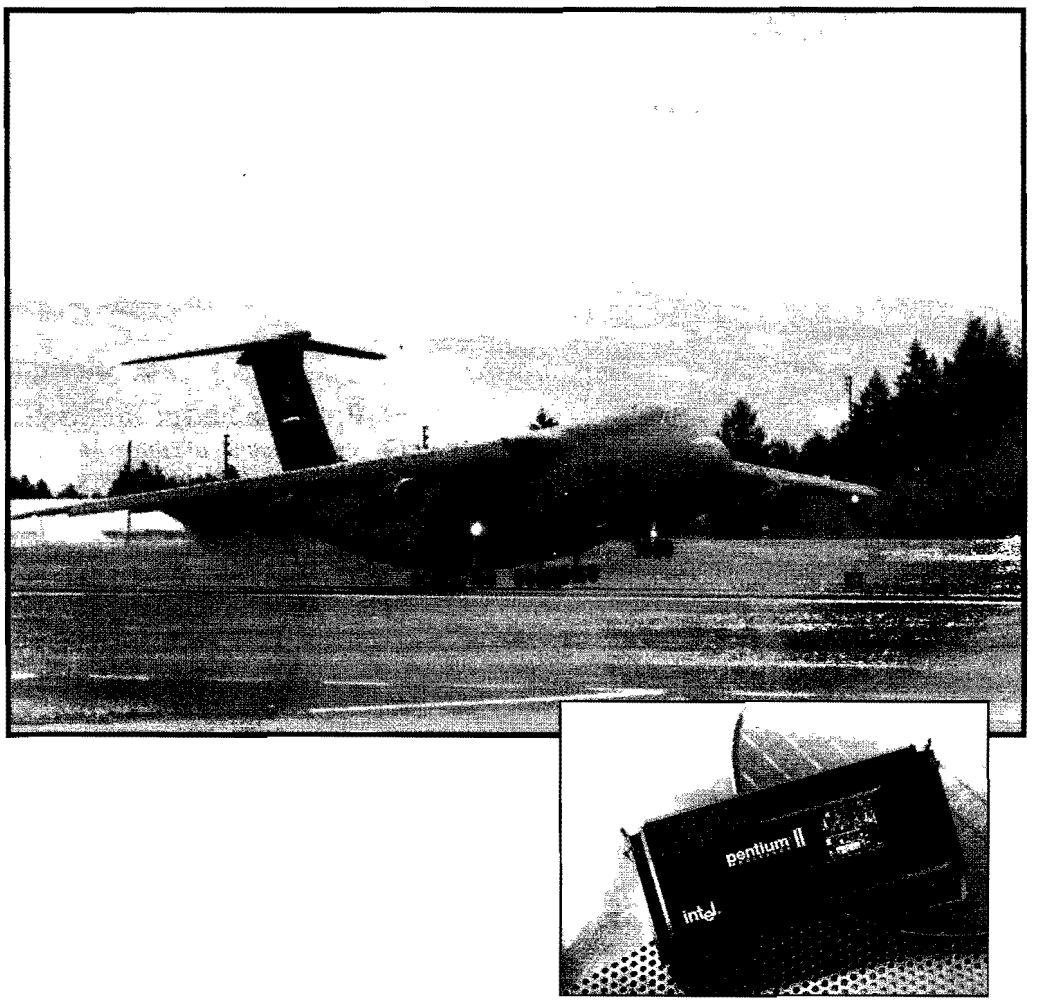
Apéndice B

Conversión aproximada de valores de la dureza 973

Apéndice C

Soluciones a problemas numéricos selectos 975

Índice 977



Por medio de la manufactura se crean los artículos para nuestra existencia, desde lo enorme hasta lo diminuto. El avión de carga C-5 tiene cerca de 76 m de longitud, 20 m de altura, una envergadura de 68 m, y puede despegar con una masa de 380 Mg, incluyendo 120 Mg de abastecimientos militares o para ayuda a damnificados. (*Cortesía de Lockheed Martin, Atlanta, Georgia.*) En contraste, el microprocesador Pentium II tiene 7.5 millones de transistores en un área que sólo mide unos cuantos milímetros en sus caras. (*Cortesía de Intel, Santa Clara, California.*)

capítulo

1

Introducción a la manufactura

En este capítulo se examinarán algunas preguntas importantes:

¿Qué es la manufactura?

¿Beneficia la manufactura a la humanidad?

¿Es importante la manufactura para la economía?

¿Realmente necesitamos la manufactura en la era de la información?

La manufactura es una actividad humana que se difunde en todas las fases de nuestra vida. Los productos de la manufactura se encuentran por doquier. Todo lo que vestimos, donde vivimos, en lo que viajamos, incluso la mayor parte de nuestros alimentos, ha pasado a través de algún proceso de manufactura. La palabra manufactura se deriva del latín (*manus* = mano, *factus* = hecho), y en los diccionarios se define como "la fabricación de bienes y artículos a mano o, especialmente por maquinaria, frecuentemente en gran escala y con división del trabajo". Veremos que esta definición no es necesariamente completa, pero podemos utilizarla para entender la función de la manufactura en el desarrollo humano.

1-1 DESARROLLOS HISTÓRICOS

La historia de la manufactura está marcada por desarrollos graduales, pero los efectos acumulativos han tenido sustanciales consecuencias sociales, las cuales se pueden considerar revolucionarias.

1-1-1 Primeros desarrollos

La manufactura se ha practicado durante varios miles de años, comenzando con la producción de artículos de piedra, cerámica y metal. Los romanos ya tenían fábricas para la producción en masa de artículos de vidrio, y en muchas actividades, incluyendo la minería, la metalurgia, y la industria textil se ha empleado desde hace mucho tiempo el

principio de la división del trabajo. Sin embargo, por siglos gran parte de la manufactura permaneció como una actividad esencialmente individual, practicada por artesanos y sus aprendices. El ingenio de generaciones sucesivas de artesanos condujo al desarrollo de muchos procesos y a una gran variedad de productos (tabla 1-1), pero la escala de producción estaba necesariamente limitada por la potencia disponible. La potencia del agua sustituyó a la muscular en la Edad Media, pero sólo hasta el punto permitido por la disponibilidad de agua en movimiento; ello limitó la localización de las industrias y la tasa de crecimiento de la producción industrial.

1-1-2 La primera Revolución Industrial

Al término del siglo XVIII, el desarrollo de la máquina de vapor hizo posible disponer de potencia en grandes cantidades y en muchos lugares. Esto agilizó los avances en los procesos de manufactura (tabla 1-1) y facilitó el crecimiento de la producción, proporcionando una abundancia de bienes y, con la mecanización de la agricultura, de productos agrícolas. Como resultado, la sociedad también se transformó. Más tarde, este desarrollo se conoció como la Revolución Industrial, la cual se caracterizó porque la potencia mecánica reemplaza a la física del trabajador. Muchas máquinas eran accionadas por bandas a partir de un eje motor común, y el alcance de la mecanización era limitado.

Hacia mediados del siglo XIX, algunas funciones del trabajador se reemplazaron por máquinas, en las cuales los componentes mecánicos, tales como levas y palancas, estaban ingeniosamente configurados para realizar tareas simples y repetitivas. Esa mecanización, o "automatización dura", eliminó algunos empleos, pero los trabajadores desplazados de esta forma, junto con aquellos que no eran estratégicos para la agricultura, generalmente encontraron trabajos en la creciente área de la manufactura y en sectores de servicios de la economía. A principios del siglo XX, el desarrollo se impulsó aún más por la introducción de la potencia eléctrica: las máquinas ahora podían ser accionadas individualmente, y los controles con base en circuitos eléctricos permitieron un alto grado de complejidad.

1-1-3 La segunda Revolución Industrial

A partir de la segunda mitad del siglo XX han tenido lugar desarrollos adicionales. Las computadoras comenzaron a ofrecer una potencia computacional ni siquiera soñada, y los dispositivos electrónicos de estado sólido —desarrollados a partir del transistor— permitieron la fabricación de dispositivos de gran flexibilidad a un costo cada vez menor. A principios de los años setenta la disponibilidad del microchip, con miles de componentes electrónicos abarrotados en una minúscula oblea de silicio, hizo posible desempeñar tareas computacionales, de control, de planeación y de administración a altas velocidades, con frecuencia en tiempo real (es decir, donde el proceso ocurre mientras se controla) y a bajo costo. Las consecuencias han sido de gran alcance en cada faceta de nuestra vida, y parece que aún no hay límites para el desarrollo. Sin embargo, es evidente que las implicaciones sociales de estos cambios serán tan fundamentales como aquellas forjadas por la Revolución Industrial del siglo XIX; actualmente la mayoría de los observadores concuerda en que estamos en medio de la segunda Revolución Industrial.

Tabla 1-1 Desarrollo histórico de procesos unitarios de manufactura

Año	Fundición	Deformación	Unión	Maquinado	Cerámicos	Plásticos	Máquina y controles
4000 a.C.	Piedra, moldes de arcilla	Doblado, forjado (Au, Ag, Cu)	Remachado	Abrasión: piedra, esmeril, granate, pedernal	Alfafería, construcción manual	Madera, fibras naturales	Cuña, control manual
2500	Cera perdida (bronce)	Corte, formado de lámina	Soldadura, soldadura fuerte	Perforado, aserrado	Cuentas de vidrio, torno de alfarero		Rueda, taladro de cuerda
1000		Forjado en caliente (hierro), estirado de alambre (?)	Soldadura por forja, pegamento	Sierras de hierro, torneado (madera)	Prensado de vidrio, barnizado		Palanca, polea, torno de cuerda
d.C. 0		Prensa de tornillo, acuñado (latón), forjado (acero)	Unión por difusión (joyería)	Limado	Soplado de vidrio		Manivela
1000		Estirado de alambre			Artículos de barro, porcelana (China)	Pegamentos proteicos	Rueda hidráulica
1400	Fundición en arena, hierro fundido	Martinete hidráulico		Lija, fabricación de relojes	Mayólica, vidrio cristalino		Biela, volante de inercia
1600	Molde permanente	Hojalata, laminado para acuñamiento			Vaciado en hueco		Levas, torno de rueda
1800	Molde seccionado	Embutido profundo, laminado (acero), extrusión (Pb)		Perforado, torneado, corte de tornillos	Extrusión, vidrio plano, porcelana (Alemania)		Máquina de vapor, máquina de perforación, taladro de banco, tarjetas perforadas
1850	Fundición centrífuga, máquina de moldeo	Martinete de vapor, laminado de hojalata Mg, Al, Ni		Formado, fresado, fresado químico	Vidrio de ventana por medio de cilindro cortado	Vulcanización	Mecanización, torno de copiado, máquina fresadora
1875	Acero Bessemer	Laminado de rieles, laminado continuo			SiC, rueda de amolar vitrificada	Extrusión de caucho, moldeo, celuloide	Torno revólver, máquina universal
1900	Aluminio	Perforación de tubos, extrusión (Cu)	Oxiacetileno, arco, soldadura por resistencia eléctrica	Fresa madre, acero para alta velocidad	Fabricación automática de botellas, SiC sintético, Al_2O_3		Motor eléctrico, máquina automática de tornillos, torno engranado, calibrador PASA-NO PASA

Tabla 1-1 *(continuación)*

Año	Fundición	Deformación	Unión	Maquinado	Cerámicos	Plásticos	Máquinas y controles
1920	Fundición en matriz	Alambre de tungsteno a partir de polvo, endurecimiento por precipitación del Al, superaleación de Co, Be	Electrodo recubierto, soldadura de arco con gas, soldadura automática, rocío térmico		Vidrio laminado, WC	Fundición, moldeo en frío, moldeo por inyección, baquelita, acetato de vinilo	Automatización dura (eléctrica), línea de producción
1940	Cera perdida (ingeniería), arena aglomerada con resina	Extrusión (acero), metalurgia de polvos, Ti; superaleaciones de Ni, prensado isostático	Unión con rodillos, arco sumergido, soldadura con espárrago y gas inerte, electrodos cubiertos, adhesivos estructurales	ECM		Moldeo por transferencia, espumas de PVC, PE, acrílicos, poliestireno, nailon, poliéster, caucho sintético	Medición de la rugosidad
1950	Molde cerámico, hierro nodular	Extrusión en frío (acero)	Soldadura TIG, MIG, electroescoria	EDM	Cerámicas vítreas	ABS, siliconas, fluorocarbonos, poliuretano	Control numérico (CN)
1960	Solidificación rápida	Extrusión hidrostática, formado superplástico, HIP	Soldadura con arco de plasma, con haz de electrones, soldadura blanda en olas	Diamante sintético	Vidrio flotado	Acetales, policarbonato, polipropileno, cianoacrilato	CNC, CAD, CMM, tecnología de grupo, robot, cambiador automático de herramientas
1970	Fundición al vacío, solidificación direccional	Forjado isotérmico, HIP, forjado de polvos	Láser	Herramientas revestidas	NCB, cerámicos técnicos, fibras ópticas	Poliamida, aramidas, polibutileno	CAD/CAM, control adaptable, controlador programable
1980	Cristal individual, vaciado a presión	Tixoformado, moldeo por inyección de polvos	Seguimiento de la costura, soldadura de montaje de superficie	Maquinado de alta velocidad	Polvos de nanoescala	Compuestos, moldeo por inyección de reacción	CIM, manufactura flexible, AGV, inteligencia artificial
1990		Polvos de nanofase		Maquinado duro	Superconductor de alta temperatura		Manufactura esbelta, manufactura ágil

Una característica de ésta es que, además de la posibilidad de reemplazar la mayoría del trabajo físico, ahora es posible intensificar y algunas veces incluso sustituir el esfuerzo mental. Algunas consecuencias de este desarrollo ya son evidentes: muchos trabajos peligrosos, físicamente exigentes, o aburridos los realizan máquinas o robots controlados por computadoras; la variedad de los productos se incrementa, la calidad mejora; la productividad, expresada por el rendimiento por trabajo unitario, se eleva; la demanda de recursos naturales disminuye.

Una de las características más incisivas del desarrollo es el drástico incremento en nuestra capacidad para reunir y procesar información. En general se acepta que hemos entrado a la Era de la Información. Existen quienes creen que estamos en el proceso de desarrollo hacia una sociedad "postindustrial", en la cual la manufactura se debilitará y el sector de servicios generará riqueza con base en el procesamiento de la información. Para explorar la realidad de tales creencias, es necesario considerar la función de la manufactura en la economía.

1-2 FUNCIÓN ECONÓMICA DE LA MANUFACTURA

Con frecuencia la manufactura ha sido tildada como villana en el devenir del desarrollo humano. Por supuesto, la primera Revolución Industrial comenzó con poca preocupación por parte de la misma gente que la hizo posible. Pero la fábrica fue la alternativa escogida voluntariamente por las masas, que estaba en busca de un escape de una existencia rural cargada de hambre y enfermedades. Los estudios demográficos modernos demuestran que la miseria de la vida rural impulsó a la gente a atestarse en las ciudades aun antes de la primera Revolución Industrial. Desde entonces, los excesos se han contenido y el crecimiento de la manufactura ha conducido a avances innegables, no sólo al proporcionar una abundancia de posesiones materiales, sino también al crear la base económica para mejoras genuinas en la calidad de vida.

No existen medidas universales para expresar la calidad de vida pero, en ausencia de otra mejor, el *producto interno bruto* (PIB, la suma del valor de todos los bienes y servicios que se producen en una economía nacional) puede tomarse como la tasa del bienestar material. (Incluso para ello resulta una medida imperfecta, ya que excluye el valor del trabajo realizado en casa, en organizaciones voluntarias, y así por el estilo. De esta forma, presenta un punto de vista distorsionado en favor de las naciones industrialmente desarrolladas.)

Si se analizan los componentes del PIB, es evidente que la riqueza material proviene sólo de dos fuentes sustanciales y básicas: los recursos materiales y el conocimiento y energía que la gente aplica al utilizarlos. La agricultura y la minería son de primera importancia, aunque sólo representan entre 3 y 8% del PIB de las naciones industrialmente desarrolladas. La manufactura reclamó la mayor parte hasta los años cincuenta. Desde entonces, gran parte del crecimiento ha tenido lugar en el sector de servicios, y datos recientes (Fig. 1-1) sugieren que, al menos en las economías altamente desarrolladas, la riqueza material es independiente de la contribución de la manufactura al PIB. Sin embargo, esto es una ilusión. Lo que los números no muestran es que el aumento de la riqueza se basa en un sector manufacturero cada vez más complejo; esto a su vez crea la necesidad de muchas actividades de soporte similarmente complejas, tales como los

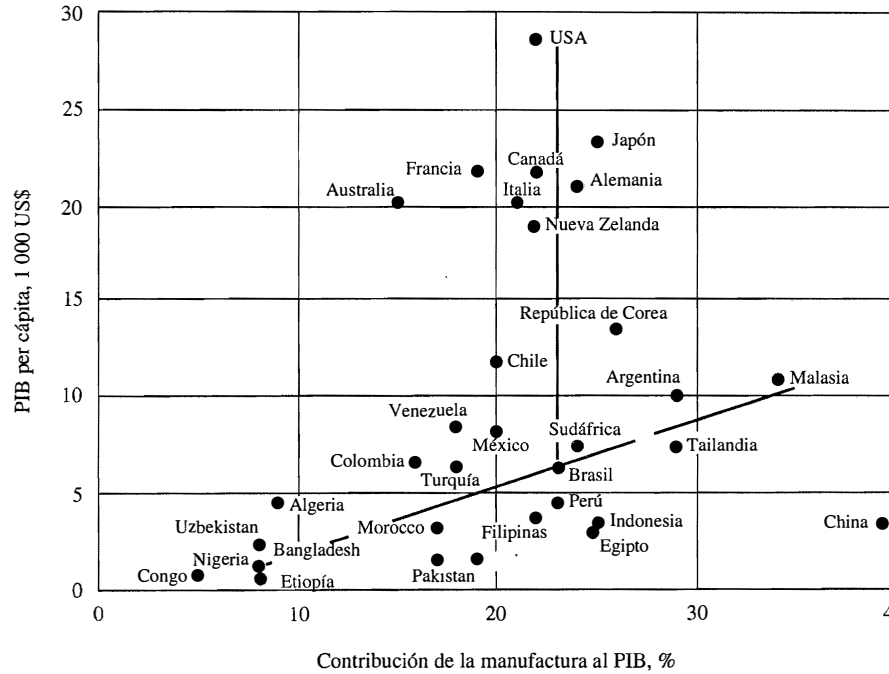


Figura 1-1 El nivel de vida, expresado por la producción per cápita de la economía, aumenta con el desarrollo de la manufactura. En una etapa más alta del desarrollo industrial, la producción refleja la elevada complejidad de la manufactura. Para tomar en cuenta las diferencias en el poder adquisitivo, el PIB para 1997 se presenta con base en la paridad del poder adquisitivo PPA. (*Fuente: World Development Report 1998/99, World Bank, 1998.*)

servicios de investigación, de diseño, y financieros; la distribución, el mantenimiento y el servicio en campo de los productos; incluso en la hotelería y la industria del turismo relacionadas con la manufactura. Para propósitos estadísticos, todas estas actividades de soporte están clasificadas como servicios. Pero, a menos que una nación este excepcionalmente bien dotada de recursos naturales, un sector de servicios fuerte sólo puede existir si hay uno similar de manufactura. Sólo las interacciones de las dos áreas pueden asegurar ventajas competitivas en una economía global en que las tareas más sencillas migran a ambientes con mano de obra barata. Con frecuencia se dice que, en la era de la información, el conocimiento es el bien más valioso. Esto es muy cierto, pero también lo es el que el conocimiento mismo puede ser relativamente barato. La riqueza se genera con mayor abundancia *produciendo artículos comerciales en que el conocimiento está implícito.*

Ya no existen naciones aisladas, y el comercio internacional ha crecido hasta el punto en que las economías de todos los países están interconectadas. El flujo de bienes y servicios se libera en forma creciente de las muchas restricciones de tiempos pasados. Para que las industrias vitales de manufactura crezcan y sobrevivan, deben ser compe-

titivas a escala global. De esta forma, la manufactura ocupa una posición central en la economía de las naciones y, por supuesto, en la economía del mundo.

Muchas actividades económicas proporcionan recursos esenciales para la manufactura; al mismo tiempo, la manufactura crea todos los productos necesarios para la conversión de energía y materias primas, construcción, transporte, comunicación, cuidado de la salud, entretenimiento y ocio. Estas industrias y negocios, junto con el consumidor individual, dictan la gama de productos que la manufactura debe proporcionar. La competitividad implica la necesidad no sólo de un costo más bajo, sino también de desarrollar y producir productos verdaderamente de clase mundial. Un paso esencial para alcanzar esta meta es la capacitación de ingenieros y técnicos para las industrias de manufactura.

Como el alcance de la manufactura es enorme, para nuestro propósito lo estrecharemos a la manufactura de artículos durables para consumo y para maquinarias de producción. Con frecuencia se hace una distinción entre productos de alta tecnología (*high-tech*) y baja tecnología; como veremos, la diferencia puede ser engañosa.

1-3 LA MANUFACTURA COMO UNA ACTIVIDAD TÉCNICA

Para reconocer los retos enfrentados por los ingenieros y técnicos de manufactura, considere algunos ejemplos tomados de la experiencia cotidiana.

Ejemplo 1-1

El motor de reacción es una máquina diseñada con el conocimiento más avanzado de los principios de la ingeniería térmica y de fluidos, que emplean todos los modelos por computadora disponibles para la evaluación del diseño y del desempeño. Su manufactura exige también las técnicas más avanzadas, especialmente porque sus componentes se sujetan a condiciones extremas de operación. Una máquina turbofan (Fig. 1-2) consiste esencialmente de tres secciones principales. Primero, el aire se comprime en las zonas de baja y de alta presión del compresor. Segundo, se introduce combustible en el aire comprimido en la cámara de combustión y se enciende la mezcla combustible-aire. Los gases calientes resultantes se descargan a través de turbinas de alta y baja presión, las cuales extraen energía de los gases para impulsar los rotores de alta y baja presión del compresor. Tercero, una hélice grande en el frente del motor eleva la fuerza de empuje al incrementar la masa de aire desplazado: en un motor turbofan de alta derivación, la razón de desviación es 6:1 o mayor, lo cual significa que la cantidad de aire que pasa alrededor del motor es seis veces mayor que la que pasa a través de él. Los beneficios adicionales de la hélice incluyen un menor consumo de combustible y una menor intensidad del ruido del motor.

La eficiencia termodinámica se incrementa con la temperatura de entrada de la turbina, y el consumo de combustible disminuye al aumentar la relación de compresión (Fig. 1-3*a*). La compresión eleva la temperatura del aire y, en los motores recientes, los álabes del compresor de la etapa final deben funcionar a muy altas temperaturas (Fig. 1-3*b*); a través del texto se verá que tuvieron que desarrollarse nuevos materiales y tecnologías para fabricar los álabes del compresor.

Una aplicación aún más exigente es la turbina donde las temperaturas de entrada están limitadas por la capacidad térmica de los materiales de los álabes (Fig. 1-4*a*). Los desarrollos de las superaleaciones permitieron un incremento gradual en la temperatura de operación, pero se dio un salto en el desempeño al enfriar los álabes mediante el paso del aire, del compresor sin

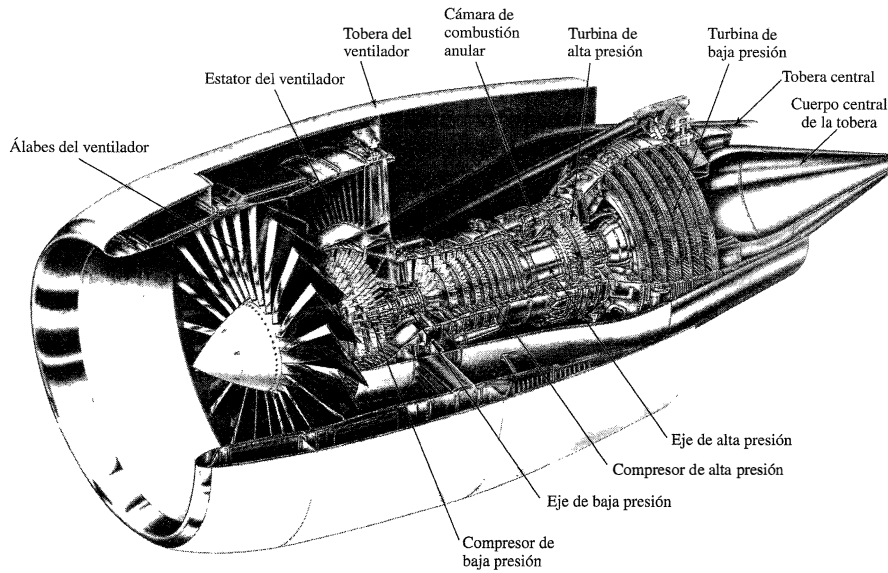


Figura 1-2 El motor de reacción actual es un producto manufacturado altamente complejo; muchas de sus partes deben operar a temperaturas y niveles de esfuerzos elevados, lo cual exige métodos avanzados de manufactura. El motor GE90 es uno de los motores aprobados para la aeronave Boeing 777. Tiene 5.3 m de longitud, una hélice de 3.1 de diámetro y tiene una especificación de 410 kN de empuje en una razón de desvío de 9:1. (*Cortesía de la General Electric Company, Cincinnati, Ohio.*)

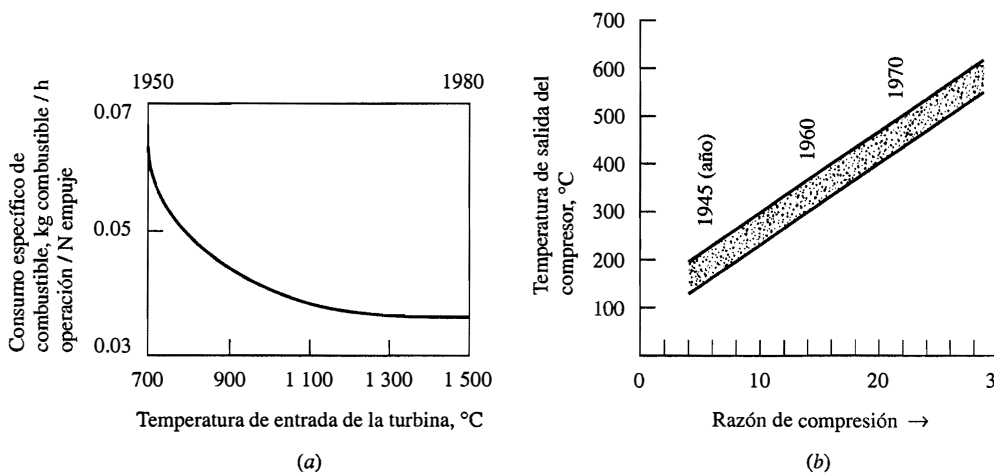


Figura 1-3 Las temperaturas de operación mayores resultan en mayor eficiencia y menor consumo de combustible. De aquí, (*a*) el consumo específico de combustible disminuye incrementando la temperatura de entrada de la turbina, y (*b*) las razones de compresión mayores conducen a temperaturas mayores, incluso en la sección del compresor. Ambas etapas requieren nuevos materiales y nuevas técnicas de manufactura. [(*a*) *Reimpreso con permiso de M.F. Ashby y D.R.H. Jones, Engineering Materials, Pergamon Press, 1980;* (*b*) *basada en datos de G.W. Meetham, The Metallurgist and Materials Technologist,* **8**(*11*)*: 589-593, 1976.*]

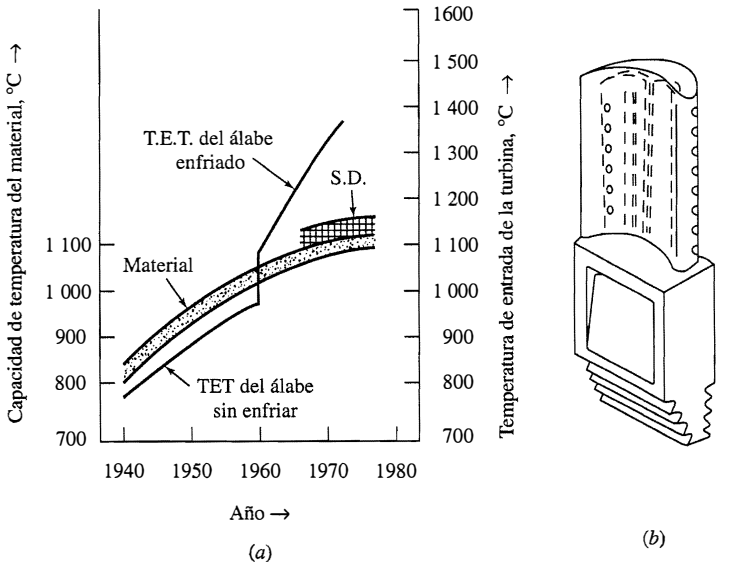


Figura 1-4 Las temperaturas de entrada de la turbina (TET) se pueden incrementar enfriando los álabes (a); para esto, se desarrollaron técnicas nuevas para hacer agujeros en materiales duros. S.D.: solidificación direccional. (*Según M.F. Ashby y D.R.H. Jones, como en la figura 1-3a.*) En el ejemplo que se muestra en (b), los agujeros se moldean en un álabe de una turbina de fundición de precisión.

quemar, a través de agujeros pequeños practicados en ellos (Fig. 1-4*b*). De esta forma, además de desarrollar nuevos procesos de manufactura para aleaciones cada vez más difíciles de manufacturar, se debían encontrar técnicas para hacer orificios muy delgados y profundos en materiales muy duros. Aunque pocas personas son especialistas en el motor de reacción, todos reconocen que es un producto de alta tecnología.

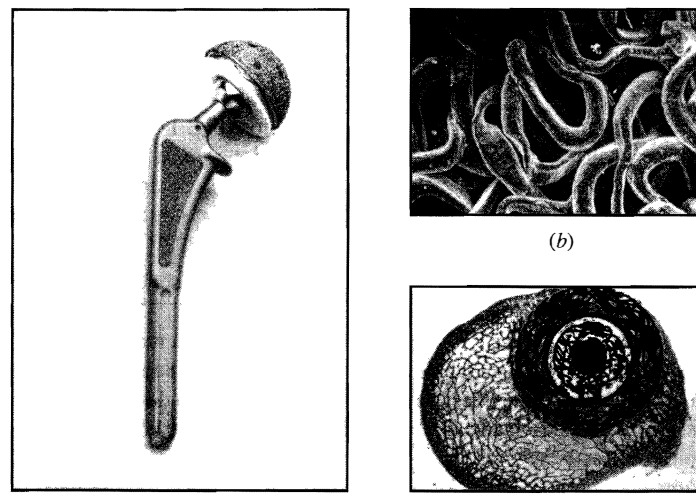
Ejemplo 1-2

Los automóviles se consideraban comúnmente como productos de media o incluso de baja tecnología, y algunos sugerían que su manufactura debería dejarse a economías menos desarrolladas. Ninguna persona informada pensaría así hoy en día. El diseño de automóviles involucra los mismos principios y técnicas avanzadas que el de las aeronaves, y la industria automotriz hizo muchos cambios para satisfacer las nuevas demandas relativas a la seguridad, nivel de contaminación, consumo de gasolina, durabilidad y calidad del producto. Estos cambios han afectado la elección de materiales y técnicas de manufactura. Por ejemplo, las primeras carrocerías de automóviles tenían un marco de acero al cual se unían tableros de madera. Pronto, la madera fue reemplazada por el acero que era asegurado a un marco más pesado (un bastidor). La necesidad de reducir peso condujo a la construcción del monocasco; los cuerpos de acero sin marcos, completamente soldados, fueron hechos al bajo carbono, lo que implica que posee propiedades de formado altamente deseables. Como se verá, los esfuerzos adicionales para la reducción de peso y el aumento de la resistencia a la corrosión condujeron a la introducción del acero galvanizado, los aceros de alta resistencia y baja aleación, y las aleaciones de aluminio diseñadas especialmente para aplicaciones automotrices. Mucho debió aprenderse acerca del comportamiento de formado de estos materiales, de manera que su capacidad para moldear figuras complejas pudiera predecirse. Los polímeros también han sido usados, primero como epóxicos

reforzados con fibra de vidrio y, más recientemente, como partes del cuerpo producidas en masa, colocadas en un marco espacial de acero manejable con maquinado de precisión. El automóvil se ha convertido en un producto mucho más complejo, con varias computadoras a bordo que realiza funciones críticas de control. Actualmente la producción de automóviles tiene todas las características de una industria de alta tecnología.

Ejemplo 1-3

La bioingeniería ofrece ejemplos en los que la manufactura beneficia directamente a la humanidad. Una de las cirugías ortopédicas realizada con mayor frecuencia es el reemplazo de articulaciones de cadera artríticas con implantes quirúrgicos (Fig. 1-5). Se debían encontrar materiales que pudieran implantarse en el cuerpo sin reacciones adversas, y que soportaran la sustancial carga dinámica (de millones de ciclos por año) impuestas por pacientes cada vez más jóvenes y activos. Los materiales para estas aplicaciones demuestran el beneficio de la transferencia de tecnología: varias aleaciones son descendientes directas de las usadas en motores de reacción. La forma de la cabeza esférica es crítica, y se tuvieron que desarrollar técnicas para el maquinado de alta precisión. También se debieron encontrar mejores formas de sujeción de la prótesis en el hueso, ya que las juntas adhesivas con frecuencia fallan después de algunos años de servicio. Una metodología más reciente utiliza la capacidad regenerativa del hueso para establecer el enlace, por tanto se tuvieron que desarrollar procesos de manufactura para proporcionar canales intrincados en la superficie de esa parte, en la cual puede crecer tejido nuevo.



(*a*) (*b*) (*c*)

Figura 1-5 Los reemplazos de la articulación de la cadera son productos manufacturados avanzados. (*a*) El vástago de aleación de titanio se implanta en el fémur y la cabeza en el acetábulo (alvéolo del hueso iliaco), con un recubrimiento de polímero resistente al desgaste, lo cual proporciona la superficie deslizante. (*Cortesía de Zimmer Inc., Warsaw, Indiana.*) (*b*) Un alambre de titanio puro de 0.25 mm de diámetro se sinteriza en una masa porosa para (*c*) proporcionar espacio para el crecimiento de tejido óseo nuevo que fija el implante en el hueso de un animal de laboratorio. (*Cortesía del Dr. W. Rostoker, University of Illinois, en Chicago.*)

Ejemplo 1-4

La microelectrónica, la cual se encuentra en el centro de la segunda Revolución Industrial, tuvo sus orígenes en fenómenos físicos que sólo se podían explotar adaptando las viejas tecnologías de manufactura y creando nuevas para materiales novedosos. Nos familiarizaremos con los avances en los procesos de manufactura que han hecho posible la creación de millones de componentes en una sola oblea de silicio. Como resultado de estos avances, el desempeño se ha incrementado drásticamente mientras que el costo ha disminuido sustancialmente: una combinación sin paralelo.

1-4 ALCANCE Y PROPÓSITO DEL LIBRO

En este libro se explorarán los procesos de manufactura resaltando los principios físicos. Con el cambio hacia la era de la información, también ha habido una proliferación de aplicaciones de la computadora en la manufactura. De esta manera, sería tentador concluir que el conocimiento de los principios físicos está perdiendo importancia y que el procesamiento de información —en el sentido más estrecho del procesamiento de datos— se convertirá en la actividad central en la manufactura. Nada podría estar más lejos de la verdad. El procesamiento de información, aunque de gran importancia, es sólo una herramienta que por sí misma no puede asegurar la competitividad. También veremos que la computadora puede emplearse tanto para desarrollar como para controlar procesos. Pero incluso la completa computarización de un proceso será en vano si una mente más original desarrolla un proceso nuevo que elimine las ventajas del anterior. Los procesos existentes pueden ser controlarse y mejorarse efectivamente, y sólo se pueden desarrollar procesos nuevos si se comprende la función de las variables de diseño y si, al menos, se puede formular un modelo elemental, pero bien fundado físicamente, del proceso. Por todas estas razones, este libro está dedicado al desarrollo de un entendimiento de los antecedentes físicos de los procesos unitarios que se usan para la manufactura. Se debe reconocer, por supuesto, que las piezas fabricadas deberán ensamblarse para obtener productos terminados, pero estas operaciones sólo se analizarán brevemente.

Enfoque general Al elegir el enfoque particular de este libro, la guía fue que los principios fundamentales y generales son más importantes que los detalles. El número de procesos de manufactura en existencia desafía su enumeración, sin contar la descripción, en un único tomo. Ya existen muchos libros enciclopédicos disponibles en donde se pueden encontrar los detalles de procesos individuales. Así, el objetivo no es proporcionar información detallada, sino *impartir un conocimiento de los principios* que se pueden usar para considerar las capacidades del proceso y sus implicaciones en el diseño del producto, para mejorar procesos existentes, crear nuevos, e interpretar la información que se presenta en libros, y cada vez más, en bases de datos en computadora. Citando a Sherlock Holmes: "Un hombre deberá mantener el ático de su pequeño cerebro almacenado con todos los muebles que probablemente usará, y el resto lo puede poner en el cuarto de trastos viejos de su biblioteca, donde puede obtenerlo si desea." (A. Conan Doyle, *Adventure of the Five Orange Pips*, Crown Publishers, Nueva York, 1976.)

Al tratar con principios, se reconoce que se necesitan muchos ingenieros y técnicos para formar un equipo de manufactura. Algunos miembros del equipo pueden ser especialistas en manufactura, pero otros lo son en ingeniería y tecnología de materiales, en ingeniería industrial, en ingeniería mecánica o en ingeniería de sistemas. Algunos estudiantes pueden embarcarse en la exploración de la manufactura después de tomar un curso de propiedades y resistencia de los materiales; otros puede que no tengan más preparación que la física y química de preparatoria. El libro está escrito para servir a ambos grupos. Aquellos que tienen la preparación adecuada pueden simplemente pasar por alto el material de apoyo o leerlo como repaso; otros pueden usarlo como un punto de partida para sus estudios. Por simplicidad, el material de apoyo se presenta en capítulos o secciones por separado. La meta es que al menos un estudiante adquiera un conocimiento de los principios del proceso hasta un nivel en que sea posible la interacción útil con especialistas. En un nivel más alto, puede servir como base para la especialización.

En general, se intenta resolver el dilema de la profundidad contra la amplitud. Un tratamiento completamente cuantitativo requeriría una extensión excesiva y fácilmente podría oscurecer los temas generales; un tratamiento totalmente cualitativo proporcionaría poca guía para el diseño inteligente de productos o para la selección eficiente de procesos. La presentación tiene como objetivo retener los principios científicos bien fundados que se deben concentrar en el tema; en particular, se subrayan las restricciones ejercidas mutuamente por los materiales y los procesos, y por ellos sobre las posibilidades de diseño. Hoy en día muchos procesos se pueden modelar detalladamente con métodos numéricos; éste es el campo del especialista, y sólo se indican las posibilidades. Sin embargo, algunos procesos están sujetos a tratamientos cuantitativos sencillos, lo que también sirve para clarificar las bases físicas; tales tratamientos se incluirán, pero sin pruebas o demostraciones que podrían —y pueden— llenar una biblioteca especializada. Las demostraciones de las ecuaciones más importantes se proporcionan en el Manual del maestro y se pueden obtener del profesor.

El material está organizado para hacer más fácil su estudio en diferentes niveles. Se puede obtener una comprensión general de los procesos y principios físicos subyacentes leyendo las partes no cuantitativas del libro. El desarrollo básico del proceso se hace posible con la inclusión de aspectos cuantitativos. Con el ánimo de ver la manufactura como un sistema total en el que el diseño y el análisis son partes integrales, se destacan las implicaciones de diseño en las posibilidades y restricciones del proceso, siempre que es posible.

Ejemplos y problemas Están diseñados para ampliar esta comprensión. En la mayoría de los capítulos, los problemas se presentan en tres grupos:

A: *Prueba de conocimiento.* Requiere una recapitulación directa del material presentado.

B: *Aplicación del conocimiento.* Los problemas de esta clase se pueden originar en el curso de un análisis en grupo y requieren razonamiento y presentación lógica.

C: *Emisión de juicios cuantitativos.* Para resolver estos problemas se debe consultar la información de este libro y, en casos limitados, de libros de referencia comúnmente disponibles; además, es necesario realizar algunos cálculos.

Lecturas adicionales El lector interesado en detalles adicionales o en las teorías de procesos, encontrará material suficiente en las lecturas sugeridas al final de cada capítulo. Además de libros, hay una variedad creciente de programas de computadora y de videos instructivos. La Web (red informática) es una fuente rica y actualizada de información sobre libros y publicaciones hechas por sociedades profesionales, asociaciones comerciales y fabricantes.

Aunque no es absolutamente necesario, el acceso a algunos volúmenes básicos de referencia estimula el uso de la literatura. Las fuentes de información de un único volumen más amplias son: *Metals Handbook Desk Edition*, 2a ed. (1988); *Engineered Materials Handbook Desk Edition* (1955), y *ASM Handbook*, vol. 20, *Materials Selection and Design* (1977), todos publicados por la ASM International, Materials Park, Ohio.

Normas Las normas gobiernan muchas actividades de la ingeniería. En Estados Unidos, las normas las proporcionan el *American National Standars Institute* (ANSI), la *American Society for Testing and Materials* (ASTM), la *American Society of Mechanical Engineers* (ASME), y otras entidades profesionales y gubernamentales. Existen instituciones equivalentes en otros países, y las normas internacionales las desarrolla la *International Organization for Standardization* (conocida como ISO). Periódicamente, las normas se revisan y se indica el año de revisión. El ANSI mantiene una base de datos de normas mundiales (*A Global Standards Network*) en la Web (http://www.nssn.org).

Unidades de medición Actualmente, en la mayoría de las actividades de ingeniería las mediciones se realizan en unidades del *Système International d'Unités* (SI; véase ASTM Standard E380, "Standard Metric Practice and National Institute of Standards and Technology" *NIST Special Publication 814: Interpretation of the SI for the United States and Metric Conversion Policy for Federal Agencies*). En las publicaciones técnicas se usan las unidades SI casi exclusivamente, y cualquier ingeniero no versado en el sistema pronto será incapaz de mantenerse al día con los avances. Las unidades no correspondientes al SI no son permitidas ni siquiera en las etiquetas o en documentación de la Unión Europea, incluyendo al Reino Unido. No obstante, el sistema inglés pierde importancia muy lentamente en Estados Unidos, por lo que en el apéndice A y en la primera de forros se proporciona una tabla de conversión para las unidades más usadas. En el uso diario, con frecuencia se hacen conversiones aproximadas: tales aproximaciones se analizan en la sección 3-2-1 para dimensiones, y en la sección 4-1-1 para esfuerzos. Para la masa se usará g, kg o Mg (1 tonelada métrica = 1.102 toneladas cortas). Una tonelada fuerza (tonf) es igual a aproximadamente 10 MN. Note que al usar el término *billón* se hace referencia a 10^9.

1-5 RESUMEN

La manufactura es la fabricación de bienes y artículos. Durante los dos últimos siglos, claramente ha sido el motor del desarrollo económico. Ahora que hemos entrado en la era de la información, podría parecer que está perdiendo su importancia. Nada podría estar más alejado de la realidad. Cierto, la manufactura parece haberse estabilizado en

cerca del 20% del producto interno bruto en las naciones desarrolladas, mientras que el sector de servicios crece constantemente. Sin embargo, gran parte de él existe sólo porque soporta un sector de manufactura cada vez más complejo. La manufactura aún proporciona los bienes para nuestra existencia, nuestra vivienda, transporte, ocio, necesidades de salud, e incluso para la tecnología de información.

La globalización y la competencia reñida aportan el incentivo para el estudio de la manufactura, más fuerte que nunca, y el presente libro tiene como objetivo proporcionar las bases físicas para este estudio. Ningún texto puede cubrir todos los temas en su totalidad, de ahí que se hagan sugerencias para un estudio adicional.

LECTURAS ADICIONALES

Historia

McNeil, I. (ed.): *An Encyclopaedia of the History of Technology*, Routledge, London, 1990.
Singer, C. y otros (eds.): *A History of Technology*, vols. 1-8, Oxford University Press, 1963-1984.

Libros de texto en manufactura en general

Alting, L.: *Manufacturing Engineering Processes*, 2a. ed., Dekker, 1994.
Black, S.C., V. Chiles, A.J. Lissaman y S.J. Martin: *Principles of Engineering Manufacture*, Arnold, 1996.
Brown, J.: *Modern Manufacturing Processes*, Industrial Press, 1991.
Bruce, R.G. (ed.): *Modern Materials Manufacturing Processes*, Prentice Hall, 1997.
DeGarmo, E.P., J.T. Black y R.A. Kohser: *Materials and Processes in Manufacturing*, 8a. ed., Prentice Hall, 1997.
Doyle, L.E., C.A. Keyser, J.L. Leach, G.F. Schrader y M.S. Singer: *Manufacturing Processes and Materials for Engineers*, 3a ed., Prentice Hall, 1985.
Edwards, L. y M. Endean (eds.): *Manufacturing with Materials, Butterworths*, London, 1990.
Fellers, W.O. y W.W. Hunt, *Manufacturing Processes for Technology*, Prentice Hall, 1995.
Ghosh, A. y A.K. Mallik: *Manufacturing Science*, Wiley, 1896.
Groover, M.P.: *Fundamentals of Modern Manufacturing*, Prentice Hall, 1996.
Hitomu, K.: *Manufacturing Systems Engineering*, 2a. ed., Taylor and Francis, 1996.
Kalpakjian, S.: *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, 3a. ed., Addison-Wesley, 1997.
Kalpakjian, S.: *Manufacturing Engineering and Technology*, 3a. ed., Addison-Wesley, 1995.
Lindberg, R.A.: *Processes and Materials of Manufacture*, 4a. ed., Allyn and Bacon, 1990.
Ludema, K.C., R.M. Cadell y A.G. Atkins: *Manufacturing Engineering: Economics and Processes*, Prentice Hall, 1987.
Ostwald, P.F. y J. Munoz: *Manufacturing Processes and Systems*, 9a. ed., Wiley, 1997.
Tanner, J.P.: *Manufacturing Engineering*, 2a. ed. Dekker, 1990.
Todd, R.H., D.K. Allen y L. Alting: *Fundamental Principles of Manufacturing Processes*, Industrial Press, 1994.
Todd, R.H., D.K. Allen y L. Alting: *Manufacturing Processes Reference Guide*, Industrial Press, 1994.
Waters, T.F.: *Fundamentals of Manufacturing for Engineers*, University College London, 1996.

Libros de referencia

Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4a. ed., 9 volúmenes hasta 1998, Society of Manufacturing Engineers, 1983 en adelante.
Avallone, E. y T. Baumeister (eds.): *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 10a. ed., McGraw-Hill, 1996.
Beitz, W. y K.H. Kuttner: *Handbook of Mechanical Engineering*, Springer, 1994.
Fuchs, J.H.: *The Prentice Hall Illustrated Handbook of Advanced Manufacturing Methods*, Prentice Hall, 1988.
Koshal, D. (ed.): *Manufacturing Engineer's Reference Book*, Butterworth-Heinemann, 1993.
Krar, S.F.: *Illustrated Dictionary of Metalworking and Manufacturing*, McGraw-Hill, 1998.
Kreith, F. (ed.): *Handbook of Mechanical Engineering*, CRC Press, 1998.
Kutz, M. (ed.): *Mechanical Engineer's Handbook*, Wiley, 1998.
Kverneland, K.O.: *Metric for Worldwide Manufacturing*, ASME, 1996.
The Making, Shaping and Treating of Steel, 11a. ed., 5 vols., Association of Iron and Steel Engineers, 1999-2000.
Machinery's Handbook, 25a. ed., Industrial Press, 1996.
Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 4a. ed., Wiley-Interscience, 1991-1998.
Walker, J.M. (ed.): *Handbook of Manufacturing Engineering*, Dekker, 1996.
Walsh, R.A.: *McGraw-Hill Machining and Metalworking Handbook*, McGraw-Hill, 1994.

Actas de conferencias periódicas (cobertura actualizada)

Tobias, S.A., F. Koenigsberger, J.M. Alexander, B.J. Davies (eds.): *Advances in Machine Tool Design and Research* (actas de conferencias anuales; desde 1960, Pergamon, Oxford; desde 1972, Macmillan, London).
Proceedings of the North American Metalworking (desde 1983: *Manufacturing*) *Research Conference* (debates de conferencias anuales: McMaster University, 1973; University of Wisconsin-Madison, 1974; volúmenes subsecuentes publicados por la Society of Manufacturing Engineers).
Annual Review of Materials Science (incluye análisis actualizados de tecnologías de manufactura).

Periódicos selectos con cobertura general

Advanced Manufacturing Technology
Artificial Intelligence
Advanced Materials & Processes
American Machinist
Canadian Machinery and Metalworking
Computer and Industrial Engineering
Computer-Aided Engineering
Computers in Mechanical Engineering
International Journal of Advanced Manufacturing Technology
International Journal of the Japan Society for Precision Engineering
International Journal of Machine Tool Design and Research
International Journal of Machine Tools and Manufacturing
International Journal of Production Research
Journal of Engineering for Industry (Trans. ASME)

Journal of Engineering Materials and Technology (Trans. ASME)
Journal of Manufacturing Science and Engineering
Journal of Manufacturing Systems
Journal of Materials and Manufacturing
Machine and Tool Blue Book
Machinery
Machinery and Production Engineering
Manufacturing Engineering
Manufacturing Engineering Transactions
Manufacturing Review
Materials and Manufacturing Processes
Metal Progress
Metals Forum
Microtechnic
Precision Engineering
Production
Production Engineer (contiene resúmenes de ponencias en todos los campos)
Robotics and Computer-Integrated Manufacturing
SAMPE Quarterly
SME Transactions

Periódicos de resúmenes

Applied Mechanics Reviews
Applied Science and Technology Index
Engineering Index
Metals Abstracts

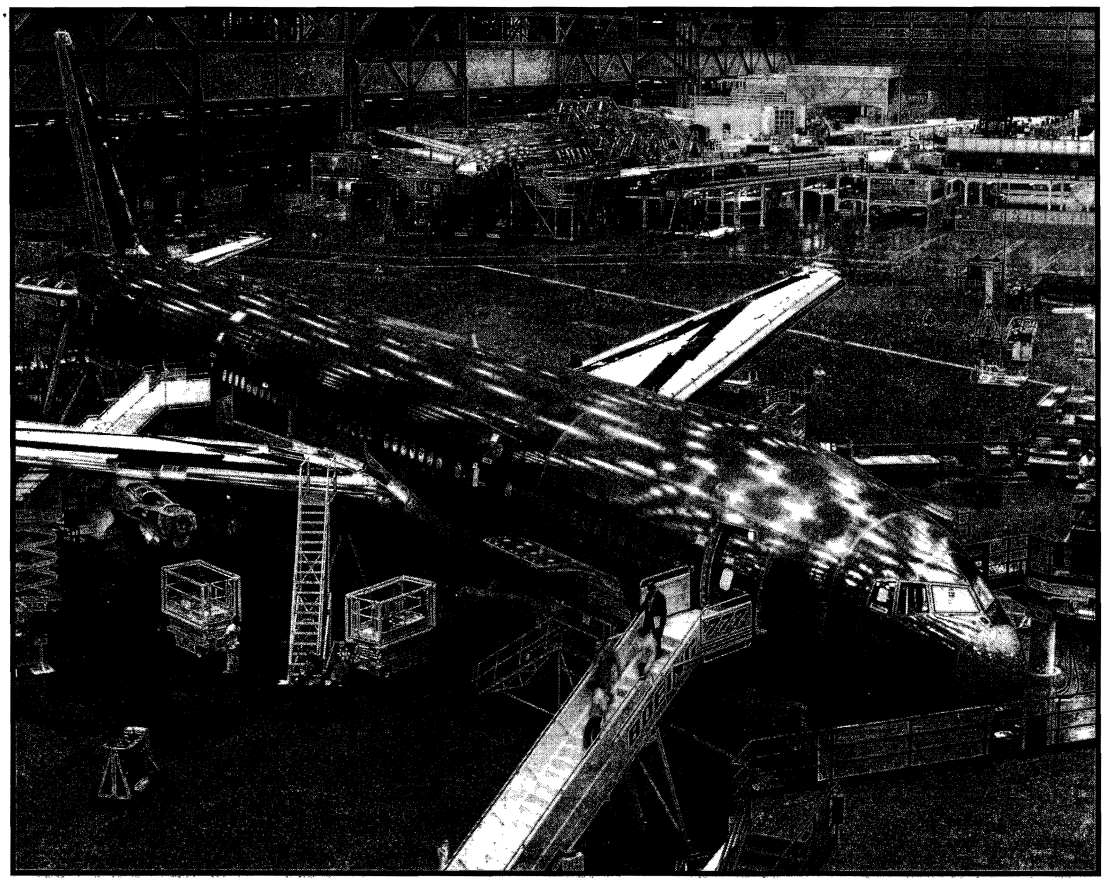
Organizaciones industriales, de negocios y comerciales (EU)

Abrasive Engineering Society (AES), P.O. Box 3157, Butler, PA 16003.
The Aluminum Association (TAAI), 900 19th St. NW, Washington, DC 20006.
Aluminum Extruders Council (AEC), 1000 N. Rand Rd., Wauconda, IL 60084.
American Bureau of Metals Statistics, (ABMS), 400 N. Main St., Manahawkin, NJ 08050.
American Foundrymen's Society, 505 Main St., Des Plaines, IL 60016-8399.
American Gear Manufacturers Association (AGMA), 1500 King St., Alexandria, VA 22314-2730.
American Iron and Steel Institute (AISI), 1101 17th Street NW, Washington, DC 20036.
American National Standards Institute (ANSI), 11 West 42d St., New York, NY 10036.
American Plastics Council, 1275 K Street NW, Washington, DC 20005.
Computer Aided Manufacturing International (CAM-I), 3301 Airport Freeway, Bedford, TX 76021.
Copper Development Association (CDA), 260 Madison Ave., New York, NY 10016.
Ductile Iron Society (DIS), 28938 Lorain Rd., North Olmstead, OH 44070.
Electronic Industries Association (EIA), 2500 Wilson Blvd., Arlington, VA 22201-3834.
Forging Industry Association (FIA), 25 Prospect Ave. West, Cleveland, OH 44115.
Grinding Wheel Institute (GWI), 30200 Detroit Rd., Cleveland, OH 44145-1967.
International Copper Research Association (INCRA), 708 Third Ave., New York, NY 10017.

International Lead Zinc Research Organization (ILZRO), Research Triangle Park, NC 27709-2036.
International Organization for Standardization (ISO), 1 Rue de Varembe, CH-1211 Geneva 20, Switzerland.
Investment Casting Institute (ICI), 8350 N. Central Expressway, Dallas, TX 75206-1602.
Metal Powder Industries Federation (MPIF), 105 College Rd. E., Princeton, NJ 08540-6692.
Steel Founders' Society of America (SFSA), 455 State St., Des Plaines, IL 60016.

Sociedades profesionales y técnicas (EU)

American Ceramic Society (ACcerS), P.O. Box 6236, Westerville OH 43086-6136.
American Foundrymen's Society (AFS), 505 State Street, Des Plaines, IL 60016-8399.
American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers (AIME), 3 Park Ave., New York, NY 10016-5998.
American Society for Metals (ASM) (*véase* ASM International).
ASM International, Materials Park, OH 44073-0002 (anteriormente American Society for Metals [ASM], Metals Park, OH 44073).
American Society for Nondestructive Testing (ASNT), 1711 Arlingate Lane, Columbus, OH 43228-0518.
American Society for Precision Engineering (ASPE), P.O. Box 10826, Raleigh, NC 27605-0826.
American Society for Quality Control (ASQ), 611 E. Wisconsin Ave., Milwaukee, WI 53201-3005.
American Society for Testing and Materials (ASTM), 100 Barr Harbor Rd., West Conshohocken, PA 19428-2959.
American Society of Lubrication Engineers (ASLE), 840 Busse Highway, Park Ridge, IL 60068-2376.
American Society of Mechanical Engineers (ASME), 3 Park Ave., New York, NY 10016.
American Welding Society (AWS), 550 N.W. LeJeune Rd., Miami, FL 33126.
Association of Iron and Steel Engineers (AISE), 3 Gateway Center, Pittsburgh, PA 15222-1004.
The Clay Minerals Society (CMS), P.O. Box 4416, Boulder, CO 80306.
Federation of Materials Societies, 1899 L Street NW, Washington, DC 20036.
International Institution for Production Engineering Research (CIRP), 10, rue Mansart, F-75009 París, Francia.
International Society for Measurement and Control (ISA), 67 Alexandra Drive, Triangle Research Park, NC 27709.
Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), 3 Park Ave., New York, NY 10016-5997.
Institute of Industrial Engineers (IIE), 25 Technology Park/Atlanta, Norcross, GA 30092.
Iron and Steel Society of AIME (ISS), 410 Commonwealth Dr., Warrendale, PA 15086-7512.
Material Research Society, 506 Keystone Drive, Warrendale, PA 15086-7573.
The Minerals, Metals and Materials Society (TMS), 420 Commonwealth Dr., Warrendale, PA 15086-7514.
Society for the Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE), 1161 Parkview Drive, Covina, CA 91724-3748.
SAE International (anteriormente Society of Automotive Engineers, SAE), 400 Commonwealth Dr., Warrendale, PA 1509-0001.
Society of Manufacturing Engineers (SME), One SME Dr., Dearborn, MI 48121-0930.
Society of Plastics Engineers (SPE), 14 Fairfield Dr., Brookfield Center, CT 06804-0403.
The Welding Institute (WI), North American Office, P.O. Box 5268, Hilton Head Island, SC 29928.



La aeronave más reciente de Boeing, el bimotor 777, se diseñó con el uso más amplio de ingeniería concurrente y se construye con cooperación internacional. (*Cortesía de The Boeing Company, Seattle, Washington.*)

capítulo

2

Manufactura

En este capítulo encontraremos una introducción general a la manufactura, incluyendo un repaso rápido de:

La manufactura como un sistema

La empresa de la realización del producto

La ingeniería concurrente para desarrollar productos más rápido y con mayor calidad

La integración de la manufactura con la ayuda de la computadora

Estrategias de control y control numérico

La definición de la manufactura como la fabricación de bienes y artículos revela poco acerca de la complejidad del problema. Una definición más específica se da por CAM-I (Computer Aided Manufacturing International, Arlington, Texas): "Una serie de actividades y operaciones interrelacionadas que involucran diseño, selección de materiales, planeación, producción, aseguramiento de calidad, administración y mercadeo de bienes discretos y durables de consumo." Con esto se admite que, desde el principio, cuando un artesano proporcionaba todos los insumos necesarios, tanto mentales como físicos, la manufactura ha crecido hasta convertirse en un *sistema* con muchos componentes que interactúan en forma dinámica.

2-1 LA EMPRESA DE MANUFACTURA

Usualmente, una entidad de manufactura (una compañía o una sucursal de una gran corporación) posee algunos puntos fuertes particulares tales como tecnología, conocimiento o equipo específicos. Con base en estas ventajas, se deben desarrollar productos nuevos para mantener o ganar participación en el mercado. Para ello se identifican los mercados apropiados, se estiman sus magnitudes y se evalúa la competencia existente y la potencialmente emergente. Después que se proyectan el mercado y su desarrollo

futuro, se identifican productos nuevos. El proceso de *realización del producto* incluye un número de actividades interconectadas (Fig. 2-1).

2-1-1 Desarrollo de especificaciones

En muchas formas, ésta es la fase más importante. Las necesidades se definen en términos de función, desempeño, restricciones de tiempo, costo y otros criterios. Las especificaciones que no cumplen con las necesidades del consumidor conducen a la falla del producto en el mercado, pero las especificaciones innecesariamente estrictas implican un costo elevado y falta de competitividad. Por lo tanto, no se necesitan un exceso en el desempeño ni una vida desmedida, pero el primero se debe optimizar. En general, se ha determinado que un producto que satisface los requisitos mínimos se puede producir a un costo mínimo. Con frecuencia se puede incrementar el desempeño, y por tanto se eleva el precio de venta, con relativamente poco incremento en el costo. Mejoras adicionales pueden conducir a un costo de manufactura mucho más elevado y a un incre-

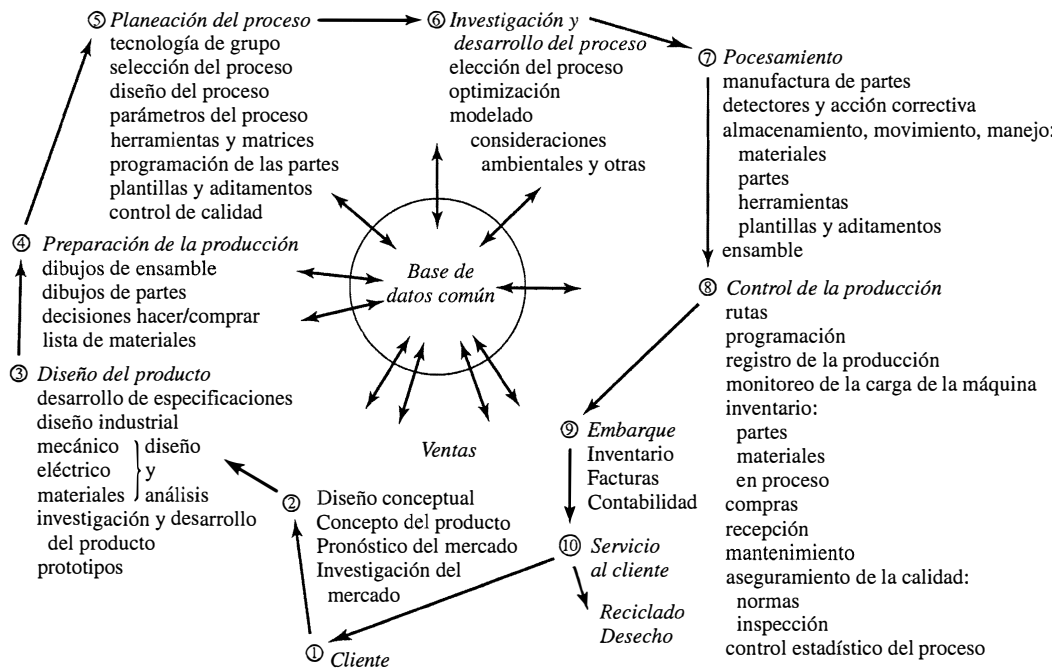


Figura 2-1 La realización de un producto incluye una gran variedad de actividades, muchas de las cuales se han convertido en especialidades. Más adecuadamente, la manufactura se considera un sistema con actividades interdependientes. La interacción se puede reforzar manteniendo una base de datos computarizada común.

mento marginal del atractivo para el consumidor, de esta forma el precio de venta no se puede incrementar proporcionalmente. En consecuencia siempre hay un punto más allá del cual el desempeño no se puede mejorar económicamente. Para asegurar que el producto en verdad tendrá éxito respecto a la competencia, se examina contra el mejor en el ramo (*pruebas de laboratorio*). En ocasiones un producto existente, para el cual no se dispone de dibujos y especificaciones, se reproducirá por medio de la *ingeniería inversa*. La técnica también se usa para la evaluación de productos competitivos: el producto se desensambla y se toma nota de sus características mejores.

2-1-2 Diseño conceptual

Ésta es la fase más creativa: el producto se diseña en bosquejos generales para cumplir su función, es decir, para operar satisfactoriamente a lo largo de su vida esperada y para cubrir las necesidades del cliente. Un cambio significativo de las prácticas pasadas es que la información del cliente es (o debe ser) buscada ávidamente. Las decisiones estarán influidas por el tamaño anticipado del mercado. Los avances en la tecnología de manufactura han conducido a que con frecuencia el consumidor espera productos personalizados a precios de producción en masa. En este caso, el diseño debe hacer el producto adecuado para manufactura en sistemas flexibles de manufactura. En esta etapa no se necesitan dibujos detallados; es suficiente hacer bosquejos conceptuales que muestren las partes y la relación de una con otra. Se hacen elecciones preliminares de materiales y, puesto que éstos siempre influyen en el proceso, los procesos de producción se identifican tentativamente.

2-1-3 Diseño del producto

El producto, ya sea una máquina herramienta, máquina doméstica, producto de construcción, automóvil, aeronave, planta química de procesamiento, estación de potencia, equipo de perforación de petróleo, baterías de cocina, o recipiente de bebidas, se diseña entonces para satisfacer varios criterios. Esto ha conducido al *diseño para X* (DPX), donde *X* denota una lista creciente de criterios, varios de los cuales se enuncian a continuación:

1. *Los diseñadores industriales* se esfuerzan para crear un producto visualmente atractivo y funcional, que el cliente estará deseoso de comprar.

2. La mayor parte de los productos se ensamblan partiendo de un número de componentes; el *diseño para ensamble* (DPE) se esfuerza para hacer esto tan simple como sea posible, eliminando partes superfluas, combinando funciones de partes y diseñando partes en una forma que facilite su ensamble. Los ensambles grandes pueden dividirse en *subensambles* o *módulos*.

3. *Los diseñadores y analistas mecánicos y eléctricos* aseguran que el producto funcionará adecuadamente. Ello requiere la elección de materiales apropiados y, frecuentemente, la cooperación de especialistas en materiales. La mayoría de las fases del diseño del producto puede tener lugar en una computadora. Con la ayuda del *modelado geométrico*, el diseñador puede explorar una variedad de opciones, las cuales pueden

ser analizadas con la ayuda de paquetes de software (incluyendo aquellos para el *análisis del elemento finito*, MEF). El diseño se puede optimizar en un tiempo mucho más corto; se hacen factibles cambios rápidos en el diseño y se pueden satisfacer las cambiantes demandas del consumidor. Tanto ensambles y partes se pueden diseñar con la seguridad de que se acoplarán adecuadamente. Más allá de esto, el *análisis de modo y efecto de falla* (AMEF) se puede llevar a cabo para examinar posibles modos de falla y evaluar la confiabilidad de los sistemas y componentes. Se puede crear una biblioteca de componentes estándar. En algunos casos aún se deben construir modelos físicos, cada vez más por medio de técnicas de *prototipos rápidos*, y también un producto *prototipo* puede ser hecho y probado. El análisis asistido por computadora con frecuencia elimina o minimiza la necesidad de pruebas físicas. Por ejemplo, la simulación por computadora del comportamiento de la carrocería de un automóvil en un choque minimiza la necesidad de pruebas de impacto reales en prototipos. De esta forma, las actividades que se indican en los bloques 3 y 4 de la figura 2-1 se realizan en lo que ha llegado a conocerse como CAD (*diseño asistido por computadora*).

4. El producto debe servir al cliente, con debida consideración a las capacidades y limitaciones físicas de los operadores o consumidores. Estos aspectos son el objeto de la *ergonomía*, la cual toma un enfoque general integrado a la relación entre personas y máquinas.

5. Debe ser sencillo *mantener* al producto a lo largo de su vida planeada (*diseño para mantenimiento*); para esto, las partes que necesiten servicio deben ser accesibles y, si es inevitable, el desensamble debe ser sencillo.

6. Al final de su vida, debe ser posible *reutilizar*, *reciclar* o, si es inevitable, *desechar* el producto en una forma segura y ecológicamente aceptable. Ello también requiere facilidad de desensamble (*diseño para desensamble*) o separación por algún proceso mecánico o químico. El reciclaje (o, donde sea posible, la reutilización) ha tomado gran importancia en años recientes por varias razones. A menudo requiere menos energía que la producción a partir de materias primas, reduce el volumen de desperdicio, y la presión en sitios de desecho o incineradores, la polución del suelo y de la atmósfera; y la necesidad de materias primas. Con el consumo cada vez más rápido de bienes materiales, ha cobrado mayor importancia la *ingeniería de ciclo de vida* o *ingeniería verde*.

7. Todos los criterios arriba descritos deben satisfacerse mientras que también se asegura la facilidad de manufactura (*diseño para manufactura*, (DPM). Esto no sólo requiere de una íntima cooperación entre los diseñadores industriales, mecánicos, y eléctricos y especialistas en manufactura, sino que también precisa que los diseñadores tengan conciencia de las consecuencias de la manufactura de sus decisiones. Al parecer, cambios menores con frecuencia pueden presentar (o eliminar) enormes problemas de manufactura, afectando de esta forma el costo, la calidad y la confiabilidad del producto.

8. Se verá que todos los procesos de manufactura están sujetos a variaciones. El *diseño para calidad* (DPQ) conduce a elecciones del diseño y proceso que reducen la magnitud de estas variaciones y minimizan su impacto en el desempeño del producto.

9. El proceso de diseño a menudo revela áreas donde se necesita investigación y desarrollo, y viceversa, la investigación conduce con frecuencia a ideas para productos

nuevos. Así, la *investigación y el desarrollo del producto* (I & D de producto) es una parte integral de la manufactura en un mundo cada vez más competitivo.

El diseño de productos es un tema de enorme importancia y se trata en un número cada vez mayor de libros y otras publicaciones. Con mayor frecuencia se dispone de software que incluye experiencia práctica, teoría y modelos tanto para diseño como para manufactura.

2-1-4 Hacer o comprar

Una vez que se diseña un producto, se preparan *dibujos de producción* (o *bases de datos computarizadas*) del ensamble y de todas las partes que no sean componentes estandarizados y producidos en masa, tales como tornillos, remaches, clavijas y cojinetes. Entonces se pueden tomar decisiones sobre qué partes se deben comprar a proveedores externos y cuáles se deben producir internamente. Como regla general, casi siempre es más económico comprar componentes y módulos disponibles como productos estándar (motores, embragues, válvulas, cilindros, etc.). Se prepara una *lista de materiales* la cual, en muchas formas, es vital para el proceso de manufactura.

2-1-5 Diseño del proceso

Para los componentes producidos internamente se lleva a cabo el diseño del proceso. Al igual que con el diseño del producto, el diseño del proceso no es una actividad aislada.

1. El mejor *proceso se selecciona*, se eligen los parámetros del proceso para optimizar la calidad y las propiedades del producto terminado, y para facilitar la inspección para el control de calidad. Los procesos también se miden a través de pruebas de laboratorio contra el mejor en el ramo.

2. Se diseñan las *matrices*, se eligen las herramientas y, si éstas deben seguir una trayectoria prescrita, se selecciona y programa una *trayectoria*. Desde los años cincuenta más computadoras se han usado con este propósito. La información contenida en los dibujos se transforma en forma digital para el *control numérico* (CN) o *control numérico por computadora* (CNC) de máquinas. Cuando la geometría de la parte se crea por CAD, la base de datos ya existe y se puede emplear directamente.

3. Para facilitar el procesamiento y ensamble, se diseñan *accesorios* para sujetar la pieza de trabajo en la posición correcta en relación con la máquina herramienta, o para mantener varias piezas de trabajo en la posición adecuada una con la otra. Las *plantillas posicionadoras* realizan una función similar, pero también incorporan guías para la herramienta.

4. Desde los años setenta, la computadora se ha usado también para la optimización y control del proceso, administración y movimiento de materiales (incluyendo líneas de transferencia, robots, etc.), programación y monitoreo. Actualmente, a este campo se le llama en su totalidad *manufactura asistida por computadora* (CAM); incluye los bloques 5-8 en la figura 2-1. (Este grupo de actividades a menudo se describe como ingeniería de manufactura en el sentido más estricto.)

5. Una fuerte posición competitiva también requiere del desarrollo de nuevos procesos y que los existentes se mejoren a través de la *investigación y desarrollo del proceso*. Con frecuencia los nuevos procesos hacen posible el desarrollo de productos, incrementando de esta forma aún más la competitividad. El desarrollo del proceso en la escala de producción puede ser muy costoso. Por lo tanto, los fundamentos de los procesos a menudo se exploran en el laboratorio u oficina. Los *modelos de los procesos* se pueden usar para explorar la influencia de los parámetros del proceso. Dos aproximaciones son posibles:

a. En el *modelado físico* el proceso se conduce en una escala reducida o se usan materiales de simulación que son más baratos y más fáciles de trabajar que los reales.

b. En el *modelado matemático* se establecen ecuaciones que expresan la respuesta del proceso a cambios en sus parámetros. A menudo estos modelos requieren de cálculos laboriosos, los cuales se hacen *fuera de línea* (en la oficina), aunque con computadoras y técnicas cada vez más poderosas se ha hecho posible el modelado *en línea* (tiempo real).

En cualquier aproximación de modelado que se use, es esencial una comprensión completa de los hechos físicos. El modelado es un tema muy amplio por sí mismo; este libro tiene el propósito de proporcionar los antecedentes físicos necesarios aun para el modelo más simple.

6. En algunos casos el problema práctico es tan complejo que sólo peritos con gran experiencia pueden resolverlo. El conocimiento, lógica y juicio del experto pueden ser capturados en *programas expertos*, desarrollados en cooperación entre el experto y los especialistas de sistemas (también llamados ingenieros de conocimiento). El programa contiene hechos generalmente disponibles para los expertos en el campo particular; reglas prácticas (integración), las cuales permiten que el experto haga estimados de calidad incluso cuando la información esté incompleta; e inferencias, es decir, decisiones de buen juicio. Hay disponibles programas especiales, los cuales reducen el esfuerzo de programación necesario para construir sistemas expertos; no obstante, los programas expertos tienden a ser muy largos y costosos. Una vez completados, permiten que una persona con menos experiencia encuentre la solución del problema interactuando con el programa a través de secuencias "si-entonces".

7. Al elegir y desarrollar procesos, se debe considerar su impacto en el *ambiente* (polución del aire y agua, ruido, vibración, etcétera) y en la *seguridad y salud* de los operadores y demás personas. A menudo la manufactura involucra altas temperaturas, metal fundido, herramientas altamente esforzadas, líquidos flamables o tóxicos, y actividades que generan ruido, humo, vapores, gases o polvo. Es imperativo que se tomen precauciones apropiadas y medidas para remediar un eventual problema. Más allá de las responsabilidades sociales del ingeniero y del tecnólogo, también hay requisitos legales, tales como las regulaciones de la Agencia de Protección al Medio Ambiente (EPA) y el Acta de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA) de Estados Unidos, y medidas equivalentes en otros países.

8. Para componentes producidos por un proveedor, muchas de estas funciones son realizadas por éste, idealmente en cooperación con el comprador. En el pasado, el productor principal (fabricante de equipo original, OEM), como una compañía automotriz, diseñaba todos los detalles del producto y el proveedor externo producía de acuerdo

con estos planos. Con frecuencia los pedidos eran otorgados sólo con base en el costo más bajo. Ahora existe una tendencia hacia un esquema cooperativo en que solamente se dan las especificaciones funcionales y restricciones espaciales, y el vendedor es responsable del diseño, manufactura y calidad. Este enfoque exige una asociación cercana entre el proveedor y el productor final, desde las primeras etapas del diseño, ya que la experiencia del proveedor puede ayudar a mejorar el diseño básico mismo.

2-1-6 Producción

El proceso de producción tiene lugar en el piso del taller. Una vez que se establece un producto, los pedidos del cliente se alimentan en el sistema en este punto.

1. Se elige la *configuración de la planta* para ajustarla a las características de producción.

2. Se determina el *monitoreo del proceso* para observar las características críticas, verificar las dimensiones, calidad, etc., de las piezas y, cuando es necesario, activar procesos de control para aplicar una acción correctiva.

3. El *movimiento de materiales* es la función auxiliar más importante. Las materias primas, partes parcialmente terminadas, herramientas, plantillas y aditamentos deben estar disponibles a tiempo. Antes se acostumbraba mantener grandes volúmenes de materiales de producción para asegurar la continuidad de la producción; actualmente esto ha sido abandonado en gran parte a favor de la *entrega justo a tiempo* (JIT).

4. El ensamble de piezas fabricadas y adquiridas es la fase final. Después de la verificación, los productos de encuentran listos para el empaquetado y para embarque. El control de inventario retroalimenta información al proceso de producción con base en el desempeño de ventas.

5. Las secuencias complejas de producción requieren de una fuerte *organización de la manufactura*. El estado de la producción debe ser conocido. Se requiere establecer métodos formales de aseguramiento de la calidad, junto con un plan de mantenimiento preventivo del equipo. Se debe mantener un inventario actualizado de las partes en proceso, combinado con inventarios de materiales y partes comprados, para asegurar que no haya una escasez que pudiera retrasar la producción y el ensamble. Para un análisis en marcha del desempeño, se monitorea la carga en las máquinas (utilización) y el desempeño de éstas y de la mano de obra. Muchas de estas actividades están en el dominio de la ingeniería industrial, mientras que otras se consideran esencialmente como tareas administrativas. Una organización superior, incluso de la tecnología existente, puede conducir a una sustancial ventaja competitiva.

2-1-7 Relaciones con el cliente

En muchas formas, ésta es la tarea central de la manufactura.

1. A menos que el cliente proporcione información en el proceso de diseño, el contacto comienza con la entrega del producto. Una parte importante es el suministro de guías del usuario y manuales de servicio bien escritos.

2. El servicio de campo asegura el desempeño continuo de los productos entregados al cliente. Es aquí donde finalmente se cierra el ciclo de la información: la retroalimentación es valiosa para mejorar las prácticas de producción y, si es necesario, para cambiar el diseño (esto podría considerarse como una falla del diseño concurrente, pero puede ser inevitable en los productos más avanzados).

2-2 MANUFACTURA SECUENCIAL

Este breve análisis, y en muchas formas incompleto, del sistema de manufactura indica la complejidad del problema. La manufactura eficiente y competitiva requiere de una relación cercana entre las distintas actividades, de manera que se convierten en partes verdaderas de un *sistema dinámico interactuante*. Desgraciadamente, por muchos años este ideal había sido rara vez alcanzado.

El problema era, y hasta cierto punto es, que en el enfoque tradicional se ve a la manufactura esencialmente como un proceso secuencial, siguiendo las flechas directas de actividad a actividad como se aprecia en la figura 2-1. Las compañías están organizadas en departamentos con funciones claramente separadas, en los que gente altamente especializada toma decisiones con poca conciencia de las consecuencias. En efecto, se levantan paredes virtuales entre los departamentos. En ningún lugar es esto más

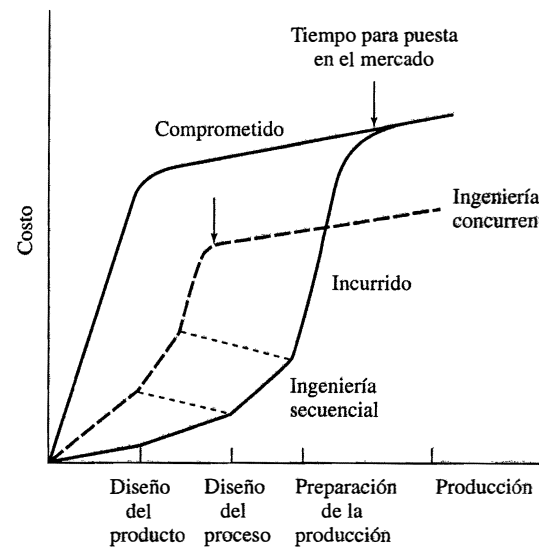


Figura 2-2 La ingeniería secuencial conduce al aislamiento de actividades; los problemas que se originan en la producción fuerzan cambios costosos en el diseño y en el proceso. La ingeniería concurrente considera todos los aspectos desde el inicio; el producto llega al mercado más pronto y su costo es más bajo.

dañino que en el muro entre el diseño y la manufactura. El diseño dicta, en gran medida, las posibilidades del proceso y por tanto el costo de la futura producción. Como se muestra en la figura 2-2, en la *manufactura secuencial,* el desembolso *real* en el diseño puede ser muy bajo, pero el costo *comprometido* para la producción es alto. Los cambios de diseño son forzados por problemas que afloran durante la producción o, aún peor, durante el servicio del producto. Ya que incluso un cambio pequeño puede afectar muchos otros componentes o funciones, las consecuencias son el incremento agudo de los costos y un largo ciclo de maduración del producto. Por lo tanto, al practicar la ingeniería secuencial, las compañías se encuentran en desventaja respecto a sus competidores más ágiles.

2-3 INGENIERÍA CONCURRENTE O SIMULTÁNEA

El reconocimiento de estos problemas ha conducido a la introducción o, mejor, a la reintroducción de la *ingeniería concurrente* o *simultánea.* Como su nombre lo indica, las actividades ya no están aisladas ni se siguen una a la otra; en vez de eso, se traslapan o tienen lugar simultáneamente. El concepto no es nuevo. El artesano practicaba ingeniería simultánea, tal como lo hicieron los hermanos Wright. Incluso Henry Ford lo hizo: su equipo era pequeño, todos estaban conscientes de las necesidades del cliente, de los materiales disponibles, y de las capacidades y limitaciones del proceso, y el diseño se ajustaba a los procesos entonces disponibles. La tarea se dificultó a medida que los productos se hicieron más complejos, cuando la variedad de materiales y de proceso proliferó, cuando el conocimiento se expandió y cuando los individuos se especializaron más y más. En este nivel, la ingeniería concurrente exige un equipo de expertos con interacción máxima. A menudo el equipo se reúne en un lugar común, aunque la telecomunicación asistida por computadora puede permitir la cooperación desde varias localizaciones geográficas.

La ingeniería concurrente inicia con la aceptación de que el diseño siempre es un proceso iterativo y de que el diseño del producto tiene consecuencias en la manufactura. En las primeras etapas del diseño, los cambios son hechos fácilmente y a bajo costo, y el producto puede ser planeado para asegurar la manufactura a bajo costo con la calidad más alta. El costo real del diseño será más alto, pero el relativo a la manufactura es menor, y el tiempo total que se requiere para alcanzar una producción madura se reduce (Fig. 2-2). Cuando se practica adecuadamente, la ingeniería concurrente puede rendir resultados dramáticos. Por ejemplo, los fabricantes estadounidenses de automóviles invertían 6 años desarrollar un nuevo modelo de automóvil. Con la ingeniería concurrente el tiempo se redujo a la mitad e incluso se puede disminuir aún más. El desarrollo del producto en un tiempo más corto es importante no sólo debido al costo reducido, sino también porque la vida de los productos se está haciendo más corta. En algunas industrias, particularmente en la electrónica, el tiempo de desarrollo actual es mayor que la vida del producto. Con el desarrollo de software poderoso de visualización tridimensional (3-D), se pueden construir prototipos digitales de ensambles completos, tales como automóviles. Esto permite la exploración de más alternativas, y reduciendo el número requerido de prototipos físicos se acelera enormemente el desarrollo del producto.

Ejemplo 2-1

El miembro más nuevo de la familia de aeronaves Boeing, el 777, un bimotor de mediano tamaño, es un ejemplo de la ingeniería concurrente en el sentido más completo. La compañía Boeing hizo análisis intensivos, incluyendo muchas sesiones de grupo, con una variedad de aerolíneas para definir y desarrollar la nueva configuración y especificaciones de la aeronave. Por ejemplo, el diseño permite el posicionamiento de cocinas y baños en incrementos de 25.4 mm (1 pulg) dentro de "zonas de flexibilidad" del fuselaje, permitiendo la reconfiguración del avión en 3 días en vez de las 2 o 3 semanas acostumbradas. Con alas de 60.9 m de envergadura y diseño avanzado, el avión puede subir y volar más rápido y a altitudes mayores. Las aerolíneas pueden especificar motores General Electric, Pratt & Whitney, o Rolls Royce de 340 kN de empuje, cada uno ofreciendo un bajo nivel de ruido y una alta eficiencia de combustible. Gran parte de la estructura está hecha de versiones avanzadas de aleaciones de aluminio de alta resistencia y alta resistencia a la corrosión. El timón vertical y los alerones horizontales, y las vigas del piso de las cabinas de pasajeros están hechas de plásticos reforzados con fibra de carbono. Los materiales compuestos y adhesivos constituyen el 9% del peso estructural.

Los ingenieros de algunos clientes clave trabajaron hombro con hombro con los diseñadores de la Boeing para asegurar que el avión cumpliera con sus necesidades. Se usó la simulación en computadora para diseñar y ensamblar electrónicamente todo el avión, incrementando la precisión y mejorando la calidad. Se hicieron esfuerzos similares por parte de muchos proveedores de partes. Empresas en Estados Unidos, Canadá, Europa y el Pacífico Asiático (particularmente Japón) contribuyeron en la manufactura. Ciclos de vuelo simulados complementaron las pruebas de vuelo reales, y el avión fue aprobado por la Administración Federal de Aviación (FAA) para volar en operaciones para bimotor de largo alcance al entrar en operación. (*Fuente*: Boeing Commercial Airplane Group.)

La ingeniería simultánea sólo es exitosa cuando el equipo tiene un mandato claro y todo el apoyo de la gerencia. Dentro del equipo, cada miembro tiene una experiencia diferente, pero el equipo funciona mejor si todos los miembros tienen al menos una apreciación general de los problemas y soluciones. Las compañías más pequeñas pueden no tener siquiera el número suficiente de expertos para crear equipos formales, entonces un grupo pequeño o incluso un individuo puede tener que proporcionar toda la información. En vista del vasto rango de los procesos de manufactura disponibles, existen principios físicos que se pueden invocar a través de un rango amplio de procesos, y uno de los propósitos de este libro es abordar estos principios.

2-4 MANUFACTURA INTEGRADA POR COMPUTADORA

Los beneficios del CAD y CAM se pueden alcanzar por completo sólo si se establece entre ellos una interfaz efectiva, creando lo que usualmente se denomina CAD/CAM. El flujo de la información en ambas direcciones asegura que las partes y ensambles serán diseñados con las capacidades y limitaciones de los materiales y procesos de manufactura en mente. Se pueden crear productos superiores y ganar tremendas ventajas competitivas. El esfuerzo empleado en los cambios en el diseño y en el proceso se reduce asegurando que esas transformaciones sean introducidas en la *base de datos común,* y de esta forma sean reconocidos inmediatamente en todas las etapas tanto del

diseño como de la producción. Un beneficio importante es que la introducción del CAD/CAM fuerza una revisión y mejoramiento del diseño y de las prácticas de manufactura existentes y de la planeación de la producción. El CAD/CAM es también una herramienta importante en la ingeniería concurrente.

Una extensión lógica es la *manufactura integrada por computadora* (CIM), en la cual todas las acciones se llevan a cabo con referencia a una base de datos común. La *administración de la base de datos* es una tarea compleja pero no insuperable. Los dibujos y modelos por computadora sólo sirven para visualizar la geometría de las partes; no se permiten cambios en ellos. Si se van a hacer cambios en el diseño, proceso, programación, lista de materiales, normas de calidad, etc., se realizan en la base de datos; de esta forma se reflejan en toda la organización. La base de datos se actualiza continuamente con la información más reciente sobre la producción, ventas, etc. Para muchas industrias, la manufactura integrada por computadora (CIM) aún está en el futuro, pero ya ha comenzado.

2-5 CONTROL DE LOS PROCESOS DE MANUFACTURA

Este tema se analizará de nuevo en el capítulo 21, después de adquirir familiaridad con los procesos. Sin embargo, en este punto se deben clarificar algunos términos, de manera que el potencial del control del proceso se pueda señalar a través de la discusión de los procesos individuales.

2-5-1 Estrategias de control

Las diferentes aproximaciones hacia el control se pueden explicar mejor haciendo referencia a un ejemplo simple, el de tornear un componente cilíndrico. Los principios se aplican a cualquier proceso.

Control manual Para entender qué tarea se espera que realice un sistema de control, primero hay que examinar algunas de las acciones de un operador hábil de torno. Supongamos que la parte que se va a maquinar fue montada en el mandril y que se fijó la velocidad de corte y la alimentación (el movimiento axial de la herramienta durante cada revolución de la pieza de trabajo). La tarea por seguir es mantener el diámetro de la parte terminada entre valores especificados mínimos y máximos, y asegurar que el acabado superficial cumple con las especificaciones.

Un operador entrenado y experimentado posee un conocimiento que le permite tomar la decisión de la profundidad de corte (el espesor de la capa removida en un corte). El conocimiento del operador con frecuencia se complementa o incluso se reemplaza por instrucciones proporcionadas con base en experiencias pasadas o en información publicada. Lo importante es que la información se almacena en alguna forma.

Enseguida, el operador verifica la calibración del carro transversal leyendo la carátula del micrómetro (Fig. 2-3*a*). En otras palabras, se detecta el estado actual de la máquina.

Luego, el operador determina qué cambios son necesarios, toma decisiones lógicas, y las comunica al sistema accionando el tornillo para calibrar la posición del carro

transversal. En este punto, se fabricará una parte correcta, suponiendo que el cuadrante de ajuste está bien calibrado y que las deflexiones de la máquina son despreciables.

Un operador calificado irá más allá y detendrá la máquina después del inicio del corte, verificará el diámetro de la parte, y hará los ajustes necesarios.

Un operador altamente calificado observará la superficie producida, escuchará el sonido de la máquina y, en general, detectará cambios que frecuentemente son difíciles de describir con precisión. Por ejemplo, bajo ciertas condiciones se puede desarrollar vibración (tintineo) que causa que el acabado superficial varíe en una manera sistemática, resultando en un acabado superficial inaceptable. Entonces el operador cambiará las condiciones de corte (velocidad, alimentación, soporte de la parte o herramienta), hasta que desaparezca la condición inaceptable. El operador también compensará por el desgaste de la herramienta, cambiará la herramienta cuando sea necesario, y se asegurará de que la máquina herramienta no esté sobrecargada.

Un sistema de control se hará cargo de varias o de todas las funciones del operador.

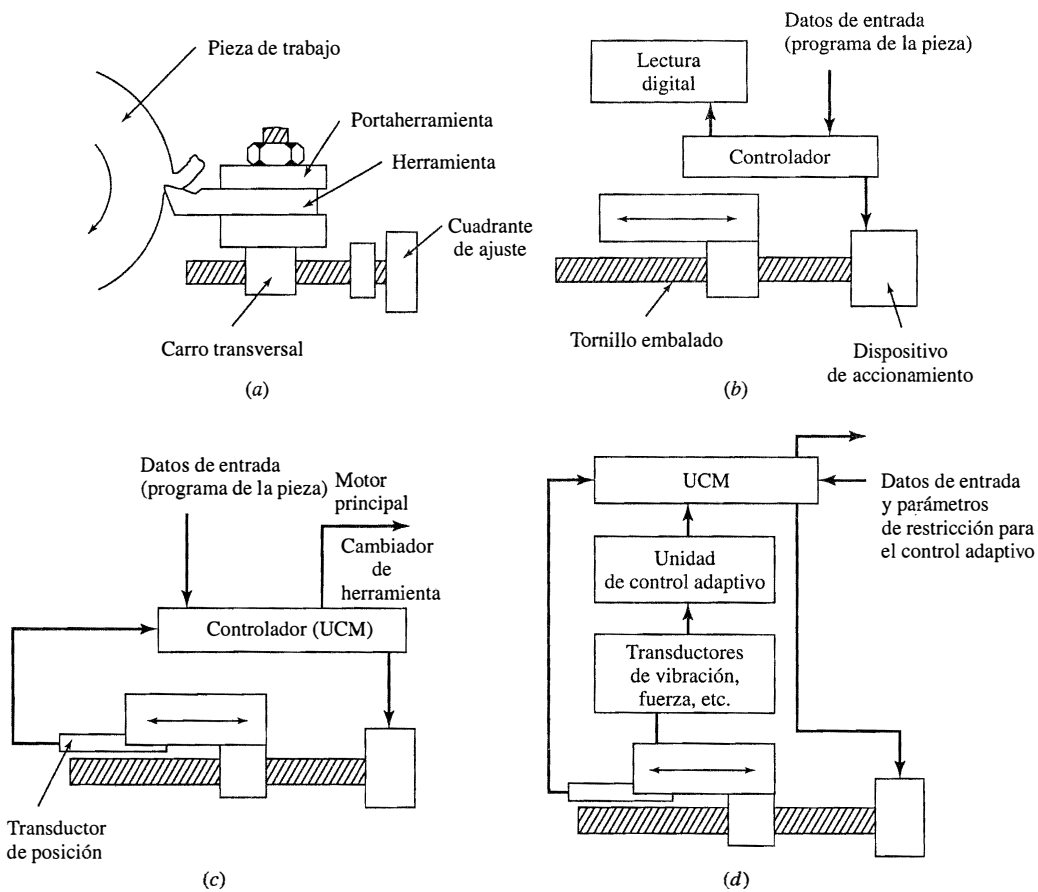


Figura 2-3 Todos los procesos de manufactura se deben controlar. Como ejemplo, torneado con control (*a*) manual, (*b*) de lazo abierto, (*c*) de lazo cerrado y (*d*) adaptivo. El control adaptivo realiza acciones en la manera que lo haría un maquinista calificado.

Control de lazo abierto En éste, las acciones se toman sin verificar los resultados de la acción. Los servomotores pueden ser mecánicos (leva, palanca, eslabonamiento), electromecánicos (motor de ac o dc, motor de pasos), hidráulicos o neumáticos (motor o cilindro). Por ejemplo, el carro transversal del torno puede ser accionado por una leva, un motor de pasos o un cilindro hidráulico hasta una posición determinada. El ajuste se repite para cada parte, pero aún se necesita un operador o personal de preparación para confirmar que la parte está dentro de la tolerancia, si no, para reajustar la leva, tope mecánico, micro interruptor, o cambiar las instrucciones del programa (Fig. 2-3*b*).

Control de lazo cerrado El circuito de control está cerrado cuando los detectores proporcionan *retroalimentación* al sistema. En el caso más simple, se añade un transductor de posición de alta resolución para confirmar que el estado proyectado del carro transversal en efecto se ha alcanzado (Fig. 2-3*c*). La señal del transductor se procesa por un *comparador* que la coteja con la señal de control y después emite una señal de error para corregir la posición. En otras aplicaciones, el control mantiene la velocidad u otro parámetro en un nivel fijo. (El ejemplo más viejo del control de circuito cerrado es un dispositivo puramente mecánico, el gobernador centrífugo, inventado por Watt en 1788 para mantener una velocidad prefija en una máquina de vapor, sin tener en cuenta la carga impuesta en ella. Su contraparte moderna es el control de crucero de los automóviles.) Un sistema de control de circuito cerrado sencillo ignora posibles entradas secundarias para el sistema, por lo que continuará produciendo partes aun con una herramienta desgastada, rota o que produzca rechinidos.

Control adaptivo Éste es un nivel de control más alto, el cual, en su desarrollo más completo, puede reemplazar completamente al operador. Se usan detectores para proporcionar *retroalimentación de entradas secundarias* (en el caso del torno, dispositivos de medición verifican el diámetro de la parte en proceso, celdas de carga miden la fuerza, transductores de vibración proporcionan señales características de las condiciones de corte existentes, etc.). La señal de retroalimentación se procesa de manera que la unidad de control pueda aplicar una acción correctiva apropiada (Fig. 2-3*d*). Obviamente, la acción correctiva logrará su propósito proyectado sólo si conoce el efecto de las variables del proceso en las partes terminadas. Las interrelaciones entre las variables del proceso pueden ser demasiado complejas, y un control adaptable completo será exitoso solamente si se formula un modelo suficientemente cuantitativo del proceso. Incluso si se usa un modelo simple, las restricciones del proceso o sistema (fuerza máxima, velocidad, etcétera) se deben obedecer (*control adaptable con restricciones*, ACC). Un modelo más complejo permite la optimización (*control adaptable con optimización*, ACO), por ejemplo, para una velocidad máxima de producción.

Inteligencia artificial (IA) Aquí la potencia de una computadora se usa para dotar al control de alguna medida de inteligencia. Como su nombre lo indica, el programa de control se diseña para resolver el problema en la forma que los humanos lo hacen; es capaz de algún razonamiento, puede aprender de la experiencia y, finalmente, se puede hacer una autoprogramación. Alternativamente o adicionalmente, se pueden incorporar elementos de programas expertos en el sistema de control.

2-5-2 Automatización

La palabra *automático* se deriva del griego y significa automotor o autopensante. La palabra *automatización* se acuñó para indicar aspectos de manufactura en los que la producción, el movimiento y la inspección se realizan o controlan por máquinas que se operan a sí mismas sin la intervención humana. En general, se puede distinguir entre varios niveles de automatización. Aquí haremos una diferencia entre:

Mecanización Significa que algo se hace u opera por maquinaria y no a mano. No se proporciona retroalimentación; se trata de un control de lazo abierto. Un ejemplo es el uso de una leva para mover el carro transversal que se muestra en la figura 2-3*a*. Se tendría que usar una leva diferente (o cambiar su posición) si se tuviera que maquinar un cilindro de diámetro diferente.

Automatización Implica un control de lazo cerrado y, en su forma avanzada, un control adaptivo. En la automatización se utilizan dispositivos programables, cuya flexibilidad puede ser muy diferente:

1. *La automatización dura* se refiere a métodos de control que requieren un esfuerzo considerable para reprogramar las diferentes partes u operaciones. El gobernador centrífugo de Watt cae en esta categoría.

2. *La automatización suave o flexible* implica agilidad de reprogramación, con frecuencia sólo cambiando el software.

Un aspecto importante de la automatización en la manufactura es la automatización del movimiento de materiales. Regresaremos a este tema en la sección 21-1; sin embargo, aquí se dan definiciones breves: los *manipuladores* son los dispositivos mecánicos para el movimiento de materiales, herramientas y partes, y los *robots* son manipuladores programables.

2-5-3 Control numérico

El control de máquinas se ha practicado desde hace mucho con dispositivos analógicos, por ejemplo, comparando el voltaje generado por un transductor con un voltaje de control. Sin embargo, los mayores avances en el control de manufactura fueron realizados por la introducción del *control numérico* (CN). En el sentido más amplio, CN es el uso de instrucciones codificadas simbólicamente para el control automático de un proceso o maquinaria. Se han desarrollado varias formas de CN:

Control numérico El hardware para el CN básico incluye la *unidad de control de la máquina* (UCM, Fig. 2-3), que contiene la lógica que se requiere para traducir información a una acción apropiada; *servomotores*, y, si el control es de lazo cerrado, *dispositivos de retroalimentación* y circuitos asociados. El plan de acción es proporcionado por la UCM en forma de un programa en una cinta perforada, cinta magnética o disco. Usualmente los programas son preparados por un programador o por el operador de la

máquina herramienta, y leídos en la UCM por un lector de cinta. La UCM está equipada para realizar varias funciones. Por ejemplo, se puede esperar que la máquina herramienta u otro dispositivo mecánico se mueva de un punto a otro. Esto se logra en varias formas:

1. Si la máquina herramienta está equipada con dos servomotores colocados en las coordenadas *x-y*, la UCM más sencilla primero mueve el servomotor *x* y después el *y* de acuerdo con las distancias prescritas, sin controlar el movimiento mismo (sistema *punto a punto* o *de posicionamiento*, Fig. 2-4*a*); cuando se alcanza la posición programada, se realiza la operación (digamos, se hace un agujero). Un sistema ligeramente más complejo también se mueve primero en una dirección y luego en la otra, pero esta vez con un control completo de la velocidad del movimiento (*sistema de corte directo*, Fig. 2-4*b*), mientras que tiene lugar una operación como corte, fresado o soldado.

2. El CN es particularmente valioso cuando se va seguir un contorno complejo (Fig. 2-4*c*). En los *sistemas de contorno* la UCM se programa para descomponer el contorno en segmentos más cortos y para interpolar entre los puntos extremos de los segmentos. La interpolación lineal aproxima el perfil curvo en pequeñas longitudes rectas; una mejor aproximación se obtiene con trayectorias circulares, curvas suaves y, especialmente, con curvas suaves-B racionales no uniformes (NURBS).

La información se lee en bloques, y una memoria intermedia (registrador intermedio) evita la discontinuidad de la operación, que en el caso de maquinado, soldado, etcétera, resultaría en marcas de paro visibles en la superficie.

Control numérico por computadora (CNC) Las funciones de la UCM son parcial o completamente asumidas por una computadora (una mini o microcomputadora asignada a la máquina herramienta, Fig. 2-5*a*). El programa en su totalidad se lee en la memoria. Como las computadoras se pueden reprogramar fácilmente, se obtiene una flexibilidad de operación mucho mayor. Por ejemplo, es posible trazar una curva compleja sin ningún rompimiento en la continuidad, y de esta forma obtener la aproximación más cercana para el contorno deseado. También se pueden agregar programas que proporcionen funciones tecnológicas, realicen control adaptivo, así como incorporar algunos ele-

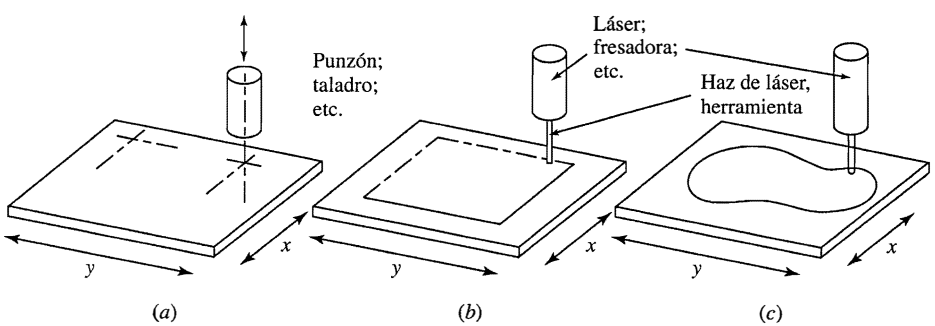


Figura 2-4 Los métodos de control proporcionan (*a*) posición o control de punto a punto o (*b*) control sobre el movimiento de la pieza o de la herramienta en un corte recto o (*c*) a lo largo de un contorno.

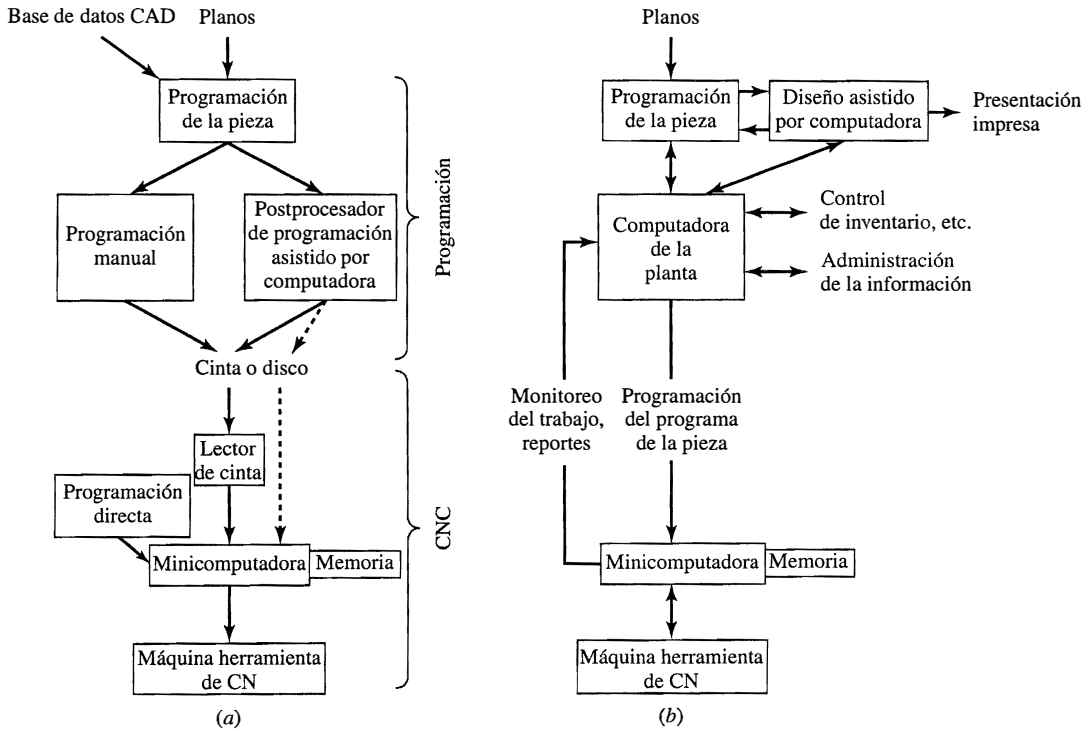


Figura 2-5 Muchas máquinas de control numérico (CN), con estructuras similares a las que se muestran en la figura 2-3, actualmente se controlan por (*a*) una microcomputadora dedicada (CNC) o (*b*) una jerarquía de computadoras (CN distribuido, DNC).

mentos de un modelo de proceso. Los microprocesadores usados en lugar de los circuitos de CN equipados son más confiables y pueden tener características de autodiagnóstico. En general, la parte o programa de proceso aún se recibe en cinta o disco, aunque muchos sistemas de CNC permiten programación directa. La computadora tiene memoria suficiente para servir no sólo como un compensador, sino también para almacenar los programas necesarios para una operación prolongada.

Tanto el CN como el CNC elevan la productividad y reproductividad, aumentando de esta forma la precisión, calidad y confiabilidad del producto final. El CNC minimiza los errores introducidos por el lector de cinta, ya que ésta sólo se lee una vez; también reduce los gastos generales relativos al CN.

Control numérico directo (DNC) Varias máquinas herramienta se conectan a una computadora central, más grande, la cual almacena todos los programas y emite los comandos de CN a todas las máquinas (Fig. 2-5*b*). Ya no se usa esta aproximación desde hace mucho tiempo a favor del *control numérico distribuido*, en el cual cada máquina tiene su propia computadora y la central sólo se emplea para almacenar, bajar, editar y monitorear programas, así como para proporcionar funciones de supervisión y administración. Con ese control jerárquico, aun las tareas muy complejas se pueden dividir en elementos manejables. La tarea de computación en tiempo real y del procesa-

miento sensorial se asigna a las computadoras de primer nivel. Las unidades de CN pueden ser de tipo convencional, equipadas con el lector de cinta reemplazado por una línea de comunicación directa a la computadora central (*sistemas con lectores tras la cinta*), o unidades especializadas que, al igual que las unidades CNC, usan una microcomputadora como la UCM. Obviamente, la última permite una flexibilidad mucho mayor.

Controladores lógicos programables El control de muchos procesos requiere funciones de secuencia, sincronización, conteo, lógica y aritmética, las cuales se satisfacían con circuitos lógicos de relevadores. A éstos se les tenía que rehacer la instalación eléctrica si se debía cambiar su lógica. Actualmente, su lugar ha sido ocupado por *controladores programables* (PC); para evitar confusión con las computadoras personales, ahora se les llama *controladores lógicos programables* (PLC). Su gran ventaja es que la memoria se puede reprogramar fácilmente con un tablero de programación o una computadora, en la "lógica en escalera", familiar para los conocedores de circuitos de relevadores. A menudo se usan en combinación con microcomputadoras para realizar tareas simples en secuencia, rápidamente, en tiempo real.

Se debe notar que, para explotar todos los beneficios del control por computadora, usualmente es necesario mejorar el desempeño mecánico del sistema. Con frecuencia, a la integración de los aspectos mecánicos y electrónicos se le denomina *mecatrónica*.

Programación del control numérico La programación de la máquina herramienta se ha simplificado enormemente con el paso de los años, y se ha difundido del maquinado a otros procesos. La programación comienza definiendo la secuencia óptima de operaciones y las condiciones del proceso para cada una. Las características geométricas de la pieza se usan para calcular la trayectoria de la herramienta. El programa resultante puede ser muy general y se debe convertir, con la ayuda de un programa llamado el postprocesador, en una forma aceptable para el control particular de la máquina herramienta. La salida es una cinta perforada u otro medio de almacenamiento. Un paso importante es la verificación de la cinta, que revela errores de programación y asegura la producción de piezas correctas. Básicamente existen cuatro aproximaciones:

1. *Programación manual*: todos los elementos del programa se calculan por un programador calificado de partes, quien los pone en instrucciones generales estandarizadas. La programación es laboriosa y actualmente está limitada en gran parte a programas de punto a punto.

2. *Programación asistida por computadora*: el programador se comunica con un sistema de software en un lenguaje de propósito especial que usa palabras como las del idioma de inglés. El más comprensivo de estos lenguajes, el APT (herramientas programadas automáticamente), se desarrolló en los años cincuenta en el Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, con el patrocinio de la Fuerza Aérea de EE.UU., y se amplió en los años sesenta con el patrocinio de un consorcio de usuarios, en el IIT Research Institute, Chicago, Illinois, y después en CAM-I. Desde entonces se han desarrollado muchos lenguajes simplificados y lenguajes diseñados para procesos específicos. Los lenguajes de programación traducen la información de entrada en una forma entendible para la computadora, de manera que pueda realizar los cálculos necesarios, incluyendo

la compensación para las dimensiones de la herramienta (compensación de la cortadora en el maquinado). La verificación de la cinta se debe hacer en la máquina herramienta o en una máquina de dibujo.

3. *CAD/CAM*: Cuando las piezas se diseñan con CAD, la base de datos numérica puede ser usada para generar el programa en la terminal de gráficas, ya sea por un programador o por el diseñador de la pieza, con la ayuda del software de CAD/CAM. El programa se puede verificar de inmediato viendo en una terminal de presentación de video (VDT) la trayectoria de la herramienta en relación con la pieza. La programación es rápida y relativamente barata, de ahí que se utilice aún para piezas individuales o, como con frecuencia se le llama, para *producción única*.

4. *Entrada manual de datos*: Muchas máquinas herramientas de CNC están equipadas con una pantalla de VDT y software poderoso que prepara el programa de la pieza. En respuesta a preguntas, el operador introduce información para definir la geometría de la pieza, el material y las herramientas. Se usan palabras estándar en inglés, y el software hace el resto. La técnica es muy económica ya que permite la programación mientras otra aplicación está corriendo.

Con la difusión del CNC y de la entrada manual de datos, la tendencia es confiar la mayor parte de la programación al operador de la máquina herramienta; sin embargo, la programación convencional asistida por computadora y CAD/CAM aún se realizan en los departamentos de programación.

La base de datos gráfica puede ser intercambiada entre sistemas diferentes, a través de formatos estándar tales como Especificación Inicial de Intercambio de Gráficas (IGES), ANSI Y14.26M. A través de ISO 10303 (Industrial Automatization Systems and Integration-Product Data Representation) y ANSI/CAM-I 101-1995 (Dimensional Measurement Interface Standar) se puede obtener información adicional del producto.

2-6 RESUMEN

La manufactura es una parte esencial de cualquier economía industrializada. Es la esencia del desarrollo económico y ha sido reconocida como tal por la mayoría de las naciones, resultando en una reñida competencia internacional. La manufactura es fundamental para las actividades de todos los ingenieros y tecnólogos, porque la mayoría de la investigación, desarrollo, diseño y actividad administrativa resulta finalmente en algún producto manufacturado. Si una unidad industrial (compañía) o nación va a ser exitosa en la competencia mundial (y por supuesto si la humanidad va a ser mejor servida por productos manufacturados abundantes de alta calidad y elevado valor), es esencial reconocer algunas características generales de la manufactura:

1. La manufactura incluye muchos pasos desde la investigación hasta el desarrollo, diseño, análisis y control de productos y procesos para la entrega, servicio y, finalmente, reciclado o eliminación del producto. Gradualmente, las muchas actividades asociadas con estas etapas se han especializado, dividido y desarticu-

lado. Las actividades aisladas en la manufactura secuencial resultan en largos tiempos de entrega, grandes ineficiencias y costo elevado del producto.

2. La manufactura se debe ver como un sistema, con todas las partes del sistema interactuando de una manera orgánica. Esto se refleja en la práctica de la ingeniería concurrente, en la cual varias actividades se traslapan o proceden simultáneamente; de esta forma, los tiempos de entrega se reducen, se mejora la calidad y se evitan los cambios costosos una vez avanzado el ciclo del producto.
3. Los subsistemas como el CAD y CAM se basan en una computadora desde hace algún tiempo, con muchos beneficios como productividad y calidad mejoradas. Los beneficios completos requieren una integración de todas las acciones de la manufactura. Esto se facilita con una base de datos común, esencial para el desarrollo del CIM.
4. Las computadoras y otros dispositivos microelectrónicos, tales como controladores programables, se han usado extensivamente para el control de los procesos de producción y maquinaria con la ayuda de CN, CNC y DNC. Una mejor comprensión de los procesos y el desarrollo de transductores adecuados ha permitido el control en el modo adaptivo, respondiendo a cambios en las condiciones del proceso en la misma o mejor forma que un operador altamente calificado.
5. La aplicación de la computadora a un proceso no actualizado o básicamente defectuoso no puede resolver los problemas de fondo. Por lo tanto, es más importante adquirir una comprensión sólida de los principios físicos sobre los cuales se puede basar el control del proceso. El conocimiento de estos principios también es esencial si se va a construir una interfaz entre el equipo mecánico y los dispositivos electrónicos.

LECTURAS ADICIONALES

Diseño

ASM Handbook, vol. 20, *Materials Selection and Design*, ASM International, 1997.

Bakerjian, R. y P. Mitchell (eds.): *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, 4a. ed., vol. 6, *Design for Manufacturability*, Society of Manufacturing Engineers, 1992.

Anderson, M.M., S. Kahler y T. Lund: *Design for Assembly*, Springer, 1983.

Backhouse, C.J. y N.J. Brookes (eds.): *Concurrent Engineering*, The Design Council, 1996.

Badiru, A.B.: *Expert Systems Applications in Engineering and Manufacturing*, Prentice Hall, 1992.

Bedworth, D.D., M.R. Henderson y P.M. Wolfe: *Computer Integrated Design and Manufacturing*, McGraw-Hill, 1991.

Boothroyd, G.: *Assembly Automation and Product Design*, Dekker, 1991.

Boothroyd, G., P. Dewhurst y W. Knight, *Product Design for Manufacturing and Assembly*, Dekker, 1994.

Bralla, J.G.: *Design for Excellence*, McGraw-Hill, 1996.

Bralla, J.G.: *Design for Manufacturability Handbook*, 2a. ed., McGraw-Hill, 1998.

Chapman, W.L.: *Engineering Modeling and Design*, CRC Press, 1992.

Crabb, H.C.: *The Virtual Engineer*, Society of Manufacturing Engineers, 1998.
Cross, N.: *Engineering Design Methods*, 2a. ed., Wiley, 1994.
Dieter, G.E., Jr.: *Engineering Design: A Materials and Processing Approach*, 3a. ed., McGraw-Hill, 1999.
Dixon, J.R. y C. Poli: *Engineering Design and Design for Manufacturing*, Field Stone Publishers, 1995.
Dorrf, R.C. y A. Kusiak (eds.): *Handbook of Design, Manufacturing and Automation*, Wiley, 1995.
Helander, M. y M. Nagamachi: *Design for Manufacturability*, Taylor and Francis, 1992.
Hannam, R.: *Computer Integrated Manufacturing: From Concepts to Realization*, Longman, 1998.
Ingle, K.A.: *Reverse Engineering*, McGraw-Hill, 1994.
Kusiak, A. (ed.): *Concurrent Engineering: Automation, Tools, and Techniques*, Wiley, 1993.
Lindbeck, J.R.: *Product Design and Manufacturing*, Prentice Hall, 1995.
Maus, R. y J. Keys (eds.): *Handbook of Expert Systems in Manufacturing*, McGraw-Hill, 1991.
Mills, A.: *Collaborative Engineering,* Society of Manufacturing Engineers, 1998.
Mital, A. y S. Anand (eds.): *Handbook of Expert Systems in Manufacturing: Structures and Rules*, Chapman and Hall, 1994.
Prasad, B.: *Concurrent Engineering Fundamentals*, vol. 1, 1996; vol. 2, 1997, Prentice Hall.
Rhyder, R.F.: *Manufacturing Process Design and Optimization*, Dekker, 1997.
Roosenburg, N.F.M. y J. Eekels: *Product Design: Fundamentals and Methods*, Wiley, 1995.
Salomone, T.A.,: *What Every Engineer Should Know about Concurrent Engineering*, Dekker, 1995.
Swift, K.G. y J.D. Booker: *Process Selection: From Design to Manufacture*, Wiley, 1997.
Ullman, D.G.: *The Mechanical Design Process*, 2a. ed., McGraw- Hill, 1997.
Ulrich, K.: *Product Design and Development*, McGraw-Hill, 1995.
Woodson, W.E. (ed.): *Human Factors Design Handbook*, McGraw- Hill, 1991.

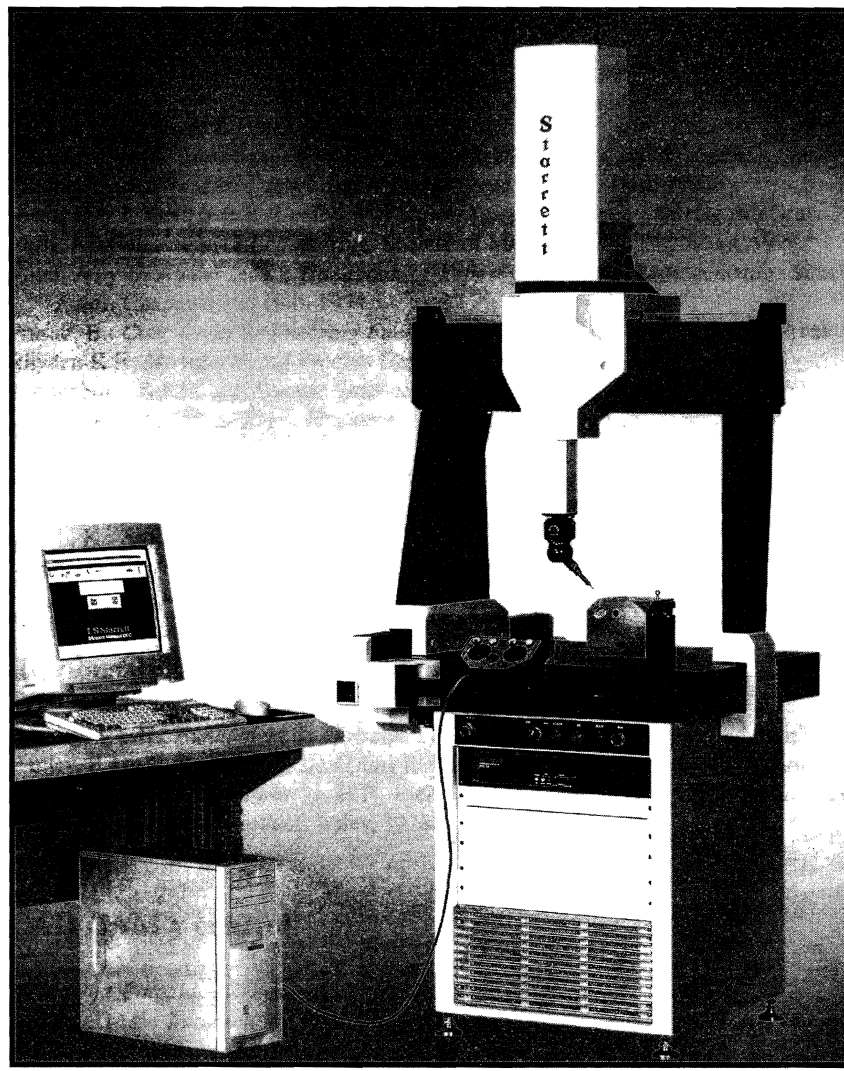
Responsabilidad de los productos

Enghagen, L.K.: *Fundamentals of Product Liability Law for Engineers*, Industrial Press, 1992.
Henley, E.J. y H. Kumamoto: *Designing for Reliability and Safety Control*, Prentice Hall, 1985.
Weinstein, A.S., A.D. Twerski, H.R. Piehler y W.A. Donaher: *Products Liability and the Reasonably Safe Product*, Wiley, 1978.

CAD/CAM y control

Amic, P.J.: *Computer Numerical Control Programming*, Prentice Hall, 1997.
Groover, M.P.: *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*, Prentice Hall, 1987.
Johnson, C.D.: *Process Control Instrumentation Technology*, 5a. ed., Prentice Hall, 1997.
McMahon, C. y J. Browne: *Cadcam: Principles, Practice, and Manufacturing Management*, Addison-Wesley, 1998.
Nanfara, F., T. Uccello y D. Murphy: *The CNC Workbook: An Introduction to Computer Numerical Control*, Addison-Wesley, 1995.
O'Sullivan, D.: *Manufacturing Systems Redesign: Creating the Integrated Manufacturing Environment*, Prentice Hall, 1995.

Regh, J.A.: *Computer-Integrated Manufacturing*, Prentice Hall, 1994.
Soloman, S.: *Sensors and Control System in Manufacturing*, McGraw-Hill, 1994.
Soloman, S.: *Sensors Handbook*, McGraw-Hill, 1998.
Turbide, D.A.: *Computers in Manufacturing*, Industrial Press, 1991.
Vajpayee, S.K.: *Principles of Computer Integrated Manufacturing*, Prentice Hall, 1994.



La sonda de contacto de una máquina de medición de coordenadas (CMM) envía su señal directamente a una computadora para construir un archivo que describe completamente las dimensiones de la parte. (*Cortesía de The L.S. Starrett Co., Athol, Massachusetts.*)

capítulo

3

Atributos geométricos de las piezas manufacturadas

Los componentes manufacturados vienen en todos tamaños y en una variedad desconcertante de formas. En este capítulo veremos:

Cómo poner orden en el caos por medio de la tecnología de grupo

Qué deben hacer las máquinas herramientas para generar formas

Cómo asegurar que las partes encajen una con otra

Cómo hacer un dibujo que exprese verdaderamente el propósito del diseño

Los métodos para medir dimensiones, de manera estadística y "sobre la marcha"

Qué es una buena superficie y cómo se puede cuantificar

La primera impresión que recibimos de un producto manufacturado es su forma y tamaño. Ambos tienen connotaciones estéticas, y es la tarea del ingeniero industrial crear un producto agradable. La forma y dimensiones también son críticas para la función del producto. En un ensamble, se necesita que muchas partes encajen una con otra, y esto requiere que las desviaciones permisibles en las dimensiones (tolerancias dimensionales) sean específicas y no se excedan. Ello conduce a la necesidad de técnicas y procedimientos de medición. Nuestras impresiones también se ven influidas enormemente por la apariencia superficial de un producto. Una vez más, el ingeniero industrial especifica un acabado para las partes visibles, pero también existen requisitos técnicos que cumplir si dos partes acopladas han de funcionar adecuadamente. Por lo tanto, se deben encontrar medidas objetivas de la calidad superficial y emplear técnicas adecuadas de medición.

3-1 FORMA

La *forma* de una pieza la dicta, en primer lugar, su función. Con frecuencia la complejidad de esta forma determina qué procesos se pueden considerar para fabricarla y, en sentido más general, al elevarse la complejidad se reduce el rango de procesos aplica-

bles y se incrementa el costo del diseño y de la manufactura. Por lo tanto, una regla fundamental del diseño es mantener la forma tan sencilla como sea posible. Sin embargo, esta regla se puede romper si una forma más compleja permite la consolidación de varias partes y/o la eliminación de uno o más pasos de manufactura.

3-1-1 Clasificación de la forma

No existe un sistema de clasificación de la forma aceptado universalmente. Las agrupaciones en la figura 3-1 están diseñadas para identificar capacidades del proceso y se usarán en todo el libro. Los productos de sección transversal uniforme (complejidad espacial = 0) son bidimensionales; todos los demás son tridimensionales. Al incrementar la complejidad espacial, la definición de la forma requiere parámetros geométricos adicionales. Se puede decir que la forma tiene un *contenido de información* mayor. No obstante, un pequeño incremento en el contenido de la información puede tener consecuencias importantes en la manufactura. Por ejemplo, al pasar de la forma sólida R1 a la forma hueca T1 sólo se suma una dimensión (el diámetro del agujero), pero inmediatamente excluye algunos procesos, o requiere operaciones extra en otros. En contraste, si se suma un tercer diámetro exterior al producto redondo R1, resultaría el mismo aumento en el contenido de información, sin que se impongan las mismas limitaciones en la elección del proceso. Se verá que las limitaciones en la forma son más rigurosas debido a las propiedades del material y a las interacciones con las herramientas. Por lo tanto, es importante no finalizar la configuración de la parte demasiado pronto en el proceso de diseño, de lo contrario se puede excluir el proceso de manufactura más económico. En cada capítulo que aborda procesos, se incorporan tablas para mostrar qué formas son más adecuadas para un proceso dado. La meta es, generalmente, producir una parte con "forma neta" lista para el ensamble; si esto no es posible, se busca una parte con "forma casi neta", la cual sólo necesitará un acabado menor, usualmente por maquinado.

3-1-2 Tecnología de grupo

La *tecnología de grupo* (TG) es una herramienta poderosa en el diseño para la manufactura. Su esencia es el reconocimiento de que muchos problemas tienen características similares, y si se resuelven en conjunto, se obtiene gran eficiencia y economía. Al aplicar este concepto a la manufactura, las piezas individuales se analizan en términos de puntos comunes de las características del diseño, así como de los procesos de manufactura y las secuencias del proceso. De esta forma se pueden identificar *familias de partes* y se aseguran ahorros:

1. Se elimina la tarea del diseño repetitivo. Se ha estimado que 40% de todo el diseño es simple duplicación, 40% requiere alguna modificación del diseño existente, y únicamente 20% exige un diseño original. El diseñador que elige un perno estándar, u otro componente, practica la tecnología de grupo en el nivel más elemental.

2. En la manufactura, los programas requeridos para la fabricación de familias de piezas se pueden optimizar y conservar para el futuro, cuando la parte se fabrique de

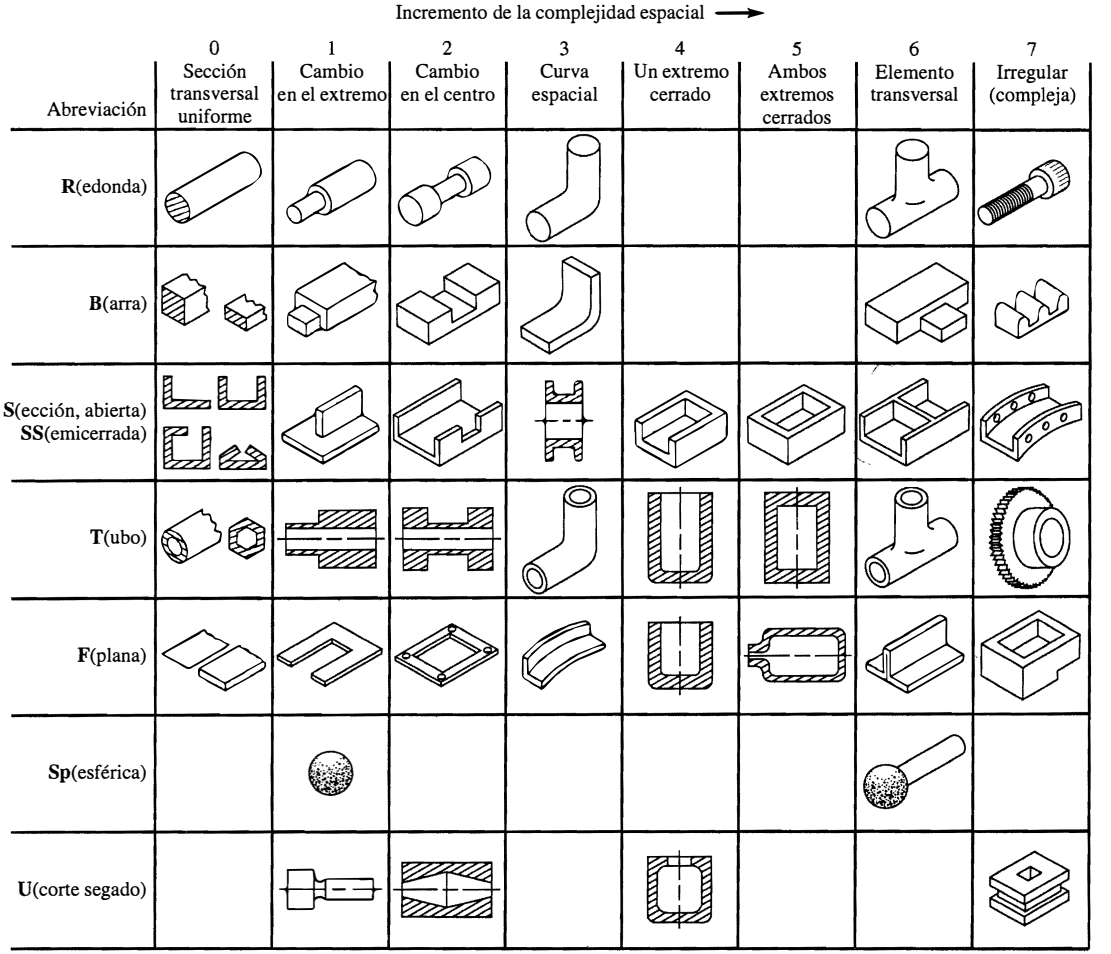


Figura 3-1 La elección de los métodos posibles de manufactura se facilita gracias a la clasificación de las formas de acuerdo con sus características geométricas.

nuevo. Debido a que las partes que son geométricamente similares, a menudo requieren la misma secuencia de producción, la TG es el primer paso al reorganizar una instalación de producción (Secc. 21-2-4).

3. En la planeación de la producción se acelera la estimación del tiempo del ciclo, se racionaliza el movimiento de la pieza de trabajo y se simplifica el diseño del proceso. También se facilita la estimación del costo.

La introducción de la computadora ha hecho a la TG particularmente atractiva, debido a que los programas relacionados con el diseño de elementos estándar, tales como cilindros sólidos y huecos, bloques rectangulares y conos, se pueden almacenar en la memoria, combinar fácilmente y modificar para una gran variedad de configuraciones de piezas. En forma similar, los detalles del proceso se pueden archivar para su uso posterior, si es necesario, con modificaciones.

Clasificación de las piezas El primer paso en la TG es la *clasificación de las piezas* en familias. Se pueden realizar varias aproximaciones con base en los atributos de diseño y/o manufactura:

1. *Juicio basado en la experiencia.* Éste sólo funciona en los casos más sencillos. La pieza se clasifica en una familia por medio del juicio visual de su forma, aunque la clasificación se refina aún más a partir del conocimiento de la secuencia típica de producción. No hay seguridad de que tal secuencia sea en realidad la óptima.

2. *Análisis del flujo de la producción* (AFP). La información relacionada con la secuencia de operaciones en una planta existente está contenida en hojas o tarjetas de ruta, de las que se puede extraer el flujo de las piezas a través de varias operaciones. Las piezas que se hacen por medio de operaciones idénticas forman una familia. Un buen juicio de ingeniería indicará si las piezas sobre las que se realizan algunas operaciones adicionales se deberán incluir en la familia. Un examen crítico también puede revelar que algunas piezas que se clasifican fuera de la familia se podrían producir a menor costo adoptando la secuencia de producción típica de la familia. Las piezas que se hacen con los mismos procesos pero en secuencias diferentes también se pueden clasificar lógicamente en la misma familia, aunque la flexibilidad del sistema de producción tendrá que ser mayor para permitir el regreso de la pieza a una posición de trabajo previa. La planeación del proceso asistido por computadora (CAPP, Secc. 21-4-1) crea la base del AFP.

3. *Clasificación y codificación.* Ésta es una clasificación más formal. No hay un sistema aceptado universalmente, y tal vez nunca lo haya. Algunos sistemas son más adecuados para el diseño, otros para partes hechas por procesos específicos (fundición, forjado, maquinado, etcétera), y otros más buscan tener alguna universalidad. Todos ellos parten de una clasificación de las formas básicas de las piezas de trabajo (algo similar se hace en la figura 3-1). Usualmente los códigos de las partes están formados por varios dígitos (algunas veces hasta de 30), los cuales definen varias características geométricas, así como las propiedades de composición y requisitos superficiales. Se pueden adicionar más dígitos para definir procesos, parámetros del proceso y secuencias de procesamiento. Algunos sistemas basados en computadoras facilitan la codificación al guiar al operador a través de los pasos necesarios en un modo convencional; otros usan la base de datos generada con el CAD para ayudar a asignar los números del código.

4. *Base de datos de ingeniería.* El sistema más versátil se cimenta en bases de datos de ingeniería que contienen, además de toda la información incluida a un dibujo, datos acerca de la parte, así como de su uso y manufactura. Cuando se estructuran como bases de datos relacionales, se pueden buscar de acuerdo con sus atributos diferentes y así formar grupos para satisfacer criterios específicos.

3-1-3 Movimiento y control de máquinas herramientas

La complejidad de la forma tiene una influencia profunda en los controles necesarios del proceso. Esto es más obvio en el maquinado, en el cual la herramienta de corte debe seguir una trayectoria exacta para generar la forma requerida.

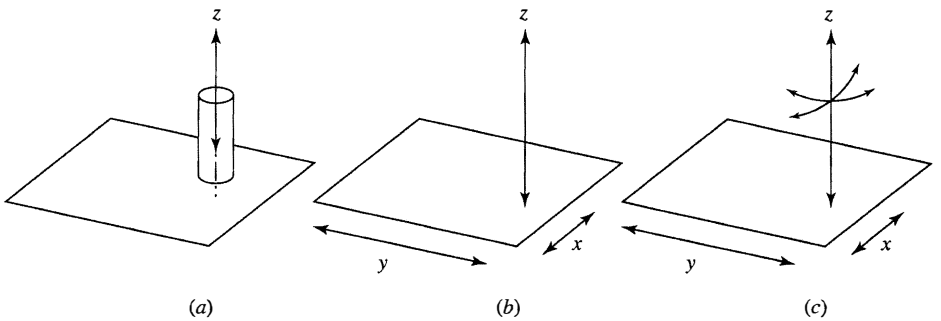


Figura 3-2 Las herramientas y piezas de trabajo pueden moverse y el control se puede ejercer a lo largo de (*a*) uno; dos; (*b*) tres; o (*c*) varios ejes.

Cuando el movimiento de la herramienta o pieza de trabajo se restringe a un solo eje (comúnmente denotado como *z*), se habla de *movimiento* o *control* (como, por ejemplo, el barrenado de un agujero en una pieza sujeta, Fig. 3-2*a*) de un solo eje. El movimiento de la mesa de trabajo requiere el control de *dos ejes* (usualmente se les refiere como *x* y *y*, Fig. 3-2*b*); el movimiento programado en el eje *z* la convierte en una máquina de *tres ejes*. (Cuando el movimiento en la dirección *z* es sólo de arranque y paro y además avanza a cierta velocidad prefija, se trata del control de dos ejes y medio.) Girar la herramienta (o mesa) añadiría los ejes cuarto y quinto (Fig. 3-2*c*). Cada junta en el portaherramienta añade un grado adicional de libertad (eje) y permite formas más complejas, pero con un costo de maquinaria y control más elevados. Una vez más esto indica la necesidad de un diseño que facilite la manufactura y el ensamble con un mínimo de complejidad; lo que es una cuestión de extremo interés para la automatización y la robótica. El cuerpo humano tiene docenas de grados de libertad y aunque sería posible construir máquinas y robots con similar versatilidad, *es más fácil y barato acomodar las limitaciones de la maquinaria por medio de un diseño apropiado de las partes y ensambles, las cuales el equipo automatizado tendrá que manejar*. Los humanos siempre pueden ensamblar lo que los robots hacen, pero el caso contrario no es factible.

Existen algunas características de la forma que inmediatamente establecen ciertas limitaciones:

1. La simetría axial es, de muchas maneras, la más sencilla, porque una forma bidimensional puede generarse girando la parte o herramienta (respecto al eje *z*), mientras ésta se mueve en una trayectoria recta. Dos o más diámetros exteriores (formas R1 y R2) requieren un segundo eje de control.

2. Las piezas con simetría no rotacional exigen un mínimo de dos ejes de control, aunque la curvatura espacial se puede seguir sólo con tres (o más) ejes de control.

3. Una superficie paralela al movimiento de la herramienta (Fig. 3-3*a*) se puede hacer con un control de un solo eje aunque, si la herramienta es difícil de retirar, puede requerirse un *ángulo de salida* (Fig. 3-3*b*). Las formas de corte segado (Fig. 3-3*c* y *d*) requieren control en más de un eje, por lo que en la actualidad el control de cinco ejes es muy común.

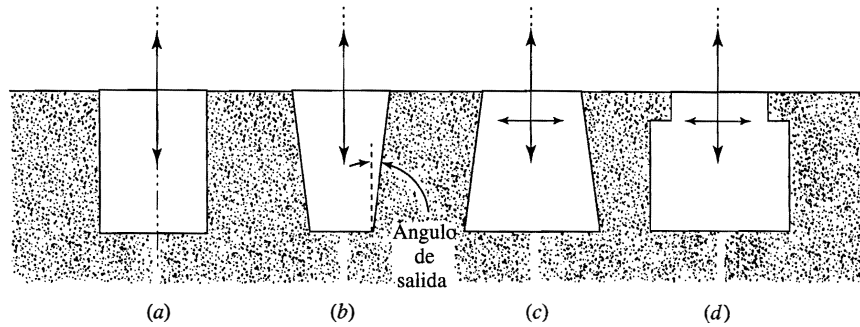


Figura 3-3 (*a*) Con frecuencia una cavidad de paredes rectas es fácil de producir, pero (*b*) se puede necesitar un ángulo de salida para retirar la herramienta. (*c*), (*d*) Las formas segadas requieren control de ejes múltiples o herramientas complejas.

3-2 DIMENSIONES

Estamos acostumbrados a ver productos manufacturados con un intervalo de tamaño enorme, desde un alfiler hasta un avión jumbo. Las piezas individuales también tienen un amplio intervalo de tamaño así que no todos los procesos son adecuados para fabricarlas. Con frecuencia el tamaño mínimo está limitado por las leyes de la naturaleza, mientras que el máximo también puede ser fijado por la disponibilidad del equipo. Todas estas restricciones se deben considerar para el diseño, por tanto para proporcionar una guía útil se incluyen tablas de las capacidades de un proceso en cada capítulo que trata de un proceso.

3-2-1 Unidades dimensionales

La unidad SI de longitud es el metro (m); las dimensiones más pequeñas se expresan en milímetros (mm) o micrómetros (μm, 10^{-6} m, coloquialmente denominado micrón). Algunos productos (de *nanotecnología*) son tan pequeños que sus dimensiones se expresan en nanómetros (nm, 10^{-9} m). Para dimensiones atómicas, la unidad ángstrom (Å), que no pertenece al SI, se ha usado ampliamente (10 Å = 1 nm). A menos que se especifique de otra forma, las *dimensiones en este libro se dan para 20°C.*

En el sistema acostumbrado de los U.S. (USCS, por sus siglas en inglés) la unidad de longitud es la pulgada (in). A las dimensiones más pequeñas se les refiere en unidades de 10^{-3} pulg (coloquialmente, milésimas). Pero las dimensiones más pequeñas se dan en micropulgadas (μin, 10^{-6} in). Como se muestra en la tabla de conversiones del apéndice A y en los forros interiores del libro, 1 pulg = 25.4 mm y 1 μpulg = 25.4 nm. De aquí, 1 mm = 0.03937 pulg (para propósitos de conversión, 1 mm = 40 milésimos y 1 μm = 40 μin).

3-2-2 Tolerancias dimensionales

El artesano hacía productos individuales en los cuales cada parte era a la medida del ensamble. Cuando era necesario reparar o reemplazar una pieza, ésta se tenía que hacer y ajustar a la medida. La producción en masa requiere que las partes sean intercambiables; para esto, las dimensiones deben ser controladas. Desde los inicios en el siglo XIX, con la ayuda de técnicas de medición de desarrollo rápido, el control dimensional se ha hecho progresivamente más estricto (tabla 1-1). Una vez más, los diferentes procesos tienen una capacidad inherentemente distinta para fabricar partes con dimensiones controladas, como se verá en los capítulos sobre procesos.

Aunque las dimensiones deben ser controladas, no es posible ni necesario fabricar partes con dimensiones exactas. Por lo tanto, los *límites* máximo y mínimo *de las dimensiones* (longitud o ángulo) se especifican con dos objetivos en mente:

1. Los límites deben ser lo suficientemente cerrados para *permitir el funcionamiento de las partes ensambladas* (incluyendo las intercambiables).

2. Los *límites deben ser tan amplios como lo permita la funcionalidad*, ya que usualmente los límites más estrictos exigen procesos o secuencias de proceso más costosos. La causa más importante de costos de producción excesivos es la especificación de límites dimensionales innecesariamente cerrados. Con demasiada frecuencia las tolerancias se especifican aun cuando no existe una parte de acoplamiento.

El diseñador especifica las dimensiones y la *holgura*, es decir, la diferencia necesaria en las dimensiones para asegurar el funcionamiento adecuado de las partes de acoplamiento (a la holgura también se le llama *dimensión funcional* o *dimensión suma*). Esto se ilustra mejor en el ejemplo de una flecha que ajusta en un agujero (Fig. 3-4). Primero se define el *tamaño básico* de una de las partes del ensamble, a partir de tablas de tamaños preferidos si es posible, de manera que se puedan usar flechas o herramientas estándar. En principio, el tamaño básico se podría asignar ya sea al agujero o a la flecha. En la práctica, a menudo los agujeros se manufacturan con alguna herramienta especial (taladro, escariador, troquel) y son, además, difíciles de medir mientras se hace el agujero; por lo tanto, se usa el *sistema basado en agujero*. Entonces se especifica la holgura (el espacio libre mínimo o la máxima interferencia) para satisfacer los requisitos de funcionalidad.

La posición de la *zona de tolerancia* relativa a la dimensión básica define el tipo de ajuste. Los *ajustes de holgura* permiten deslizamiento o rotación (Fig. 3-4*a*). Los *ajustes de transición* proporcionan una localización (colocación) precisa con un espacio libre o interferencia mínimos (Fig. 3-4*b*). Los *ajustes por interferencia* aseguran un espacio libre negativo (interferencia) y se diseñan para dar rigidez y alineación, o incluso para desarrollar una presión específica (presión de contracción) sobre la flecha (Fig. 3-4*c*).

El siguiente paso es la determinación de la *tolerancia*, es decir, la diferencia permisible entre los límites máximo y mínimo del tamaño. La tolerancia se puede expresar respecto al tamaño básico como una desviación en ambas direcciones, superior e inferior (*tolerancia bilateral*) o sólo en una, si las consecuencias de la imprecisión en esta dirección son menos peligrosas (*tolerancia unilateral*).

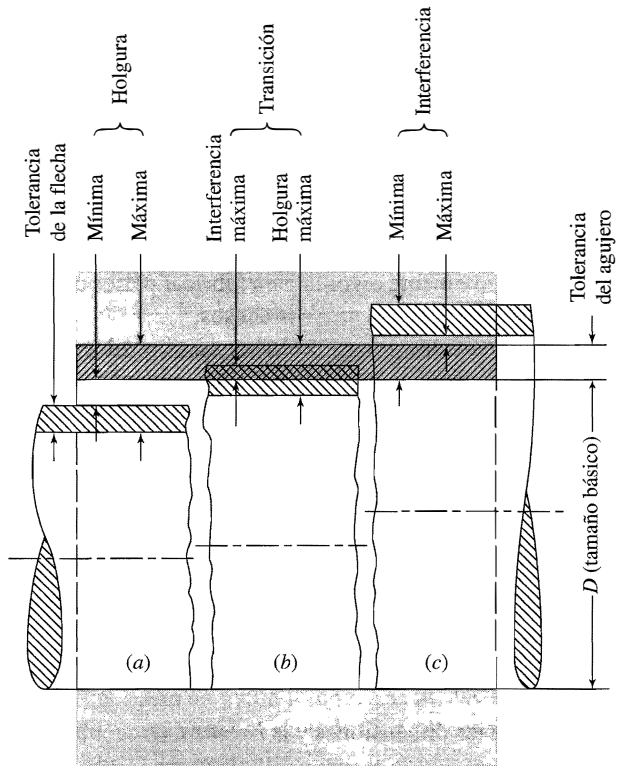


Figura 3-4 En el sistema con base en el agujero, el diámetro del agujero se elige de una tabla de tamaños preferidos y después se aplican las tolerancias para crear ajustes de (*a*) holgura, (*b*) transición, o (*c*) interferencia.

La experiencia demuestra que, en la mayoría de los procesos de manufactura, las imprecisiones dimensionales son proporcionales a la raíz cúbica del tamaño absoluto (denotado como D para el diámetro, en unidades de mm o in). La norma ANSI B4.1-1967, R1972, proporciona tablas para 8 clases (incluyendo 34 subclases) de ajustes, que varían de ajuste suelto a ajuste forzado. La norma de la Organización Internacional para la Normalización (ISO) *Sistema de Límites y Ajustes*, ISO 286-1:1988, se basa en la unidad de tolerancia i

$$i = 0.45D^{1/3} + 0.001D \qquad \textbf{(3-1)}$$

el grado de tolerancia se expresa como un múltiplo estandarizado de i (dentro de los grados 5-16, la tolerancia más estrecha IT5 implica un estándar de $7i$; mientras que la más holgada, IT16, implica 1 000i). El valor real de la tolerancia se puede obtener de tablas. También hay técnicas asistidas por computadora para asignar dimensiones y tolerancias.

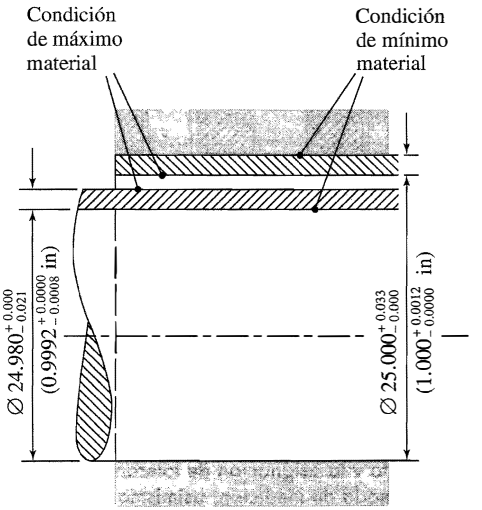


Figura 3-5 Ejemplo de un ajuste de operación cercana, de acuerdo con la holgura métrica H8/f7 preferida con base en el agujero de la American National Standard.

El ejemplo que se da en la figura 3-5 es de un ensamble adecuado para una operación con lubricante viscoso (un cojinete de lubricación hidrodinámica, como el de un cigüeñal automotriz). Las letras mayúsculas muestran la posición de la zona de tolerancia relativa a la dimensión básica del agujero, y las minúsculas la muestran para la flecha.

3-3 DESVIACIONES DE FORMA Y POSICIÓN

Para que una pieza funcione adecuadamente respecto a otros componentes, con frecuencia es necesario colocar restricciones adicionales en la localización (posición) de las características geométricas y en las propiedades geométricas, como concentricidad, excentricidad, planicidad, paralelismo y perpendicularidad. Esta información se transmite en los dibujos de ingeniería (o archivos de computadora). Se emplean dos métodos básicos:

El *dimensionamiento por coordenadas* es más rápido y parecería ser idealmente adecuado para el maquinado en máquinas herramienta de control numérico, pero puede dar origen a ambigüedades. Los atributos geométricos se deben especificar y pueden ser malinterpretados fácilmente.

El *dimensionamiento y tolerancias geométricos* (GD&D) implican más esfuerzo pero dan una expresión más clara del propósito del diseño, el cual a su vez ayuda a la elección del método de manufactura más apropiado. También indican cómo se debe inspeccionar la parte. Se logra todo esto con el uso de símbolos que expresan atributos geométricos, como en las normas ASME Y14.5 M-1994 y la ISO equivalente.

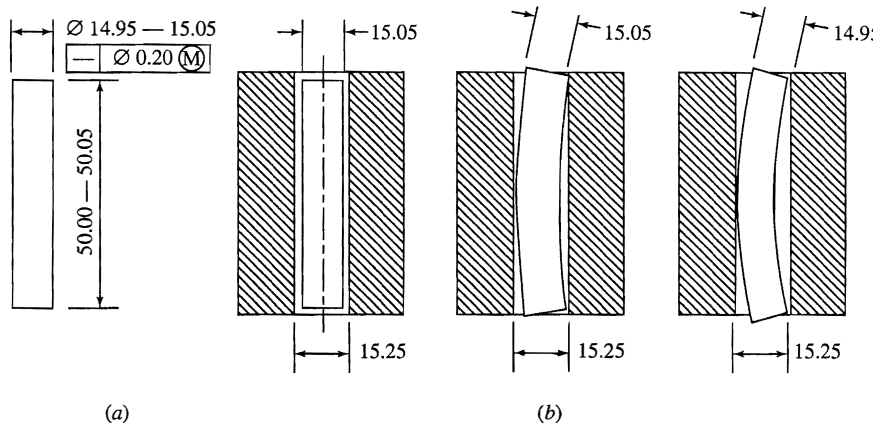


Figura 3-6 El dimensionamiento y la asignación de tolerancia geométrico expresa el propósito del diseño y el modo de medición; asimismo, pueden conducir a una ganancia en las tolerancias permisibles. En este caso, se permite que la flecha en el extremo inferior de la tolerancia diametral se curve 0.10 mm extra sin afectar la función. (*Adaptado de J.D. Meadows, Geometrical Dimensioning and Tolerancing, Dekker, 1995, p. 237, Fig. 11-9. Cortesía de Marcel Dekker, Inc.*)

Este tema está más allá del alcance de nuestros análisis, pero un ejemplo sencillo de una flecha ilustra algunas ventajas. La flecha tiene 15.00 ± 0.05 mm de diámetro y 50 mm de longitud. Esto no nos dice nada acerca de su forma; podría estar severamente alabeada. Sabemos que se acoplará con otra parte y por lo tanto se especifica que el alabeo no debe exceder 0.2 mm en 50 mm. Esto se especificaría con palabras en el dibujo tradicional. Con el GD&T, el dibujo aparecería como en la figura 3-6*a*. El símbolo Ø denota diámetro. Debajo de las dimensiones del diámetro se encuentra un *marco de control de las características*, que contiene una línea recta (el símbolo para la rectitud) con Ø indicando que el eje del cuerpo (la línea media derivada) debe estar dentro de 0.2 mm. A primera vista, esto no es diferente del dibujo tradicional. Sin embargo, considere las implicaciones. La flecha debe caber dentro de una funda cilíndrica de 15.05 + 0.20 = 15.25 mm. Esto se puede verificar con un calibrador que contenga la funda (calibrador *funcional* o *receptor*, Fig. 3-6*b*). Es evidente que si la flecha está en una condición de mínimo material (de 14.95 mm de diámetro), aún cabría si la curva es 15.25 – 14.95 = 0.30 mm. De esta forma, se ganan 0.10 mm de tolerancia extra. Ello demuestra una de las ventajas del GD&T: se salvan las piezas que son perfectamente funcionales, pero que se hubieran desechado al usar el dimensionamiento y las tolerancias convencionales.

3-4 METROLOGÍA DE INGENIERÍA

La metrología es la ciencia de la medición física, aplicada a variables como dimensión, acabado superficial y propiedades mecánicas y eléctricas. El campo más estrecho de la

metrología de ingeniería (o *metrología industrial*) se concentra en las mediciones de dimensiones, incluyendo las de longitud y ángulo. Es de fundamental importancia para el control de calidad por medio de la inspección en línea (en el proceso y posterior al proceso) y fuera de línea (como se analizará en la sección 21-2-4), como un elemento de la organización manufacturera. Nuestro interés aquí son las técnicas de medición.

3-4-1 Principios de medición

La medición se debe realizar con un dispositivo de suficiente exactitud y precisión. Ninguna medición se puede repetir perfectamente; las lecturas (así como las variables sujetas a medición) siempre mostrarán *dispersión* (Fig. 3-7).

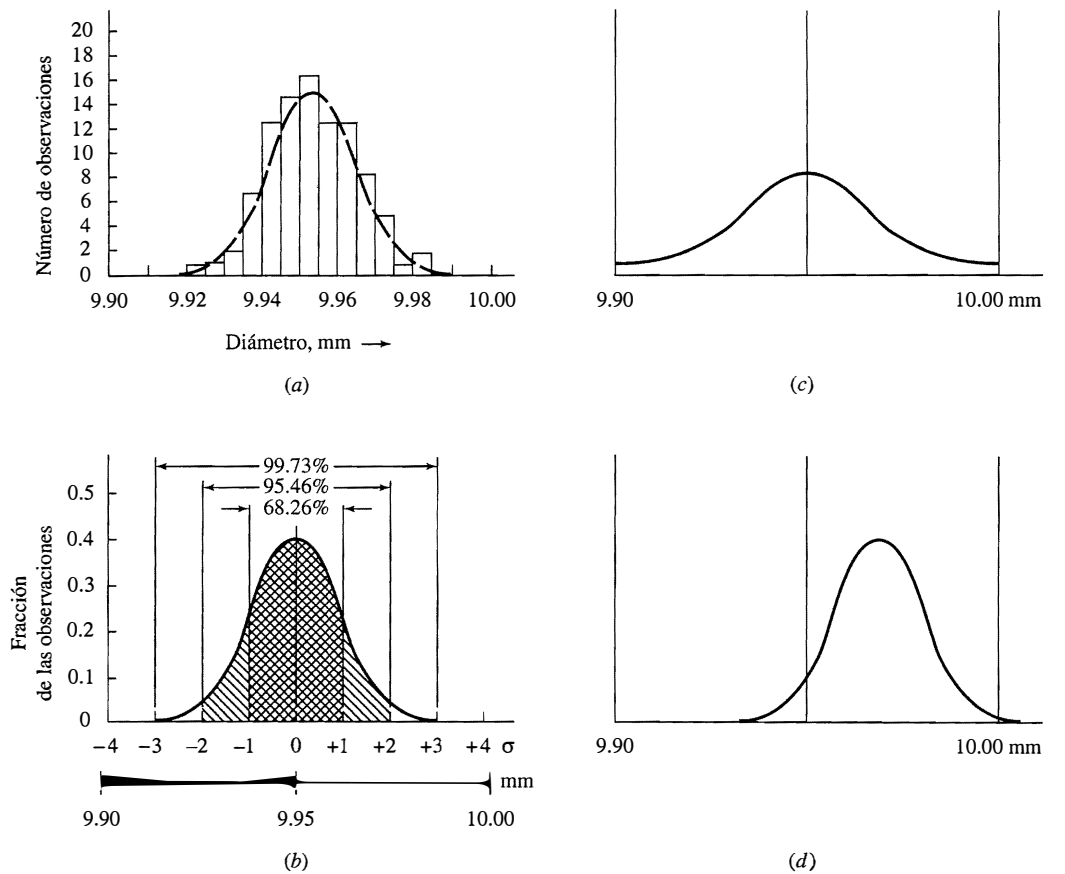


Figura 3-7 Las propiedades mecánicas, las dimensiones y otras variables medidas siempre muestran alguna dispersión. En este ejemplo, se tornearon 100 flechas hasta un diámetro de 9.95 ± 0.05 mm. Al clasificar las mediciones reales en grupos más angostos (*a*); la distribución resultó exacta y precisa (*b*); en otro caso puede ser exacta pero imprecisa (*c*); precisa pero inexacta (*d*).

La *exactitud* expresa el grado de concordancia entre la dimensión medida y el valor real. La diferencia entre el valor medido y el valor real es el *error*; como el valor real nunca se puede conocer, el error se puede establecer solamente verificando contra un patrón. Por ejemplo, los patrones de trabajo (calibradores de trabajo) usados para la medición de la longitud en el lugar de trabajo, se verifican contra los patrones de referencia que, finalmente, se verifican contra patrones nacionales. Otras normas se basan en fenómenos físicos; de esta forma, en la actualidad el metro se define por la longitud de onda en el vacío de la línea naranja de kryptón 86, con una precisión de una parte en 10^9.

La *precisión* es el grado de repetibilidad de la medición. Un agrupamiento cerrado de los datos indica alta precisión (Fig. 3-7 *a* y *b*), pero no necesariamente alta exactitud (Fig. 3-7*d*); la precisión es pobre cuando los datos están ampliamente dispersos (Fig. 3-7*c*).

En muchos casos, la distribución tiene la forma de campana y se aproxima a la llamada *distribución normal*, de la cual se puede derivar matemáticamente su curva. Una curva como ésta tiene dos características importantes: la media y la dispersión de los datos (Fig. 3-7*b*).

La precisión se puede juzgar a través del *promedio estadístico* o *media* $\bar{x}$. Ésta es la línea central de la campana y simplemente trata de la suma de todos los valores medidos x, dividida entre el número de mediciones n (o, para tamaños de la muestra muy pequeños, entre $n-1$):

$$\bar{x} = \frac{\Sigma x}{n-1} \tag{3-2}$$

La *dispersión de datos* se puede caracterizar simplemente por el *rango* R (la diferencia entre los valores máximo y mínimo). Para el análisis estadístico, la *desviación estándar* σ es la más útil:

$$\sigma = \left[\frac{\Sigma (x-\bar{x})^2}{n-1} \right]^{1/2} \tag{3-3}$$

El valor de σ es una medida del ancho de la campana. El área bajo la curva normal es una medida del número de valores que caen dentro de límites especificados. En la figura 3-7*b* se muestra que aproximadamente 68% de las partes estarán dentro de $\pm\sigma$, 95% dentro de $\pm 2\sigma$, y 99.73% dentro $\pm 3\sigma$ del promedio. En la práctica industrial, en general era aceptable si el límite $\pm 3\sigma$ estaba dentro de la tolerancia especificada. Sin embargo, esto significa que 27 lecturas en 10 000 aún estarán fuera del rango de tolerancia; pero tendencias recientes apuntan hacia un control más estricto (Secc. 21-3-4).

Instrumentos de medición Deben poseer varios atributos:

1. *Sensibilidad.* Es la variación más pequeña que el dispositivo puede detectar. Se llama *resolución* cuando la lectura es digital o se hace contra una escala. Una escala subdividida en incrementos más pequeños que los que el dispositivo puede detectar, únicamente da una resolución espuria; la exactitud del dispositivo deberá ser varias

veces mejor que la graduación más pequeña del indicador. Una regla básica aproximada es que la precisión del instrumento de medición deberá ser 10 veces mejor que la precisión de la dimensión que se va a medir.

2. *Linealidad.* Afecta las lecturas sobre un rango especificado de mediciones. Aun, si un instrumento se ajusta (calibra) contra un patrón en algún punto en el rango, la no linealidad afecta otros puntos en el rango.

3. *Repetibilidad.* Determina la mayor precisión posible que se puede lograr bajo condiciones bien controladas. El instrumento debe ser capaz de repetir lecturas con la misma precisión hasta donde se pueda leer.

4. *Estabilidad.* Expresa la resistencia a ir a la deriva, lo que reduciría tanto la exactitud como la precisión, por lo que necesitaría recalibración frecuente.

5. *Velocidad de respuesta.* Es crítica cuando se va a medir una variable transitoria, usualmente durante la producción.

6. *Posibilidad de automatización.* Es importante en muchas aplicaciones, especialmente en la actualidad, con la difusión de la inspección en el proceso al 100%.

Variaciones de las mediciones Las lecturas repetidas pueden tener errores:

- Los *errores asignables* (*sistemáticos*) se pueden medir y a menudo controlar. Además de errores inherentes en el dispositivo, la *variación de la temperatura* es la fuente principal del error sistemático. Si las tolerancias son cerradas, la temperatura de la parte debe ser uniforme y conocida, de manera que se pueda considerar la variación debida a la dilatación térmica. En las mediciones de postproducción esto se asegura mejor llevando la parte a un cuarto con clima controlado y permitiéndole equilibrarse con la temperatura del dispositivo de medición; esto puede tomar horas o días.
- Los *errores aleatorios* se derivan de errores humanos (lecturas inexactas de la escala, fuerza excesiva aplicada a un calibrador de contacto, preparación incorrecta, etcétera) y de fuentes tales como polvo y oxidación. De nuevo, un cuarto con clima controlado ayuda con su aire filtrado y humedad controlada.

Con frecuencia las mediciones se hacen de acuerdo con una base de referencia, como un plano, un agujero, o una flecha. Ésta se debe elegir con la debida consideración para el método de manufactura e inspección.

Ejemplo 3-1

Una flecha de acero ANSI 1020 de 100.00 mm de diámetro se fabrica por torneado. La parte se calienta hasta 70°C durante el corte. ¿Se puede medir la dimensión hasta el 0.01 mm más cercano, sin tomar en cuenta el incremento de la temperatura?

El material es acero al carbono con un contenido del 0.2% C. El coeficiente de dilatación térmica lineal es 11.7 μm/m · °C. De aquí el diámetro se incrementará en (70 – 20)(0.100)(11.7) = 58.5 μm, lo cual es 6 veces la precisión deseada de la medición.

Ejemplo 3-2

Una medición de 100 mm se verifica en una pieza de aleación de Zn (coeficiente de dilatación térmica lineal = 27.4 μm/m · °C) con un calibrador de interiores usado como calibrador PASA-NO PASA. Ambos están a 38°C. ¿Existe un problema potencial?

Con relación a 20°C, la parte se expande (0.1)(38 – 20)(27.4) = 49.32 μm. El calibrador sólo se expande (0.1)(18)(11.7) = 21.06 μm; se rechazarán piezas buenas.

3-4-2 Calibradores

En el sentido más amplio, un *calibrador* es un instrumento que mide alguna variable. En el sentido más restringido usado aquí, el término calibrador se refiere primero a todos los cuerpos de acero endurecido, carburo de tungsteno, cerámica (vidrio), etcétera, que se manufacturan con tolerancias cerradas. Pueden ser fijos o ajustables. Una vez calibrado, un calibrador ajustable también se puede usar como uno fijo. Existen varios tipos:

1. Los *bloques patrón* aún son los principales calibradores de longitud en muchas aplicaciones. Están hechos en conjuntos que permiten hacer cualquier dimensión *por la unión* (movimiento de deslizamiento-torcimiento) de varios bloques (Fig. 3-8*a*). La humedad adsorbida, o las películas de aceite sobre las superficies de acoplamiento tienen un espesor despreciable, pero proporcionan adhesión suficiente para manejar la columna construida como una unidad. Para separar los bloques se necesita de nuevo un movimiento deslizante. Los bloques patrón se presentan en varios grados. Las tolerancias (expresadas en μm) son como sigue: bloques grado 3, usados directamente en producción, +0.15, –0.05; los juegos grado 2, empleados como patrones de inspección y de cuarto de herramientas, +0.10, –0.05; bloques patrón de laboratorio grado 1, para la calibración de otros calibradores e instrumentos de indicación, +0.05, –0.05; patrones de referencia grado 0.5, se usan sólo en trabajos de más alta precisión, +0.03, –0.03.

2. Los *bloques en ángulo* (Fig. 3-8*b*) se construyen de acuerdo con los mismos principios que los bloques patrones. Las *barras de seno* (Fig. 3-8*c*) se usan en conjunto con los bloques patrones para crear cualquier ángulo.

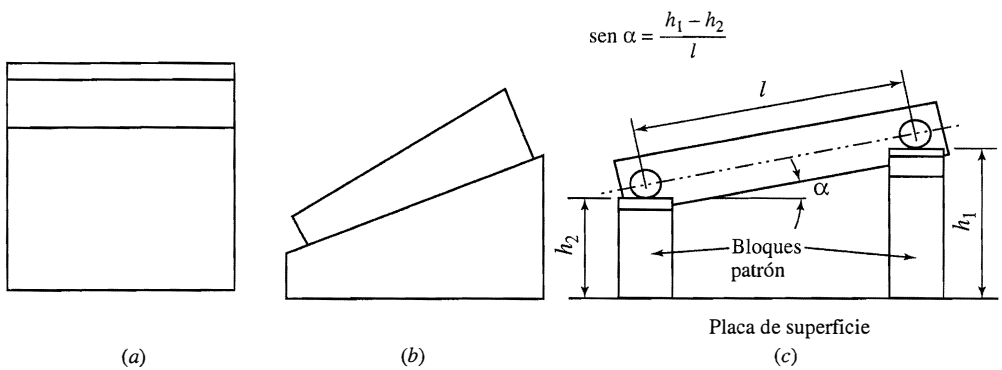
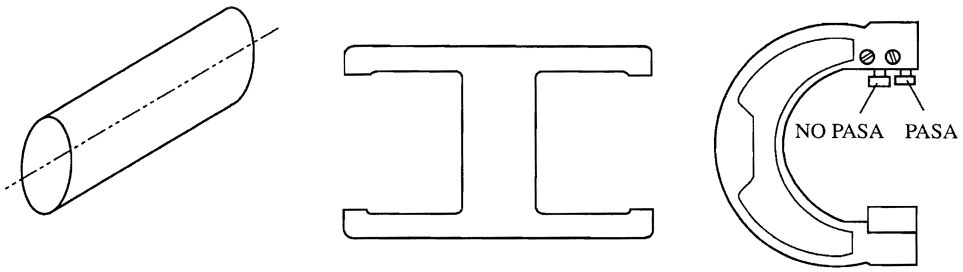
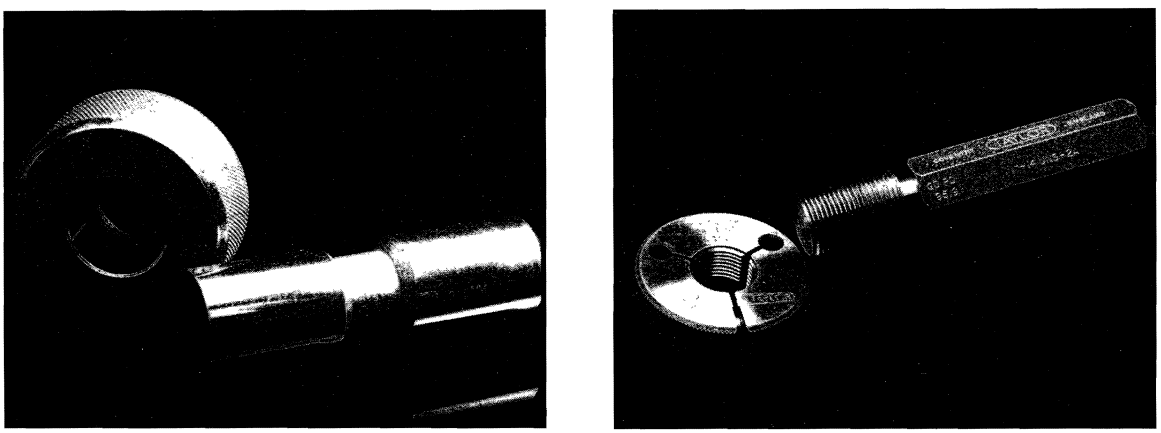


Figura 3-8 Calibradores de acero endurecido como los (*a*) bloques patrón, (*b*) bloques en ángulo y (*c*) barras de seno, se usan extensivamente para propósitos de calibración comparativa.



(*a*) (*b*) (*c*)

Figura 3–9 Las mediciones comparativas de dimensiones de longitud son posibles con: (*a*) barras de longitud, (*b*) calibradores de separación fijos, o (*c*) calibradores de separación ajustables.



(*a*) (*b*)

Figura 3-10 (*a*) Los diámetros de los agujeros se pueden verificar con calibradores de inserción y los diámetros de las barras con calibradores de anillo. (*b*) Configuraciones más complejas se verifican con calibradores especiales, como los cilindros roscados.

3. Otros calibradores de longitud incluyen *barras de longitud* (varillas de medición, Fig. 3-9*a*) y *calibradores de separación* fijos (Fig. 3-9*b*) y ajustables (Fig. 3-9*c*).

4. Los *calibradores cilíndricos y de anillos* se usan para la medición de diámetros (Fig. 3-10*a*). Usualmente son del tipo PASA-NO PASA. El calibrador límite PASA es el negativo (la réplica invertida) de la dimensión en la *condición de máximo material* (*véase* la Fig. 3-5), e indica que las piezas de acoplamiento se pueden ensamblar. El calibrador límite NO PASA está hecho para la dimensión de la *condición de mínimo material* y rechaza piezas fuera de la tolerancia. Existen tres problemas con estos calibradores; primero, sólo se pueden fabricar dentro de ciertas tolerancias, lo que resulta en el rechazo de piezas buenas o la aprobación de malas; segundo, están sujetos al juicio del operador; tercero, no proporcionan información sobre las variaciones de las dimensiones de las piezas dentro de los límites, por lo que son de uso limitado para el

control estadístico de la producción. (También, en la forma que se muestra, violan el principio de Taylor: únicamente el calibrador PASA debe tener forma completa para verificar *tanto* el tamaño como las características geométricas, mientras que el calibrador NO PASA debe verificar sólo una dimensión lineal. De esta forma, un calibrador de anillo PASA debe ir completamente sobre una flecha, pero el calibrador NO PASA debe medir sólo el diámetro y no ajustarse en alguna parte de la flecha.)

5. Los calibradores de diámetros múltiples, *cilindros roscados* (Fig. 3-10*b*) y anillos, calibradores de curvas, etc., verifican el efecto combinado de varios parámetros. Los *calibradores de contorno* o *plantillas* (incluyendo reglas de borde recto y calibradores de radios) prueban la coincidencia de formas por medio de observación visual o magnificación óptica. En el sentido más amplio, las *placas de superficie* también están dentro de esta categoría; con frecuencia se usan para regular otros elementos de calibración y están hechas de un material muy estable, como granito, hasta una planicidad específica.

6. Los *calibradores de ensamble* no sólo prueban dimensiones sino también alineación y coaxialidad.

3-4-3 Dispositivos graduados de medición

Estos dispositivos permiten la lectura de dimensiones contra una escala. Algunos tienen un punto cero, otros leen sólo el desplazamiento relativo. En relación con los calibradores fijos, su gran ventaja es que se obtiene la información sobre la *distribución de las dimensiones* en un lote. Para mejores resultados, se debe observar el principio de Abbe: la línea de la escala debe coincidir con la línea de medición.

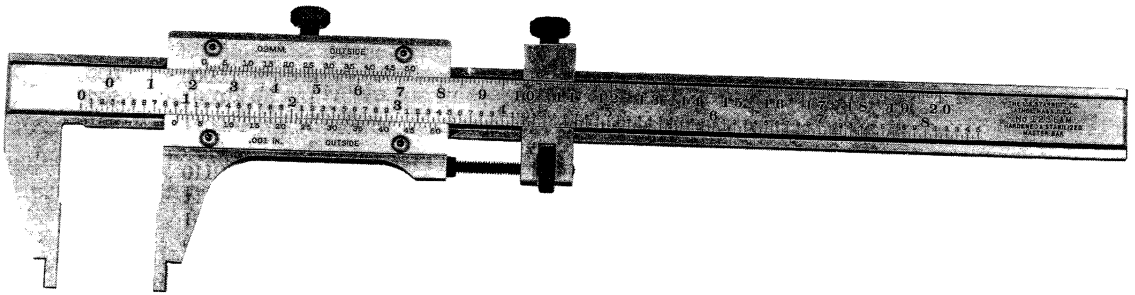
1. Las *reglas y cintas con graduación de líneas* limitan la lectura a la división más cercana.

2. El uso de un *vernier o nonio* incrementa la sensitividad de los *calibradores tipo "pie de rey"* (Fig. 3-11*a*) hasta 25 μm (0.001 in), y la de los *micrómetros* hasta 3 μm (0.0001 in). Los pies de rey (Fig. 3-11*b*) a menudo se reemplazan por lecturas digitales (Fig. 3-11*c*). El principio de Abbe se satisface al medir con un micrómetro, pero con los pies de rey la línea de medición (entre las quijadas) se separa de la escala.

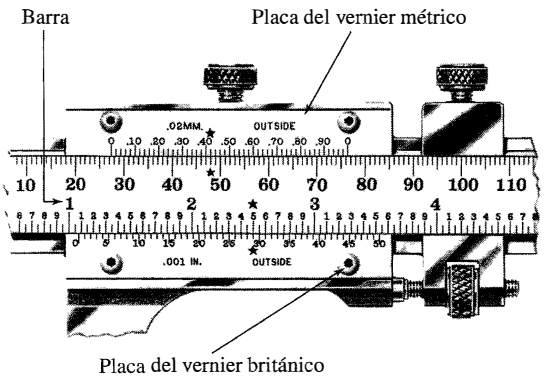
3. Cuando dos *rejillas de difracción* (líneas paralelas cercanamente espaciadas sobre una superficie de vidrio) se sobreponen con una ligera inclinación, producen bandas de interferencia cuya localización depende de la posición relativa de las rejillas (Fig. 3-12*a*). El número de bandas se puede contar electrónicamente para dar una sensitividad de 5 μm (0.0002 in).

4. Los *transductores digitales lineales* (Fig. 3-12*b*) se pueden usar para transmitir pulsos por medios electrónicos, fotoeléctricos o magnéticos, hasta una resolución de 4 μm (0.0002 in). Se puede usar un codificador generador de pulsos rotatorio para mediciones angulares, y con un movimiento de piñón y cremallera o de contacto corredizo, también se utilizan para mediciones lineales.

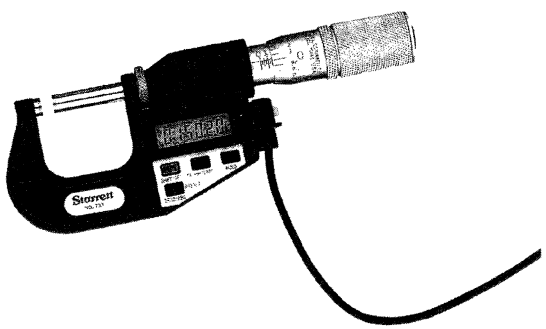
5. Los *discos de codificado numérico* (Fig. 3-13) proporcionan, con la interfaz apropiada, lecturas directas, o si se desea, datos para controles de CN. (La escala de



(*a*)

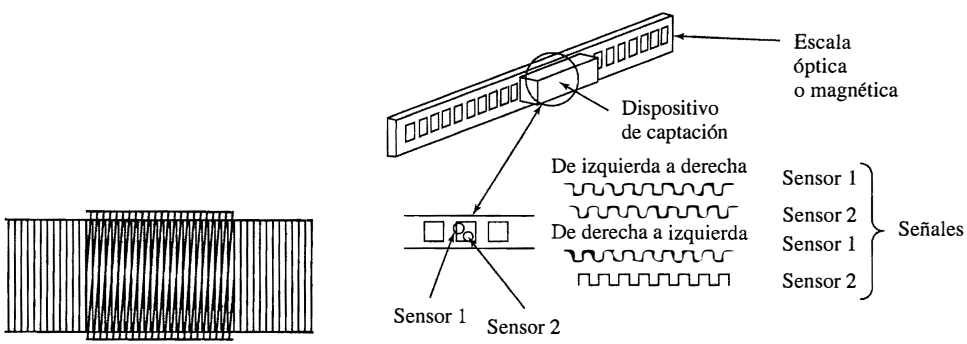


(*b*)



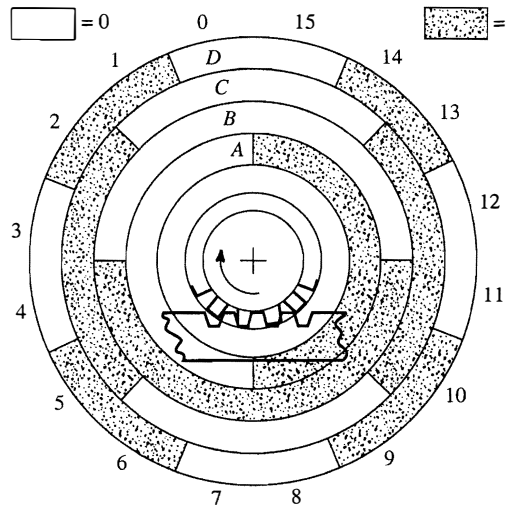
(*c*)

Figura 3-11 Un calibrador de vernier permite lecturas de hasta algunas fracciones de la división más pequeña sobre la escala principal (*a*). Para leer, se toma la lectura de la línea de la escala del vernier que coincida con una línea sobre la escala principal; el resultado se suma a la lectura básica sobre la escala principal del calibrador vernier (*b*). No hay vernier en instrumentos de lectura digital como en este micrómetro (*c*). (*Cortesía de The L.S. Starrett Co., Atole, Massachusetts.*)



(*a*) (*b*)

Figura 3-12 (*a*) La longitud se puede medir contando el número de bandas de interferencia. (*b*) La dirección del desplazamiento de una escala óptica o magnética se detecta por dos transductores.



Decimal	*Código gris*	*Binario*
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0011	0010
3	0010	0011
4	0110	0100
5	0111	0101
6	0101	0110
7	0100	0111
8	1100	1000
9	1101	1001
10	1111	1010
11	1110	1011
12	1010	1100
13	1011	1101
14	1001	1110
15	1000	1111

Figura 3-13 Para propósitos de control, un disco de codificación numérica proporciona una señal digital. Las lecturas ambiguas se evitan en este codificador de 4 bits por medio del uso del código gris, el cual se convierte entonces en código binario.

grises resuelve 2^n valores diferentes, donde n es el número de bits asignados a cada pixel.)

6. Los dispositivos electrónicos de estado sólido que convierten la luz en una señal eléctrica [*diodos fotodetectores* y *dispositivos de carga acoplada* (CCD)] detectan la presencia o ausencia de luz y, configurados en un arreglo lineal, ofrecen resoluciones

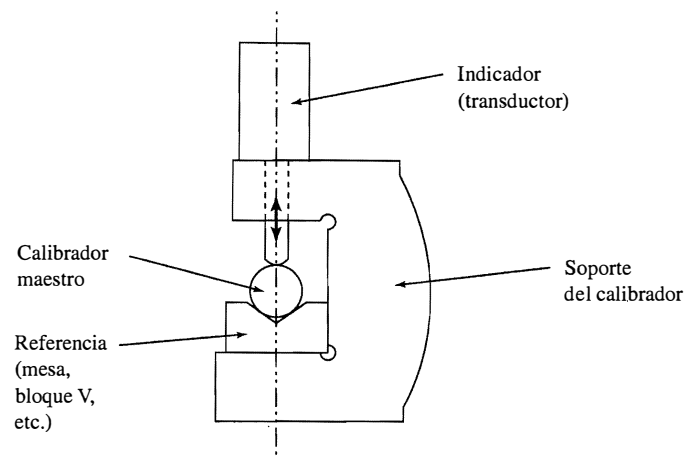


Figura 3-14 Las dimensiones se pueden leer mediante calibradores equipados con un indicador, o con alguna forma de transductor de posición.

de 3 μm (0.0001 in), o mejores, cuando se usan solos o en cámaras de televisión. Todos los calibradores electrónicos se pueden emplear para mediciones en línea.

7. Los *microscopios de matricero* son microscopios ópticos equipados con platina deslizante accionada por micrómetros, oculares con retículas para la medición de la longitud y oculares con transportador para la medición de ángulos. También se pueden usar para verificar y medir la forma (figura) de las piezas.

3-4-4 Medición comparativa de la longitud

Los *indicadores* sólo miden la desviación desde una posición cero, la cual se fija con un calibrador de ajuste (calibrador maestro) elegido para dar el tamaño nominal de la pieza (Fig. 3-14). Si se usa un indicador con suficiente sensibilidad y se proporciona una base adecuada (de referencia), se puede obtener más información relevante, no sólo sobre la longitud y su variación de pieza en pieza, sino también sobre descentramiento, alineación, etc. El indicador puede ser de varias clases:

1. Los *indicadores de carátula* son dispositivos puramente mecánicos que convierten el desplazamiento lineal en rotación (por ejemplo, con un movimiento de piñón y

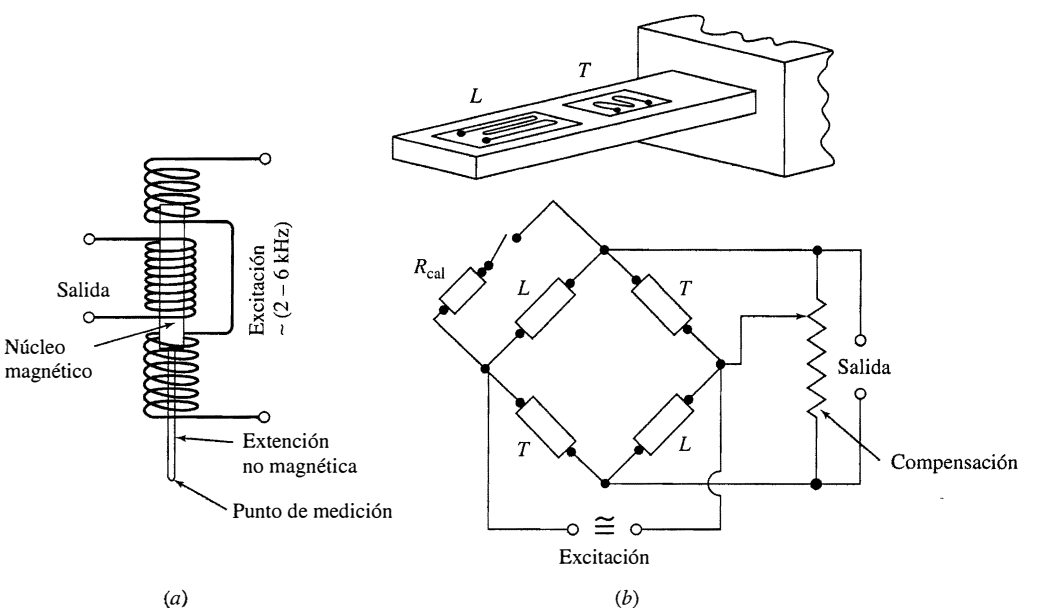


Figura 3-15 Los desplazamientos se obtienen por medio de: (*a*) la posición de un transformador diferencial, o (*b*) la deflexión de una viga al cual se le han colocado galgas extensométricas interconectadas para formar un puente de Wheatstone.

cremallera) y lo amplifican con un tren de engranes para incrementar la sensibilidad hasta 1 μm (50 μin). Algunos calibradores tienen contactos eléctricos incorporados, los que activan luces indicadoras, convirtiéndolos en calibradores PASA-NO PASA.

2. Los *calibradores electrónicos* (transductores) transforman un movimiento mecánico en una señal eléctrica de acuerdo con varios principios. Frecuentemente se usa el transformador diferencial (Fig. 3-15*a*); su salida es cero cuando el núcleo movible está exactamente centrado y es proporcional al desplazamiento en los demás lugares. Otros transductores convierten la deflexión de un resorte de hoja en una señal eléctrica: las galgas extensométricas (espiras de alambre de resistencia) se colocan en el resorte con un adhesivo y se interconectan para formar un circuito de puente de Wheatstone (Fig. 3-15*b*). Una vez que se tiene una deformación, la resistencia del alambre cambia y el puente se desbalancea para dar una salida proporcional a la deflexión (éste es el mismo principio con el que operan muchos indicadores de presión). Con los componentes de contacto adecuados, se pueden emplear en la línea.

3. Los *calibradores neumáticos* miden la contrapresión que se genera cuando el aire emergente del orificio en la cabeza del calibrador incide sobre la superficie de la pieza (Fig. 3-16). Dentro de un intervalo dimensional estrecho, el cambio de presión es proporcional al tamaño de la separación entre la cabeza del calibrador y la superficie de la pieza de trabajo.

4. Los *calibradores capacitivos* miden la distancia entre la pieza y una superficie de referencia. Tanto estos calibradores como los neumáticos son adecuados para mediciones en línea.

5. Los *calibradores ultrasónicos* determinan el espesor por medio del retraso del tiempo entre las reflexiones contra las superficies primera (arriba) y segunda (fondo). Como la velocidad de la propagación del sonido depende del material, es necesaria la calibración contra otro dispositivo. Este calibrador también es adecuado para el control del proceso o mediciones en línea.

6. El *trazado del perfil* se basa en las técnicas de medición de la rugosidad superficial (Sec. 3-5-3) y revela desviaciones por medio de una superficie de referencia.

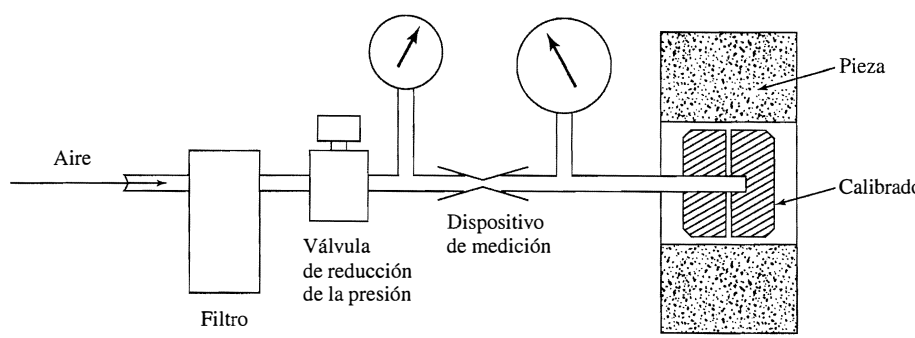


Figura 3-16 Los calibradores neumáticos dan una medida de la distancia entre la cabeza del calibrador y la superficie de la pieza de trabajo.

3-4-5 Dispositivos ópticos

Las ondas de luz tienen una variedad de características que se pueden explotar en la metrología de ingeniería.

1. En vez de observarse en un microscopio, la forma magnificada de una pieza puede proyectarse en una pantalla, en la cual se pueden medir dimensiones, ángulos y formas. Estos instrumentos se llaman *proyectores ópticos* o *comparadores ópticos.*

2. Un *microscopio seccionador de luz* proyecta una banda angosta de luz oblicuamente (en un ángulo de 45°) sobre la superficie de la pieza. La luz reflejada proporciona un contorno de la sección transversal, adecuadamente magnificado.

3. La luz visible tiene longitudes de onda desde 400 nm (extremo violeta) hasta 760 nm (extremo rojo). Cuando un plano óptico (disco de vidrio o cuarzo fundido con planos paralelos, nivelado hasta 50 nm) se coloca en un ángulo ligero con la superficie de la pieza de trabajo y se incide sobre él luz monocromática, se hacen visibles bandas claras y oscuras (*bandas de interferencia*) al ojo (o a un fotodetector). La razón es que los rayos de la luz monocromática se reflejan tanto de la superficie del fondo del plano óptico como de la superficie de la pieza de trabajo (Fig. 3-17*a*). Los dos rayos reflejados interactúan; el rayo reflejado por la pieza de trabajo recorre una trayectoria más larga por una distancia *CDE.* Si ésta es igual a una longitud de onda λ (o un múltiplo entero de ella, $n\lambda$), ambos rayos se refuerzan uno al otro (Fig. 3-17*b*) y el observador ve una banda de luz. A la inversa, si la distancia es $\lambda/2$ (o $\lambda/2 + n\lambda$), los rayos se cancelan y aparece una banda oscura (Fig. 3-17*c*). Como *DE* es prácticamente igual a *CD*, las bandas se repiten cada vez que cambia la altura entre el plano y la superficie de la pieza de trabajo en $\lambda/2$. Contando el número de bandas, se puede medir la distancia total (o la altura de la pieza de trabajo desde un plano de referencia). (Note que aquí la refracción y los cambios de fase se ignoran porque no afectan el argumento.) Los láser de helio-neón se usan cada vez más como la fuente de luz.

La interferometría también es útil para verificar la planicidad de las superficies: cuando la superficie es plana las franjas son rectas, paralelas y están espaciadas uniformemente.

4. Los *haces de láser* altamente colimados se pueden usar para la medición sin contacto (y en línea) de dimensiones. En una aproximación, la pieza de trabajo se coloca en la trayectoria de la luz entre la fuente y el fotodetector. El haz barre a una velocidad prefija, de aquí que la longitud del tiempo para la cual la luz se corta, es una medida de la dimensión. En otra aproximación, el haz se divide y la interferencia con el haz reflejado de la superficie de la pieza da la distancia en un indicador digital, hasta una resolución de 2.5 μm (0.0001), o mejor.

Muchas de las técnicas anteriores también se usan para medir la planicidad, rectitud, circularidad y perpendicularidad.

3-4-6 Máquinas de medición

El término *máquina de medición* se usa para denotar estructuras construidas con extremo cuidado y con el fin de proporcionar soportes para transductores relativos a una

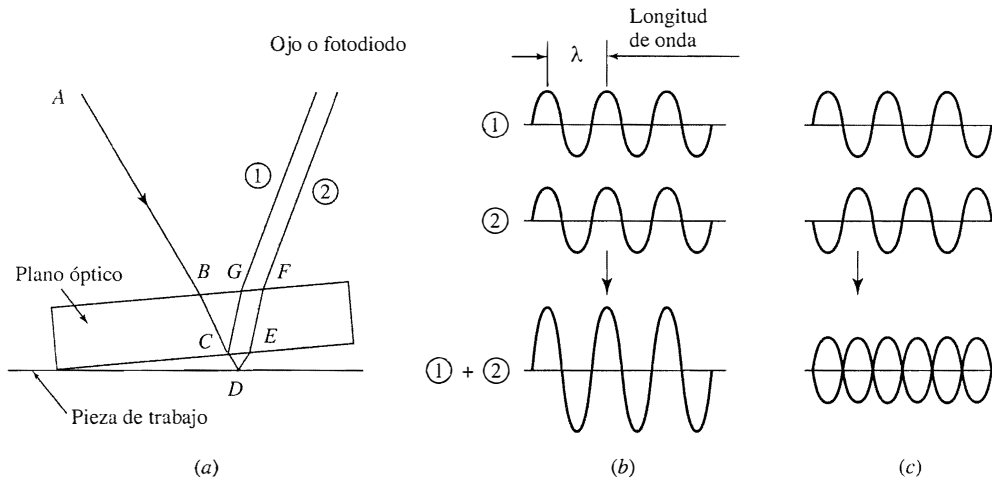


Figura 3-17 La planicidad de una superficie se obtiene por medio de (*a*) bandas de interferencia producidas con la ayuda de un plano óptico. La luz se divide en dos haces: (*b*) cuando están en fase se refuerzan entre sí y aparece una banda de luz, (*c*) cuando están fuera de fase se cancelan y aparece una banda oscura.

superficie o eje de referencia. En cierto sentido, un micrómetro también es una máquina de medición, pero de exactitud limitada. Las máquinas de medición se hacen para ser altamente estables, y contienen movimientos de alta precisión que permiten mediciones a lo largo de uno de dos o de tres ejes mutuamente perpendiculares (*máquinas de medición de coordenadas*, MMC). Algunas máquinas también miden ángulos. Usualmente la calibración se hace por interferometría láser.

Con sondas de contacto altamente sensibles, accionadas a mano o por un programa de computadora, las MMC se usan extensivamente para el trazo de superficies complejas. Resoluciones del orden de 250 nm (10 μin) son posibles con instrumentos de lectura mecánica, electrónica u óptica. Comúnmente la lectura se proporciona en una forma

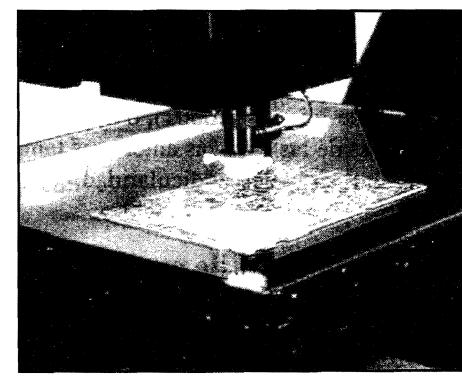


Figura 3-18 La máquina láser de medición de coordenadas *x–y* permite el mapeo de las dimensiones de una parte con una exactitud de submicrones. (*Cortesía de microVu, Windsor, California.*)

digital para su procesamiento por computadora. Para las mediciones sin contacto están disponibles la exploración por haz de láser (Fig. 3-18), el procesamiento de imagen de video y los transductores ópticos.

Las máquinas de medición se pueden usar para comparar dimensiones antes del maquinado y para verificarlas después del mismo. Se pueden enlazar a computadoras para realizar mediciones automáticas, algunas veces en conjunto con una celda de producción controlada por computadora (celda de manufactura flexible, Secc. 21-2-4).

3-5 TOPOGRAFÍA SUPERFICIAL

Pocas superficies son lisas y planas (o cilíndricas o de otra forma geométricamente pura). En el nivel microscópico, las superficies presentan *ondulación* y *rugosidad.*

3-5-1 Rugosidad y ondulación

El perfil de la superficie se puede medir y registrar. Para una visualización más fácil, usualmente los registros se hacen con una ganancia mayor en el eje vertical (Fig. 3-19). Esto da una imagen distorsionada con picos agudos y pendientes pronunciadas; en realidad los picos (*asperezas*) tienen pendientes suaves típicamente de 5-20° de inclinación, como en la figura 4-12*b*. Las huellas, o más frecuentemente la señal, que se obtiene del rugosímetro, se puede procesar electrónicamente, después de ser digitalizadas, en una computadora, a fin de derivar distintos valores para una caracterización cuantitativa del perfil superficial. De las varias medidas dadas en ANSI B46.1-1978, R1995, las que se usan más frecuentemente son las siguientes:

1. R_t es la *altura máxima de la rugosidad* (la altura desde el pico máximo hasta el valle más profundo). Es importante cuando debe removerse la aspereza, por ejemplo, por medio del pulido. Con frecuencia una figura más significativa se obtiene tomando la diferencia promedio entre la altura de los 5 picos más elevados y los 5 valles más profundos dentro de la longitud de muestreo (altura de 10 puntos, R_z).

2. Una línea dibujada de tal forma que el área llena con material es igual a la de las porciones sin rellenar, define la línea central o superficie media. La desviación promedio de esta superficie media se llama el *promedio de la línea central* (CLA, por sus siglas en inglés) o *promedio aritmético* (MA, por sus siglas en inglés); también se denota como R_a:

$$R_a = \frac{1}{l}\int_0^l |y|\, dl \quad \text{o} \quad Ra = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \cdots + y_n}{n} \tag{3-4}$$

3. El valor de la *raíz cuadrática media* (RMS, por sus siglas en inglés) R_q frecuentemente se prefiere en la práctica y también en la teoría de las superficies en contacto

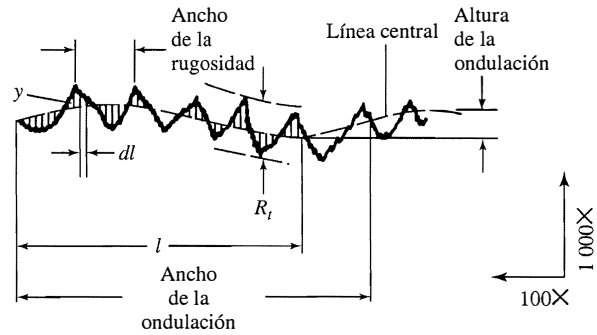


Figura 3-19 La rugosidad de las superficies técnicas se expone por medio de varias técnicas; los registros típicos se hacen con una magnificación en la dirección perpendicular a la superficie.

$$R_q = \left[\frac{1}{l}\int_0^l y^2 dl\right]^{1/2} \quad \text{o} \quad R_a = \left(\frac{y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 \cdots + y_n^2}{n}\right)^{1/2} \tag{3-5}$$

R_q está cercanamente relacionado con R_a ($R_a = 1.11\ R_q$ para una onda senoidal), y para superficies técnicas la relación entre distintos valores se define perfectamente (tabla 3-1).

4. La *oblicuidad* expresa la distribución de las alturas de la rugosidad y es una medida cuantitativa de la "plenitud" de la superficie (Fig. 3-20). La curva de Abbot muestra el área de soporte de carga disponible cuando se toman cortes en varios niveles de la parte superior del perfil.

Las unidades de medición convenientes son el micrómetro (μm) o nanómetro (nm) y la micropulgada (μin).

$$1\ \mu\text{in} = 0.025\ \mu\text{m} = 25\ \text{nm}$$
$$1\ \mu\text{m} = 40\ \mu\text{in}$$

Tabla 3-1 Relación aproximada de los valores de la rugosidad superficial

Tipo de superficie	R_q/R_a	R_t/R_a
Torneada	1.1	4-5
Esmerilada	1.2	7-14
Lapeada	1.4	7-14
Aleatoria	1.25	8

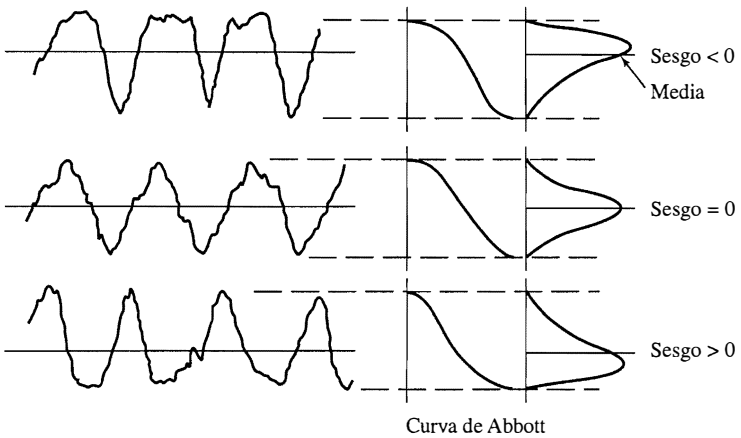


Figura 3-20 Para la misma altura de la rugosidad de pico a valle las superficies pueden tener perfiles muy diferentes, lo cual provoca un sesgo de distribución de la altura de la rugosidad. (*Según ANSI B46.1-1978, R1995.*)

Los detalles más finos de la rugosidad superficial se superponen en variaciones periódicas o no periódicas a mayor escala (ondulación, Fig. 3-19). Al medir la rugosidad superficial, la ondulación se filtra por medio de un procesamiento electrónico de la señal, aunque la ondulación permisible se especifica y mide (en unidades de milímetros o pulgadas) cuando es funcionalmente importante.

En los dibujos se dan *límites de rugosidad* por medio de una marca de verificación escrita sobre la línea para la cual se aplica la designación de la rugosidad (Fig. 3-21). Un número individual de la rugosidad indica un límite superior, debajo del cual cualquier rugosidad es aceptable; si se requiere una rugosidad mínima, se muestran dos límites. La ondulación, cuando es importante, se limita por un número sobre la línea horizontal de la marca de verificación. Las superficies usualmente presentan una topografía característica del proceso de acabado. La *direccionalidad* característica (*sesgo*) se indica por un símbolo colocado bajo la marca de verificación.

Se debe tomar en cuenta que los mismos valores numéricos R_q y R_a se pueden obtener en superficies de perfiles que difieren enormemente, y que los valles altamente localizados suman muy poco a los valores promedio. Por lo tanto, los promedios son inadecuados para describir las superficies para aplicaciones específicas. En general, la caracterización de la superficie permanece como un reto. Sin embargo, el proceso de manufactura debe ser capaz de proporcionar una superficie adecuada para la función proyectada de la parte, pero se pueden emplear diferentes términos cuantitativos o descriptivos para explicar con más detalle el acabado que se requiere.

3-5-2 Acabado superficial y tolerancias

Ya se ha indicado que las tolerancias y las especificaciones del acabado superficial innecesariamente rigurosas son la causa principal de costos excesivos de manufactura.

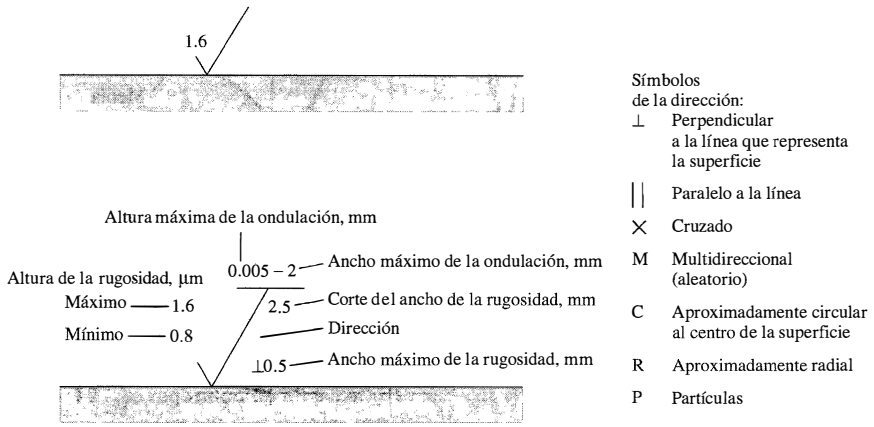


Figura 3-21 Las características del acabado superficial se describen por símbolos estándar (el ejemplo se da en unidades SI, con la rugosidad en µm R_a).

Existe una relación cercana entre la rugosidad y las tolerancias. Una buena práctica es que la altura máxima de la rugosidad R_t (y la ondulación, si existe) debe ser de un tercio a la mitad de la tolerancia; a menos que el ajuste sea forzado y la rugosidad superficial puede ser parcialmente alisada al menos en el proceso de ajuste. Como $R_t = 10R_a$, un

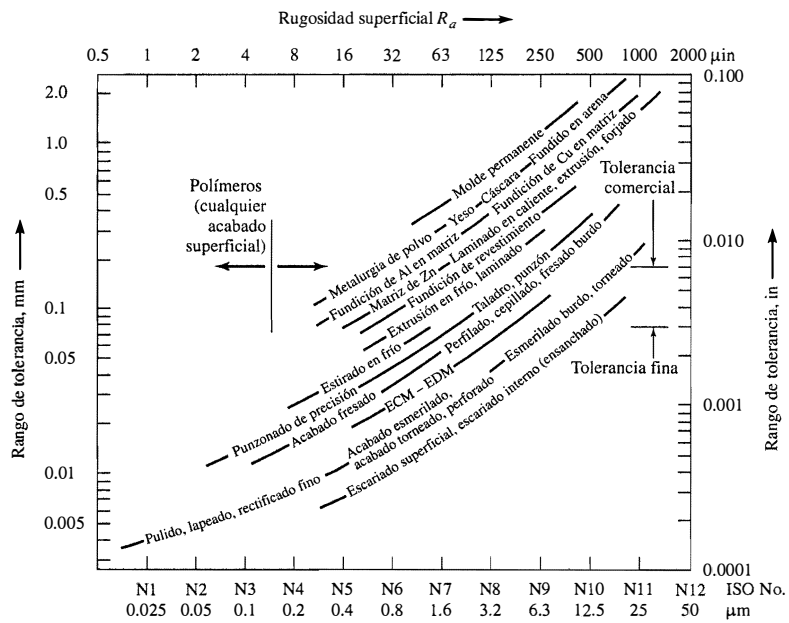


Figura 3-22 En condiciones usuales, cada proceso de manufactura es capaz de producir *partes hasta una tolerancia y acabado superficial característicos. Véase el texto* para la interpretación de la gráfica.

valor de la rugosidad de 3.2 μm (125 μin) R_a sería demasiado grueso para una tolerancia de 0.025 mm (0.001 in), así que se deberá especificar una rugosidad máxima de 0.8 mm (32 μin) R_a para una tolerancia tan cerrada.

Cada proceso de manufactura es capaz de producir una pieza con un cierto acabado superficial e intervalo de tolerancia sin un desembolso extra. Algunas guías generales se dan en la figura 3-22. El acabado superficial y las tolerancias *comúnmente* obtenibles en el proceso se indican con líneas gruesas adyacentes al nombre del proceso. Las capacidades de algunos procesos se traslapan; por ejemplo, el moldeo en cáscara en su mejor punto puede competir con el vaciado en yeso, pero nunca igualará los mejores resultados del vaciado en yeso. Cuando los intervalos son comunes a varios procesos, los nombres de éstos se separan por comas; por ejemplo, la misma tolerancia y acabado superficial se obtienen al taladrar o punzonar un agujero. En general, las piezas plásticas tienen el acabado superficial del molde o matriz en la cual fueron hechos, de aquí que se pueden producir con cualquier acabado (aunque las piezas reforzadas con fibras pueden ser muy burdas).

Las tolerancias dadas se aplican a una dimensión de 25 mm (1 in). Para dimensiones más grandes o más pequeñas, no necesariamente se incrementan o disminuyen linealmente. En la producción es mejor aplicar las recomendaciones publicadas por asociaciones industriales (*véase* Cap. 1) o compañías individuales.

La rugosidad superficial en la figura 3-22 se da en términos de R_a [promedio aritmético, ecuación (3-4)]. En muchas aplicaciones la textura (sesgo) de la superficie también es importante para un valor dado de R_a; procesos diferentes pueden resultar en acabados muy distintos (Fig. 3-23).

Antes se creía que el costo tiende a incrementarse exponencialmente con tolerancias y acabado superficial más estrictos (Fig. 3-24). Esto sólo es cierto si dichas tolerancias se logran a partir de una secuencia que involucre procesos y máquinas herramientas de capacidad limitada. Sin embargo, existen procesos y máquinas herramienta de exactitud inherentemente mayor y con un mejor acabado superficial (Secc. 16-9-2); por tanto, se pueden obtener productos de más alta calidad con poco costo extra y si la aplicación lo justifica, ciertamente con mayor competitividad. Una regla fundamental del diseñador consciente del costo es especificar las tolerancias menos rígidas posibles y las superficies más ásperas que cumplan con la función proyectada. Las tolerancias especificadas deben, si es posible, estar dentro del intervalo obtenible por medio del proceso de manufactura proyectado (Fig. 3-22) para evitar operaciones de acabado separadas.

A partir de lo anterior, resulta obvio que los límites que se indican en la figura 3-22 no son inflexibles. Por supuesto, varias industrias de manufactura han respondido a las presiones competitivas estrechando las tolerancias, mejorando la topografía superficial, y en general mejorando la calidad, sin elevar necesariamente el costo de sus productos.

Ejemplo 3-3

Un respirador infantil depende de una bomba de aire de ciclo rápido y volumen pequeño. En el émbolo hay un sello de PTFE y se ha encontrado que las paredes del cilindro de la bomba se deben acabar entre 0.1 y 0.2 μm R_a. Un acabado más rugoso resulta en la pérdida de la compre-

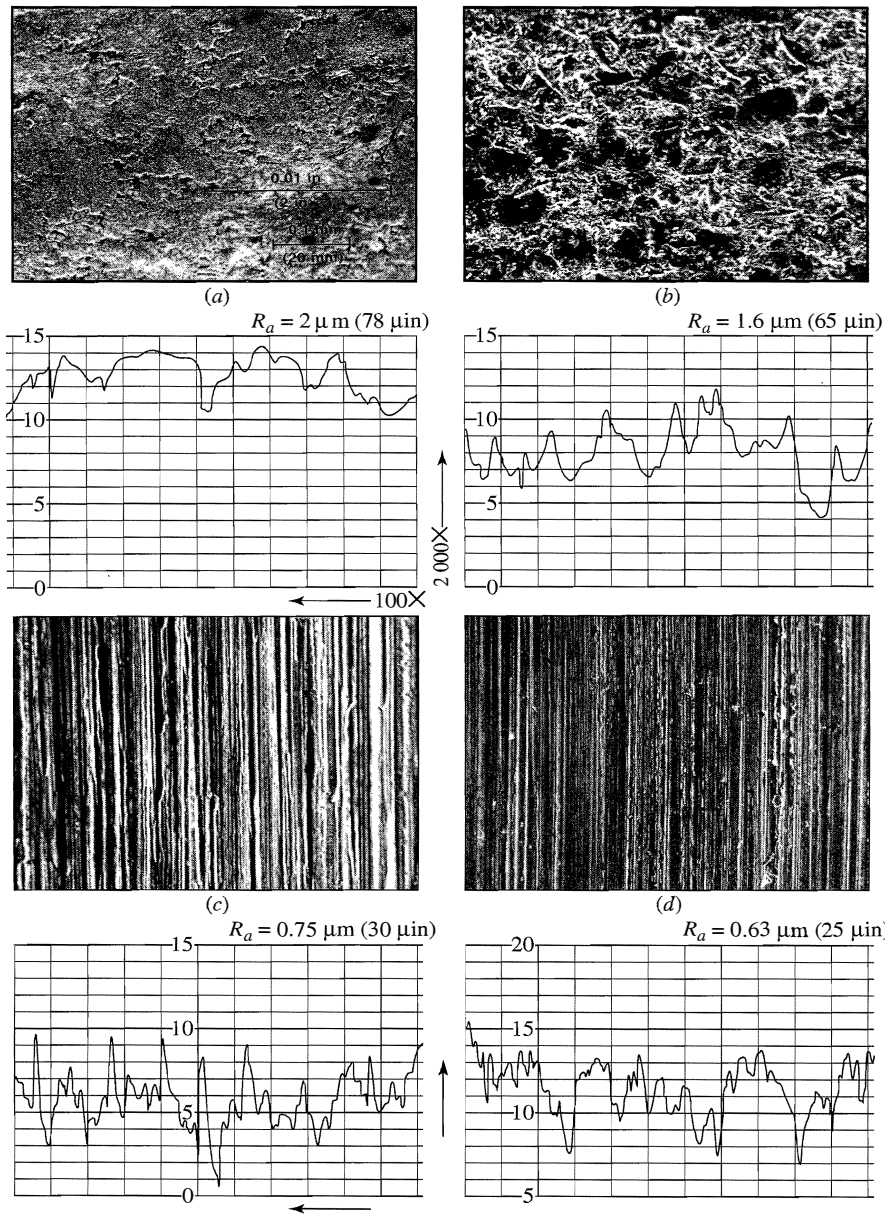


Figura 3-23 Las imágenes de microscopio electrónico de barrido y los trazos de perfiles de superficies (todas 100x) revelan que pueden existir características de detalle muy diferentes en superficies con promedios de rugosidad similares. Superficies aleatorias: (*a*) fundición en molde permanente y (*b*) con granallado. Superficies direccionales: (*c*) laminada en caliente y (*d*) esmerilada.

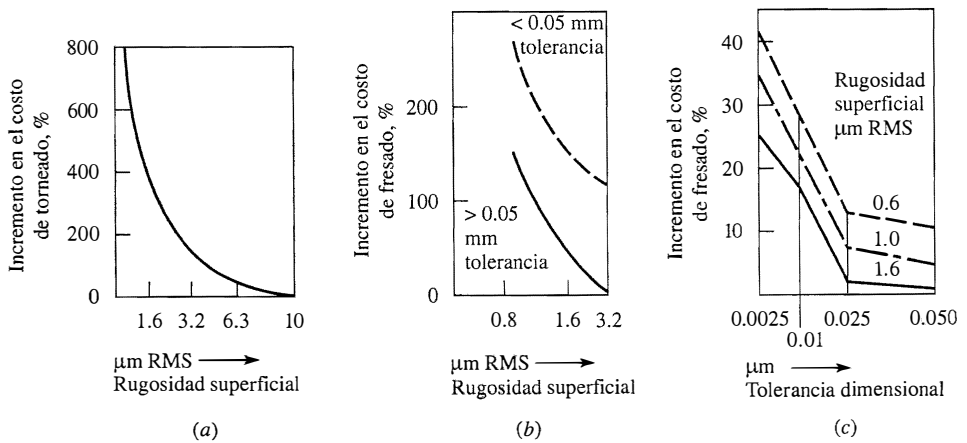


Figura 3-24 Sólo se pueden producir superficies más lisas y tolerancias más estrictas incrementando el costo, ya sea por (*a*) torneado, (*b*) fresado, o (*c*) esmerilado superficial. (*L.J. Bayer, ASME Paper 56-SA.9, 1956. Con permiso de la American Society of Mechanical Engineers, Nueva York.*)

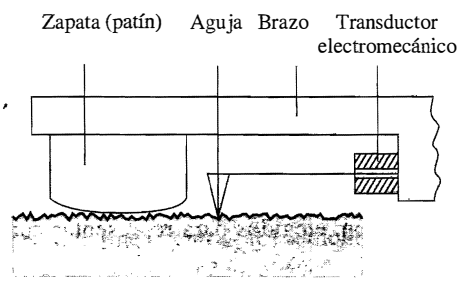


Figura 3-25 Las características superficiales se exponen arrastrando una aguja, unida a un transductor electromecánico, a través de la superficie.

sión debida al rápido desgaste del sello. Un acabado muy liso resulta en una fricción más alta entre el sello y el cilindro; el calor aumenta, el PTFE se funde localmente y el respirador falla. (*Fuente*: M.F. DeVries, M. Field y J.F. Kahles, *Annals of CIRP*, **25**: 569-573, 1976).

3-5-3 Medición de la rugosidad superficial

El instrumento de medición de la rugosidad superficial más común se basa en el principio del fonógrafo (Fig. 3-25). Un brazo con un descanso de referencia se arrastra a través de la superficie, mientras una aguja sigue los detalles más finos de ésta. Se puede

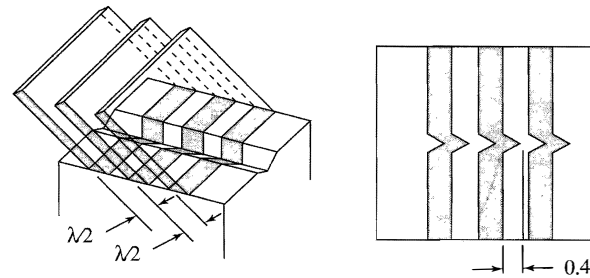


Figura 3-26 La microscopía por interferencia de luz se usa para observar desviaciones desde una superficie plana; en el ejemplo se revela una ralladura de 0.4 μm de profundidad. (*De F.T. Farago, Handbook of Industrial Measurement, 2a. ed., Industrial Press, Nueva York, 1982, p. 394, Fig. 15-21. Se reproduce con autorización.*)

registrar el perfil de la superficie, como en la figura 3-19, y calcular diferentes características de la rugosidad. Los instrumentos portátiles dan una lectura directa de pocos parámetros (comúnmente, R_a o R_q).

Para un uso en la planta también hay juegos disponibles de superficies patrón (*bloques réplica*), con R_q marcada para cada muestra. Al arrastrar una uña a través de la muestra y de una pieza producida, se pueden obtener estimados extraordinariamente cercanos de R_q.

Otros dispositivos de inspección se basan en la medición de la capacitancia, de la interferencia óptica (Fig. 3-26), de la difracción y de la caída de la presión del aire.

En algunos casos, los atributos superficiales son difíciles de cuantificar, así que se usan especímenes de comparación, elegidos para representar cualidades aceptables y de rechazo.

3-6 RESUMEN

Las piezas manufacturadas deben tener formas, dimensiones y rugosidad superficial altamente definidas.

1. La forma de las piezas afecta la función y la manufactura; la clasificación en grupos, de acuerdo con la forma y secuencia de manufactura (tecnología de grupo), ofrece muchos ahorros.
2. Las dimensiones y sus tolerancias son atributos fundamentales y se expresan en los dibujos de ingeniería. El dimensionamiento y las tolerancias ayudan a comunicar el propósito del diseño y facilitan el control de la producción y calidad.
3. Las dimensiones se verifican por medio de varios calibradores basados en cuerpos duros, o en diferentes técnicas electrónicas y ópticas. Las salidas de muchas de ellas se pueden digitalizar, lo que las hace disponibles para el control de la producción y de la calidad. Debido a la importancia de la fabricación de piezas

correctas desde la primera vez, la metrología de ingeniería, y especialmente la medición en el proceso, adquieren un papel central en la manufactura.

4. La apariencia superficial es importante para el atractivo estético. La topografía superficial, incluyendo la rugosidad y el sesgo, es crítica para las superficies de contacto. Se pueden obtener numerosas mediciones de la topografía superficial con varios instrumentos de contacto y de no contacto.
5. El mantenimiento de las tolerancias especificadas es vital para la función de ensambles; además hace posible la capacidad de intercambio. Sin embargo, las especificaciones excesivamente rígidas de la tolerancia y del acabado superficial conducen a costos excesivos de manufactura.

PROBLEMAS 3A

3A-1 Defina holgura, tolerancia y ajuste.

3A-2 Al medir el diámetro de una flecha, proporcione dos ejemplos de cada uno para (*a*) errores asignables y (*b*) errores aleatorios.

3A-3 Para un instrumento de medición, defina: (*a*) sensibilidad, (*b*) resolución, (*c*) repetibilidad, y (*d*) estabilidad.

3A-4 Haga un boceto para mostrar el registro típico de rugosidad superficial que se obtendría por medio de un instrumento del tipo de aguja que viajan perpendicular al sesgo de una superficie torneada. (*a*) Indique las magnificaciones relativas, (*b*) muestre la línea central, (*c*) indique el ancho de la rugosidad, (*d*) señale el ancho y la altura de la ondulación, (*e*) defina R_a, R_q y R_t (en palabras o ecuaciones).

3A-5 Haga bocetos para mostrar el movimiento en (*a*) dos ejes, (*b*) tres ejes y (*c*) cinco ejes.

3A-6 En un plano similar al de la figura 3-5, muestre una flecha con ajuste por interferencia en un agujero. Suponiendo un ensamble con base en el agujero, muestre las bandas de tolerancia y las condiciones máxima y mínima del material.

3A-7 Dibuje el patrón de las bandas de interferencia cuando una parte plana tiene una raspadura en la superficie.

PROBLEMAS 3B

3B-1 Hay normas disponibles que enumeran los tamaños preferidos. ¿Se han desarrollado por razones de tecnología, economía, o por ambas? Explique su respuesta.

3B-2 La tolerancia diametral de una flecha de 20.00 mm de diámetro y 200.00 mm de longitud es ±0.10 mm. Se usaron el dimensionamiento y tolerancias por coordenadas. (*a*) Haga un boceto dimensional de un cilindro perfectamente geométrico. (*b*) Haga bocetos de otros dos cuerpos que satisfagan las especificaciones.

3B-3 ¿Qué técnica de no contacto sería adecuada para una inspección automática del 100% de las flechas que se producen con las tolerancias que se muestran en la figura 3-5? Indique al menos dos opciones e indique qué factores afectarán la elección.

3B-4 ¿Las tolerancias en la figura 3-5 son unilaterales o bilaterales? Explique por qué se eligió este sistema particular de tolerancias.

3B-5 Los diámetros de cuerpos cilíndricos torneados se miden con un micrómetro. (*a*) Dibuje un diagrama con la curva de campana dentro de $\pm 3\sigma$ de la zona de tolerancia. Superponga la curva que se esperaría si (*b*) la medición se hubiera hecho por un operador no calificado, o (*c*) por un operador calificado, pero si todos los cilindros estuvieran demasiado grandes. (*d*) En el inciso (*a*), ¿todos los cuerpos se encontrarían dentro de la zona de tolerancia?

3B-6 Un lote de componentes se regresa al fabricante con el reclamo que todas las partes están fuera de tolerancia, aunque sus dimensiones están muy agrupadas. En el proceso, 100% de la inspección se hizo con un calibrador neu-

mático. ¿Es correcto el reclamo? Justifique su respuesta.

3B-7 Sugiera al menos 2 técnicas de medición en línea en el proceso para: la (*a*) flecha y el (*b*) cojinete de la figura 3-5.

3B-8 El acabado superficial de una pieza se especifica como máximo 1.6 μm R_a. Un instrumento manual del tipo de aguja da lecturas en μm RMS. ¿Debe ser el límite máximo permisible mayor o menor que 1.60 μm?

3B-9 Un cliente se queja de que una parte no es utilizable porque se recibió con una raspadura que no pudo removerse por medio del pulido usual. Los registros de inspección muestran que la parte salió de la planta con un acabado superficial que satisface la rugosidad R_a. (*a*) ¿Puede ser válida la queja del cliente? Justifique su respuesta. (*b*) Si ésta es afirmativa, ¿cómo cambiaría su especificación para la topografía superficial?

3B-10 Haga un boceto del patrón de las bandas de interferencia que se producen cuando se colocan sobre un plano óptico: (*a*) una bola de un rodamiento de bolas y (*b*) un rodillo de un rodamiento de rodillos.

3B-11 Se mide la rugosidad de superficies similares a las que se muestran en la figura 3-23. Exprese para cada una de las cuatro superficies si el valor de la rugosidad R_a será mayor en la dirección *horizontal o vertical de la fotografía.*

PROBLEMAS 3C

3C-1 Se verifican las dimensiones de la flecha y el cojinete que se muestran en la figura 3-5. (*a*) ¿Qué precisión debe tener el dispositivo de medición? y *b*) ¿cuál sería la división más pequeña de la escala en ese instrumento?

3C-2 Haga bocetos dimensionales de los calibradores PASA-NO PASA que se usan para verificar: (*a*) la flecha y (*b*) el cojinete, de la figura 3-5.

3C-3 Los cojinetes de lubricación hidrodinámica se fabrican comúnmente con una holgura de 0.1% de diámetro. Verifique si el cojinete de la figura 3-5 satisface este criterio.

3C-4 La flecha de la figura 3-5 está hecha de acero inoxidable ANSI 410. Hay un cambio de 10°C en la temperatura ambiente; ¿cuál será su efecto en el diámetro?

3C-5 Un volante de inercia (con un diámetro del agujero de 50.000-50.025 mm) se ajusta en una flecha (de diámetro 50.070-50.086 mm). El coeficiente de dilatación térmica del acero es 12.4 μm/m · K. (*a*) ¿Está dimensionado el ensamble con base en el sistema del agujero o de la flecha? ¿Por qué? (*b*) Calcule el ajuste para la condición mínima y máxima del material. (*c*) La flecha y el volante de inercia se ensamblan calentando este último; calcule la temperatura necesaria. (*d*) Alternativamente, la flecha se podría enfriar en nitrógeno líquido. Determine sí esto es factible.

3C-6 Después de rectificar la flecha del problema 3C-5, se mide el diámetro con un calibrador de separación (calibrador C). La flecha está a 80°C y el calibrador a temperatura ambiente (20°C). (*a*) Calcule la magnitud del error de medición. (*b*) ¿Se puede medir el diámetro de la flecha con la exactitud requerida? Si no, ¿qué se debe hacer? (*c*) Indique el valor máximo de R_t y (*d*) R_a deseables.

3C-7 Un bloque de aluminio 2024 de 200 mm de longitud se fresa en sus seis caras y ahora está a 70°C. Para verificar las dimensiones se usan *calibradores tipo pie de rey hechos de acero y* calibrados a 20°C. Ahora están a 25°C. Calcule el error si la dimensión de 200 mm se especifica a 20°C.

3C-8 En el problema 3C-7 tanto el bloque de aluminio como los calibradores están ahora a 30°C. ¿Cuál es el error?

3C-9 El bloque de aluminio del problema 3C-7 aún está a 70°C, pero el calibrador está a 16°C. ¿Cuál es el error?

3C-10 Un plano óptico se coloca sobre una superficie pulida pero ondulada. Haga un boceto mostrando las bandas de interferencia que se producen por una luz monocromática, si la longitud de onda es un cuarto de la profundidad de la ondulación.

LECTURAS ADICIONALES

Wick, C. y R. Veilleux (eds.): *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, vol. 4, *Quality Control and Assembly*, Society of Manufacturing Engineers, 1987.

Bosch, J.A.: *Coordinate Measuring Machines and Systems*, Dekker, 1995.

Farago, F.T. y M.A. Curtis: *Handbook of Dimensional Measurement*, 3a. ed., Industrial Press, 1994.

Henzhold, G.: *Handbook of Geometrical Tolerancing*, Wiley, 1995.

Krulikowski, A.: *Fundamentals of Geometric Dimensioning and Tolerancing*, Delmar, 1997.

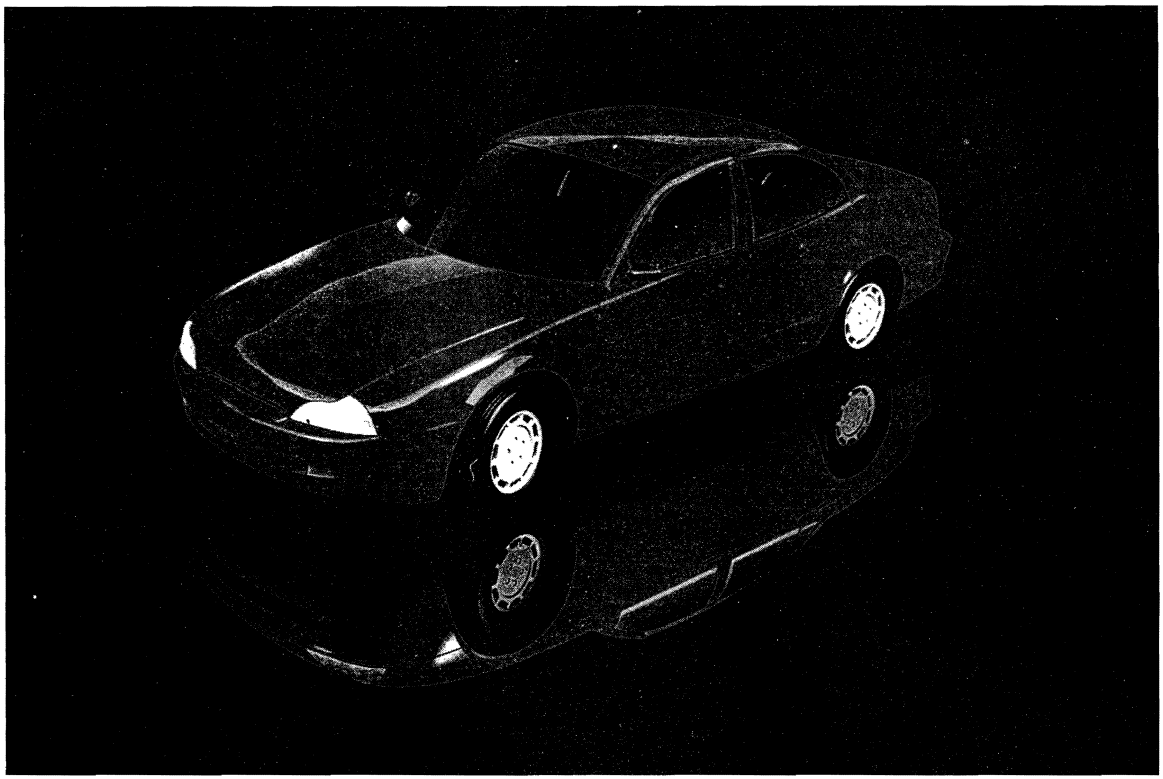
Medows, J.D.: *Geometric Dimensioning and Tolerancing*, Dekker, 1995.

Medows, J.D.: *Measurement of Geometric Tolerances in Manufacturing*, Dekker, 1998.

Murphy, S.D.: *In-Process Measurement and Control, Dekker*, 1990.

Puncochar, D.E.: *Interpretation of Geometria Dimensioning and Tolerancing*, 2a. ed., Industrial Press, 1997.

Sydenham, P.H.: *Transducers in Measurement and Control*, 3a. ed., Hilger, Bristol, 1985.



El automóvil ejemplifica la multitud de propiedades que un producto manufacturado debe satisfacer: soporta cargas estáticas y dinámicas, protege a sus ocupantes en un choque, resiste la corrosión, tiene una apariencia agradable, y hace todo esto por un precio altamente competitivo. [Automóvil genérico del proyecto UltraLight Steel Auto Body (ULSA B).] (*Cortesía de American Iron and Steel Institute, Southfield, Michigan.*)

capítulo

4

Atributos de servicio de los productos manufacturados

En este capítulo se analizan las propiedades más importantes de los materiales de ingeniería. No sólo sirve como un repaso para aquellos estudiantes que han tomado un curso en materiales, sino que también destaca los principios con implicaciones en la manufactura. Se aprenderá acera de:

Las propiedades mecánicas y su determinación

Del comportamiento dúctil y frágil de los materiales

Los efectos dañinos de los defectos internos, inclusiones y defectos superficiales diminutos

Los métodos de neutralización de estos efectos: la importancia de la limpieza, la presión hidrostática y los esfuerzos residuales

De la formación elástica del equipo de ensayo y producción

De las propiedades físicas, tribológicas y químicas

Las propiedades que hacen valiosos a los productos manufacturados se llaman atributos de servicio. También son importantes para el diseño, porque con frecuencia las propiedades de servicio imponen la elección de materiales o, al menos, reducen la elección de materiales alternos que se pueden considerar. Esto tiene repercusiones inmediatas para la manufactura por varias razones:

1. *Los procesos óptimos varían para distintos materiales* y afectan la elección del proceso de manufactura.

2. Los procesos se pueden hacer para cambiar las propiedades de los materiales, a menudo influyendo en la estructura o el estado de los esfuerzos en el material. La *secuencia* de los procesos de manufactura se debe elegir para cualquier material dado, de manera que las *propiedades finales deseadas se logren a un costo mínimo.*

3. La aceptabilidad del producto terminado se juzga con base en ensayos, en los que se verifica el ajuste a las especificaciones. *Los mismos ensayos se deben emplear durante la manufactura para asegurar que las propiedades del producto final cumplan con las especificaciones*. Con frecuencia éstos se complementan con ensayos tecnológicos; es decir, ensayos que simulan las condiciones impuestas sobre el material durante su manufactura. Los ensayos tecnológicos se describirán en los capítulos individuales que tratan procesos.

4-1 PROPIEDADES MECÁNICAS EN TENSIÓN

Una de las propiedades más obvias de los productos manufacturados es que son capaces de soportar cargas. Las *cargas* (*fuerzas*) pueden ser de varias clases; en consecuencia, existen muchos métodos de prueba diseñados con el objetivo específico de reproducir las cargas durante el servicio. En muchas aplicaciones la carga es estática, es decir, constante y estacionaria, por lo que se realizan varios ensayos a velocidades tan bajas que la fuerza de aplicación se puede considerar como estática. Pero otros ensayos tienen como objetivo establecer el comportamiento a temperaturas elevadas o a velocidades controladas de la aplicación de la carga. En el capítulo 5 se verá que los materiales de construcción se pueden clasificar en forma general como metales, cerámicos, plásticos y compuestos; además, se pueden aplicar ensayos diferentes para materiales distintos. Los resultados se ven afectados por el método de prueba; por lo tanto, deben conducirse con apego a las normas.

4-1-1 El ensayo de tensión

La mayoría de las estructuras imponen esfuerzos de tensión sobre los componentes; así que, las propiedades se verifican rutinariamente en el *ensayo de tensión* (*ensayo a la tensión*), sujeto a la ASTM Standard E8.

Preparación de la prueba La probeta de ensayo se maquina con cabezas más grandes en sus extremos para asegurar el agarre. Existen geometrías estándares para las probetas redondas y planas (láminas). Al imponer la carga, la parte más débil de la sección transversal uniforme (la *longitud calibrada*) se deforma (Fig. 4-1). Por lo general la longitud calibrada se marca exactamente en la superficie.

La probeta se sujeta por medio de cabezas autoalineantes para asegurar que sólo se impondrán cargas de tensión pura. La *máquina de ensayo* es en esencial una prensa en la cual un cabezal móvil se desplaza de manera controlada (tal como por una velocidad prefija) por un servomotor. En la figura 4-1 el servomotor es un cilindro hidráulico, pero puede ser un tornillo y tuerca u otro mecanismo. El movimiento del cabezal desarrolla una fuerza P, la cual está equilibrada por la fuerza de reacción P. La magnitud de P se mide con un instrumento llamado *dinamómetro*. La mayoría de las máquinas están equipadas con una celda de carga que emite una señal eléctrica proporcional a la carga aplicada. Todas las celdas de carga se calibran contra otra celda de exactitud conocida.

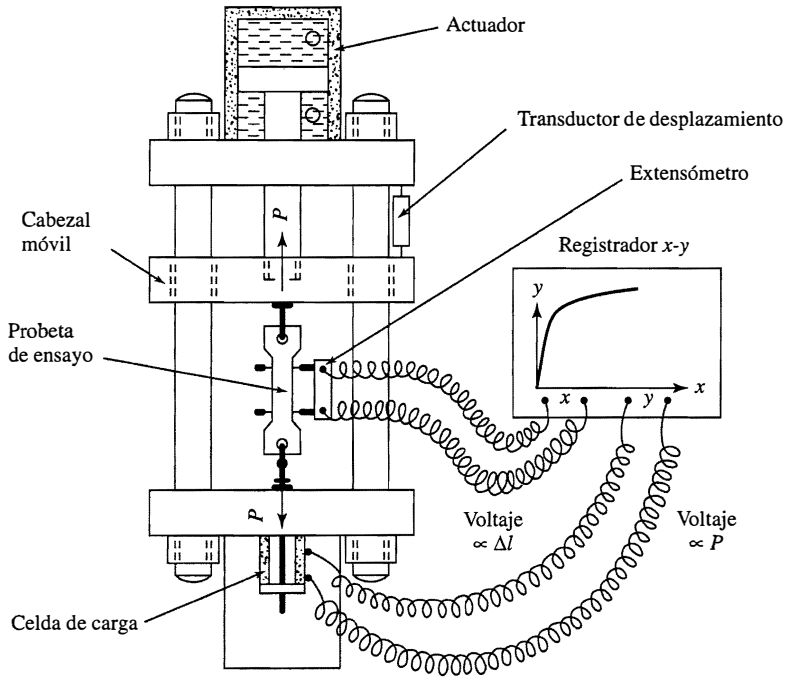


Figura 4-1 Las máquinas universales de prueba se pueden usar para ensayos de tensión, compresión y flexión. Un registrador o sistema de adquisición de datos se emplea para obtener valores de la fuerza y el desplazamiento; este último se puede obtener por medio de un extensómetro colocado a la probeta o de un transductor de desplazamiento colocado al cabezal móvil.

La extensión de la probeta se mide colocando un *extensómetro* a la longitud calibrada. Los transductores dan una salida eléctrica proporcional a la elongación Δl. También se pueden usar los métodos ópticos de no contacto.

En el curso del ensayo, tanto la carga como la extensión cambian en forma continua. En forma más conveniente, se usan salidas de un transductor para accionar un registrador *x-y*, de manera que se obtenga un registro de fuerza (variable dependiente) como función de la extensión (variable independiente). Las salidas se pueden digitalizar de manera directa con un sistema de adquisición de datos enlazado a una computadora; de esta forma se acelera el análisis de los resultados. Aun así, hay mérito en un registro visual, que con frecuencia revela características potencialmente oscurecidas por el procesamiento numérico.

Curva esfuerzo-deformación unitaria El diagrama fuerza-desplazamiento que se muestra en la figura 4-2*a* es común en los materiales dúctiles, tales como el cobre ensayado a temperatura ambiente. Si se ensayaran probetas de una sección transversal mayor, se obtendrían curvas diferentes, simplemente porque se necesita mayor fuerza para deformar una probeta más grande. Por lo tanto, los resultados se pueden normalizar dividiendo la fuerza P entre el área A sobre la cual actúa la fuerza. En general, el

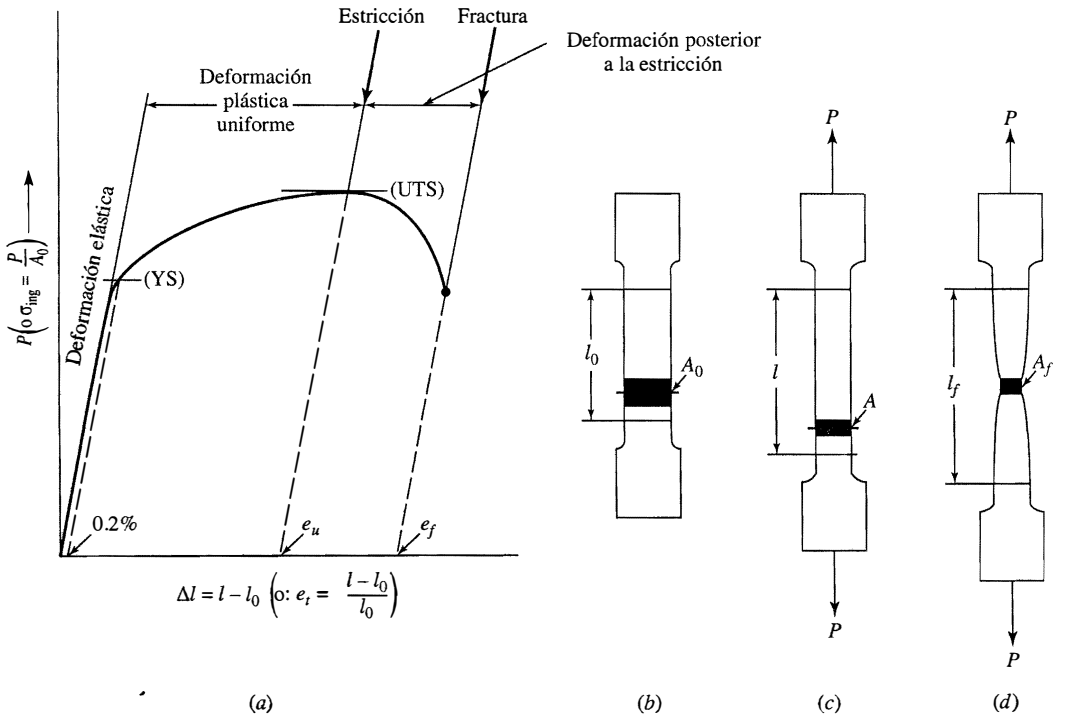


Figura 4-2 (*a*) La curva fuerza-desplazamiento (o esfuerzo-deformación unitaria de ingeniería) obtenida en un material dúctil refleja la secuencia de eventos: (*b*) una probeta de sección transversal inicial A_0 primero sufre deformación elástica, luego (*c*) se deforma plásticamente, más o menos de manera uniforme dentro de la longitud de calibración, y (*d*) subsecuentemente aparece la estricción y finalmente se fractura.

esfuerzo se define como la fuerza interna por unidad de área en un objeto sometido a fuerzas externas. Un *esfuerzo normal* actúa perpendicular a la sección que lo soporta y se denota por σ. Su valor es

$$\sigma = \frac{P}{A} \qquad \textbf{(4-1)}$$

La unidad SI del esfuerzo es N/m^2 (también llamada pascal, Pa); esto representa un esfuerzo muy pequeño, por ello, con frecuencia se usa el MN/m^2 o MPa. La unidad MPa es numéricamente igual a N/mm^2, lo cual es más conveniente para muchos cálculos. En el Sistema Convencional de Estados Unidos (USCS), la unidad es lbf/in^2, escrita como psi. Ésta es también una unidad demasiado pequeña, por lo que se utiliza más un valor mil veces mayor (con frecuencia denotado como ksi pero, con mayor lógica, escrito como kpsi en este libro). (Para una conversión rápida, 1 kpsi = 7 MPa.) En el viejo sistema métrico, la unidad era kg/mm^2, la cual es aproximadamente igual a 10 N/mm^2 (el kg representa kg fuerza).

En el curso del ensayo de tensión la probeta se alarga de manera forzada. Para una primera aproximación, la mayor parte de los materiales de ingeniería son incompresibles. Aunque hay un cambio pequeño en el volumen durante la deformación elástica, su volumen V permanece virtualmente constante durante la deformación plástica. Esto se expresa como el *principio de invariabilidad del volumen*:

$$V = A_0 l_0 = A_1 l_1 = Al \tag{4-2}$$

donde A y l son el área de la sección transversal y la longitud instantáneas, respectivamente. El subíndice 0 se refiere a las dimensiones iniciales, el subíndice 1 a las dimensiones finales. Regresaremos varias veces a este principio.

Debido a la invariabilidad del volumen, debe existir una reducción en el área de la sección transversal para compensar el incremento en la longitud (compare la figura 4-2*c* con la 4-2*b*). Sin embargo, el valor exacto del área de la sección transversal no se conoce de inmediato, por lo que se ha adoptado la convención para calcular la fuerza P dividida entre el área de la sección transversal original A_0. Por definición, el esfuerzo es una fuerza que actúa sobre una unidad de área; como aquí dividimos la fuerza entre un área que ya no existe, el resultado se distingue de un esfuerzo real llamándolo *nominal, convencional* o *esfuerzo de ingeniería* (σ_{ing} o S):

$$\sigma_{ing} = \frac{P}{A_0} \tag{4-3}$$

La elongación también se puede normalizar tomando el cambio en la longitud y dividiéndolo entre su valor original; esto se denomina usualmente como *deformación de ingeniería por tensión* e_t,

$$e_t = \frac{l - l_0}{l_0} \tag{4-4a}$$

donde $l - l_0 = \Delta l$, es el cambio en longitud. Por conveniencia, a menudo se da el valor porcentual:

$$e_t(\%) = \frac{l - l_0}{l_0} 100 \tag{4-4b}$$

Los sistemas de adquisición de datos se pueden sumar a todos los equipos de ensayo, y la información puede procesarse por una computadora. Combinados con un control por computadora del equipo de ensayo en sí (por ejemplo, por control servohidráulico), los ensayos se pueden automatizar.

4-1-2 Interacciones equipo/proceso

Para propósitos de control de calidad, a menudo se puede simplificar el método de ensayo: no se usa un extensómetro y la curva fuerza-desplazamiento se registra simplemente por medio del cabezal movible. El registro obtenido de esta forma (Fig. 4-3, línea discontinua) es similar al logrado con un extensómetro (Fig. 4-3, línea continua), pero con una diferencia importante: la pendiente inicial de la curva ahora es mucho más

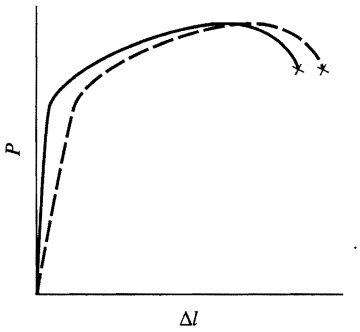


Figura 4-3 La pendiente inicial de una curva fuerza-desplazamiento obtenida por medio de un extensómetro (línea continua) proporciona el módulo elástico del material; una curva obtenida a través del desplazamiento del cabezal (línea discontinua) incluye la deformación elástica de la máquina.

baja. La revisión de la figura 4-1 demostrará que la fuerza P deforma no sólo la longitud calibrada (y el resto de la probeta), sino también la máquina: los cabezales estacionarios se doblan y las columnas se comprimen. Aunque la máquina es mucho más fuerte que la probeta, la longitud sobre la cual ocurre la deformación (la *trayectoria de la carga elástica*) es mucho más larga: la máquina se comporta como un resorte muy largo, colocado en serie con el resorte corto que representa a la probeta. En consecuencia, la deformación de la máquina se suma a la deformación de la probeta, y la pendiente inicial de la curva fuerza-desplazamiento representa la suma de las dos.

Ésta es una observación importante porque en la mayor parte de los procesos de manufactura, la deformación elástica de la máquina es lo suficientemente grande para afectar el control dimensional de las piezas producidas. Tendremos numerosas ocasiones para referirnos al principio de la *deformación elástica del equipo de producción*.

4-1-3 Resistencia en tensión

La inspección de la curva esfuerzo-deformación unitaria de ingeniería muestra varios puntos críticos que se pueden usar para caracterizar a un material.

Módulo elástico Al inicio del ensayo, la fuerza se incrementa rápidamente y es proporcional a la deformación: la curva esfuerzo-deformación unitaria obedece la *ley de Hooke*

$$\sigma = Ee_t \tag{4-5}$$

La constante de proporcionalidad (la pendiente de la curva) se llama el *módulo elástico* o *módulo de Young E*

$$E = \frac{\sigma}{e_t} \text{ (MPa o psi)} \tag{4-6}$$

Si la probeta se descarga en este rango, regresará a su longitud original, es decir, *toda la deformación es elástica.* La mayoría de las estructuras se diseñan de manera que nunca deben sufrir deformación permanente; así, E determina el cambio en la longitud de un componente para una carga dada. El módulo elástico refleja la estructura y resistencia de enlace básicas de los materiales. Para obtener una idea general del orden de las magnitudes encontradas, el capítulo 5 contiene tablas con valores comunes para algunos metales, cerámicos, plásticos y compuestos. Note que, mientras que el módulo elástico es poco afectado por el proceso, a menudo otras propiedades tienen un rango amplio para un material dado, y uno de los propósitos de este libro es mostrar cómo las propiedades se pueden hacer a la medida a través del control de manufactura.

Un *material completamente frágil* sólo se deforma de manera elástica. En algunos esfuerzos críticos, la separación (fractura) ocurre repentinamente (Fig. 4-4*a*), por lo general en un plano perpendicular al eje de la aplicación de la carga (Fig. 4-4*b*). Con frecuencia la fractura se origina a partir de una grieta diminuta que eleva el esfuerzo localmente (Secc. 4-1-6). El comportamiento frágil, identificable por una elongación cero, es común en algunos metales, en casi todos los cerámicos y en polímeros termofijos; la deformación plástica es mínima en algunas aleaciones.

Ejemplo 4-1

Una probeta para ensayo de tensión de 12.7 mm de diámetro y con una longitud calibrada de 50 mm, se fundió con una aleación de Zn-12Al. Se registró la línea que se muestra en la figura 4-4*a* (línea discontinua) con un extensómetro. Determine el módulo elástico.

Dibuje una línea paralela a la línea elástica en $\Delta l = 0.05$ mm.

De la ecuación (4-3), $\sigma = P/A_0 = 1\,900$ N/$(12.7^2\pi/4)$ mm^2 = 15 N/mm^2; de la ecuación (4-4*a*), $e_t = 0.05/50 = 0.001$; de la ecuación (4-6), $E = 15$ MPa/0.001 = 15 GPa.

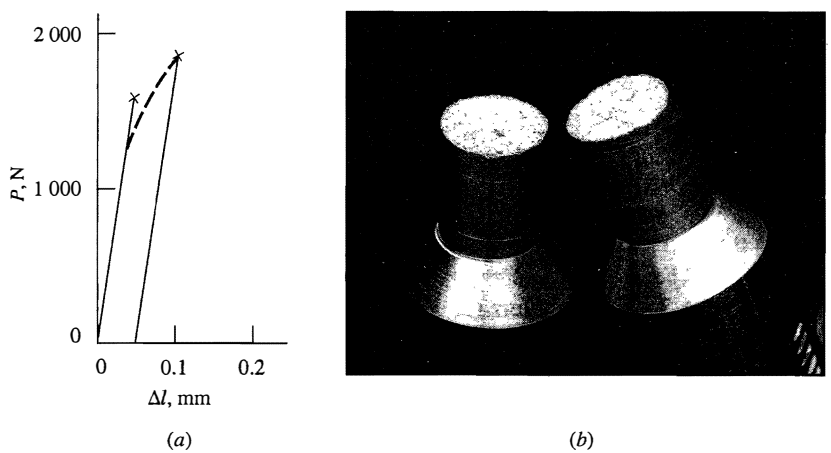


Figura 4-4 Un material frágil presenta (*a*) poca o ninguna evidencia de deformación plástica en el ensayo de tensión y (*b*) la fractura ocurre con frecuencia a lo largo de las fronteras de grano u otras características de debilidad. (*El ejemplo que se muestra es una aleación de Zn- 12Al. Cortesía del Dr. P. Niessen, University of Waterloo.*)

Al determinar el módulo elástico, se debe ser muy cuidadoso para considerar sólo la pendiente de una curva de ensayo de tensión al usar un extensómetro. Si el desplazamiento se toma del cabezal, la pendiente inicial representa la deformación combinada de la probeta y de la máquina (sección 4-1-2).

Algunos materiales (por ejemplo, el hierro fundido gris y algunos plásticos) fluyen gradualmente desde el inicio, así que la ley de Hooke no es válida. Un módulo arbitrario (*módulo secante*) se determina conectando el origen con un punto específico (por ejemplo, un cuarto de la resistencia de tensión, o una deformación escogida arbitrariamente).

Límite de fluencia Cuando se prueban los materiales dúctiles, en algún esfuerzo crítico la pendiente de la curva cambia y este esfuerzo se califica como el *límite proporcional*. Sin embargo, su determinación es muy difícil; por lo tanto, se acostumbra elegir un punto en el cual la probeta se deforma de modo permanente. El esfuerzo de ingeniería correspondiente se llama *límite de fluencia* YS o S_y. Para la mayoría de los materiales metálicos se toma como límite el 0.2% de la deformación permanente, porque se mide con relativa facilidad; entonces el límite de fluencia se denota como $\sigma_{0.2}$ (o $S_{0.2}$).

$$\sigma_{0.2} = \frac{P_{0.002}}{A_0} \tag{4-7}$$

Note que, por definición, la deformación de 0.002 es toda *deformación plástica* (permanente); por lo tanto, la fuerza correspondiente $P_{0.2}$ se encuentra dibujando una línea de $e_t = 0.002$ *paralela a la línea elástica*. Si la probeta se descargara en este punto, toda la deformación se recuperaría en una pendiente igual a la inicial de la curva fuerza-desplazamiento. Dibujando la línea paralela se elimina la contribución de la deformación elástica a la deformación total (Fig. 4-2*a*).

El límite de fluencia es una cantidad importante para el diseño. Para prevenir aun la deformación plástica más ligera de una estructura de ingeniería, el esfuerzo de diseño a menudo se mantiene a alguna fracción de $\sigma_{0.2}$ usando un factor de seguridad, o el diseño se hace con un valor menor tal como $\sigma_{0.02}$.

Resistencia a la tensión Con más carga y elongación, la sección calibrada de la probeta se alarga (y su sección transversal se reduce) de manera uniforme a lo largo de toda su longitud (Fig. 4-2*c*), pero la fuerza se incrementa gradualmente. Por razones que se explicarán en la sección 8-1-4, el material se hace más fuerte con la deformación (se endurece por deformación). En algún nivel crítico de deformación común del material y de su historia de manufactura, el endurecimiento por deformación no puede contrabalancear la pérdida de resistencia que resulta de la cada vez más decreciente área de la sección transversal, y se forma una estricción en el punto más débil. Como ahora la sección transversal está reducida localmente, la fuerza soportada por esta sección debilitada es menor, y la fuerza P declina mientras la deformación se concentra en la zona ya restringida (Fig. 4-2*d*). Por último, ocurre la fractura.

El esfuerzo de ingeniería o convencional en la carga máxima se llama *resistencia a la tensión* (TS, o S_u) o también se denomina *resistencia última a la tensión* (UTS),

$$\text{TS} = \frac{P_{\text{máx}}}{A_0} \tag{4-8}$$

La resistencia a la tensión no es un esfuerzo real (porque la fuerza se divide entre un área que no existe en este punto), pero tiene un gran valor práctico para propósitos de control de calidad. También es una medida de la fuerza máxima que un componente puede soportar antes de la falla catastrófica.

Ejemplo 4-2

Un componente de una aeronave, hecho de una aleación de aluminio 7075-T6, se puede representar como una barra de 20 mm de diámetro y 400 mm de longitud. Se carga a tensión pura. Calcule (*a*) la extensión de la barra con una carga impuesta de 80 kN, (*b*) la carga a la cual la barra sufre deformación permanente y (*c*) la carga máxima que la barra puede soportar sin fractura.

De la tabla 5-2, E = 70 GPa; YS = 500 MPa; TS = 570 MPa.

(*a*) El área de la sección transversal de la barra es $A_0 = 20^2\pi/4 = 314$ mm^2. El esfuerzo de tensión impuesto es 80 000/314 = 255 N/mm^2 (= 255 MPa), y de esta forma es menor que el YS: la deformación será puramente elástica. De la ecuación (4-5) $e_t = \sigma/E = 255/70\,000 = 0.0036$ o 0.36%.

(*b*) YS = $\sigma_{0.2}$ = 500 N/mm^2. De la ecuación (4-7), $P_{0.002} = (\sigma)(A_0) = (500)(314) = 157$ kN.

(*c*) De la ecuación (4-8), $P_{\text{máx}} = (\text{TS})(A_0) = (570)(314) = 179$ kN.

4-1-4 Ductilidad en tensión

La curva esfuerzo-deformación unitaria de ingeniería también proporciona información sobre la ductilidad del material, es decir, acerca de su habilidad para deformarse sin fractura.

1. **Elongación uniforme.** Antes de la estricción, la sección transversal se reduce en forma casi uniforme a lo largo de la longitud calibrada. Por lo tanto, la deformación unitaria de ingeniería soportada en el punto de carga máxima se llama *elongación uniforme*, y se denota por e_u

$$e_u = \frac{l_u - l_0}{l_0} \tag{4-9a}$$

donde l_u es la longitud de la probeta en el punto de la estricción. La elongación uniforme será importante para algunos procesos de deformación, pero tiene poca aplicación como una propiedad de servicio y rara vez se da en las bases de datos.

2. **Elongación.** Con mayor frecuencia, la *elongación hasta la fractura* total (también llamada *elongación total* o simplemente, y de forma engañosa, *elongación*) se mide reacomodando las partes rotas de la probeta y midiendo la distancia l_f entre la marca calibrada

$$e_f = \frac{l_f - l_0}{l_0} \qquad \textbf{(4-9b)}$$

En forma alterna, la longitud de la fractura se toma de la salida del extensómetro. Note que, si l_u o l_f (o cualquier longitud durante la deformación) se mide de un registro, la contribución elástica a la elongación se debe descontar *dibujando una línea paralela a la línea elástica de carga* (Fig. 4-2*a*).

Como se puede ver en la figura 4-2*b* y *d*, e_f es la suma de la elongación uniforme y de la elongación en la estricción. De esta forma, es sensible a la longitud calibrada: una longitud calibrada más corta hará que el mismo material parezca tener una elongación mayor. Por esta razón, la longitud calibrada se debe indicar siempre; de otra forma, la elongación total —un indicador del control de calidad que se puede medir fácilmente— perdería su significado. En este libro, a menos que se indique lo contrario, la elongación (abreviada: el.) siempre se mide sobre una longitud calibrada de 50 mm (o lo que es prácticamente lo mismo, 2″), donde el efecto de dicha longitud es menor para especímenes de geometría estándar.

Ejemplo 4-3

Se trazaron marcas a cada 5 mm sobre una probeta de ensayo con una longitud calibrada estándar de 50 mm, y 9.5 mm de diámetro de acero laminado en caliente 1018. Después del ensayo hasta la fractura, el cambio en longitud se midió sobre diferentes longitudes calibradas, siempre incluyendo las porciones de estricción y fractura. La elongación se calculó por medio de la ecuación (4-9*b*):

l_0, mm	l_1, mm	e_f	el., %
15.0	22.8	0.52	52.0
25.0	36.7	0.468	46.8
50.0	63.5	0.27	27.0

Evidentemente, la elongación siempre se debe indicar con referencia a la longitud calibrada.

Reducción de área La medida más sensible de la ductilidad de los materiales es la *reducción de área* medida en la fractura. Para entender esto, es necesario considerar el estado de esfuerzos.

Vimos que la deformación inicial es uniforme a lo largo de la longitud calibrada; en una probeta cilíndrica, el diámetro dentro de la longitud calibrada se hace uniformemente más pequeño (Fig. 4-5*a*). Puede parecer que hay esfuerzos de compresión que actúan en la dirección radial; sin embargo, éste no es el caso. El material simplemente obedece el principio de invariabilidad del volumen [ecuación (4-2)]: para compensar ante el incremento en longitud, la sección transversal de la probeta debe reducirse. El único esfuerzo que actúa es en la dirección axial (jalando): el estado de esfuerzos es el de *tensión uniaxial*.

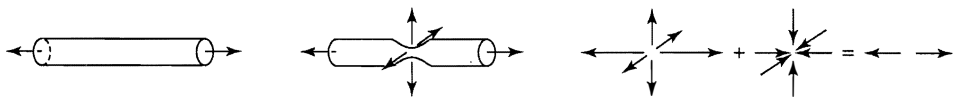


Figura 4-5 En el ensayo de tensión, el estado de esfuerzos es (*a*) uniaxial durante la extensión uniforme, pero (*b*) se hace triaxial en la zona de la estricción. La superposición de una presión hidrostática cancela la tensión triaxial y (*c*) suprime la formación de vacíos.

Todo esto cambia al inicio de la estricción. Ésta es la parte más débil de la probeta, de aquí que la deformación se concentre allí. Sin embargo, el material en la estricción no puede deformarse libremente porque el material adyacente no deformado ejerce una restricción. Esto provoca esfuerzos radiales de tensión; de esta forma, dentro de la estricción, el estado de esfuerzos cambia a *tensión triaxial* (Fig. 4-5*b*).

Los esfuerzos triaxiales de tensión literalmente rasgan el material. Primero se abren cavidades (vacíos) en el centro de la estricción. Al deformarse aún más, los vacíos se entrelazan casi en un plano perpendicular al eje. Una vez que la sección transversal anular remanente es insuficiente para soportar la carga, la probeta falla (Fig. 4-6). Se puede medir el área mínima de la sección transversal de la fractura de la probeta, A_f, y se puede calcular la reducción de área q (o RA) como

$$q = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \qquad \textbf{(4-10)}$$

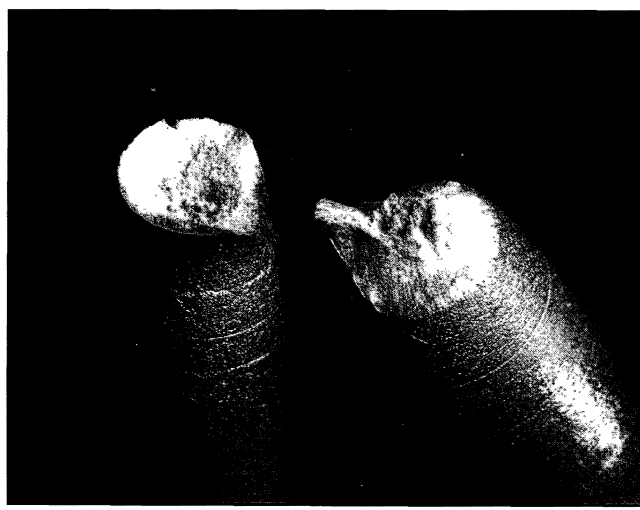


Figura 4-6 Un material dúctil experimenta deformación plástica antes y más allá de la estricción. La superficie fracturada presenta la formación y entrelazado de vacíos, así como una configuración característica de copa y cono.

Tenacidad El área bajo la curva esfuerzo-deformación unitaria tiene la dimensión de fuerza por distancia, es decir, *trabajo*. De esta forma se puede considerar como una medida de la *tenacidad*, es decir, la *energía absorbida por el material antes de la fractura*. Resulta evidente que los materiales dúctiles, tales como los aceros al bajo carbono y muchas aleaciones de aluminio y cobre, tienen una tenacidad mucho mayor que los materiales frágiles (Fig. 4-4).

Ejemplo 4-4

Ahora estamos listos para evaluar los resultados de un ensayo de tensión real. Una probeta de 6.35 mm de espesor y 6.38 mm de ancho se maquinó de una placa de aleación de 80Cu-20Ni. La longitud calibrada de $l_0 = 25$ mm se marcó ligeramente con un punzón. El ensayo se realizó en una máquina de pruebas con una capacidad de 10 000 kgf (98 kN), con un extensómetro colocado en la longitud calibrada. Se registró la curva que se muestra como una línea continua. Para obtener una resolución mejor en deformaciones bajas, la prueba se repitió con una ganancia 20 veces mayor en el eje de extensión (línea discontinua punteada) (Fig. 4-4). Las mitades de la probeta fracturada se reacomodaron, y la distancia entre las marcas fue $l_f = 40.2$ mm. La sección transversal fracturada fue de 2.85 × 3.50 mm. Calcule: (*a*) el módulo de Young; (*b*) $\sigma_{0.2}$; (*c*) TS; (*d*) el., y (*e*) RA.

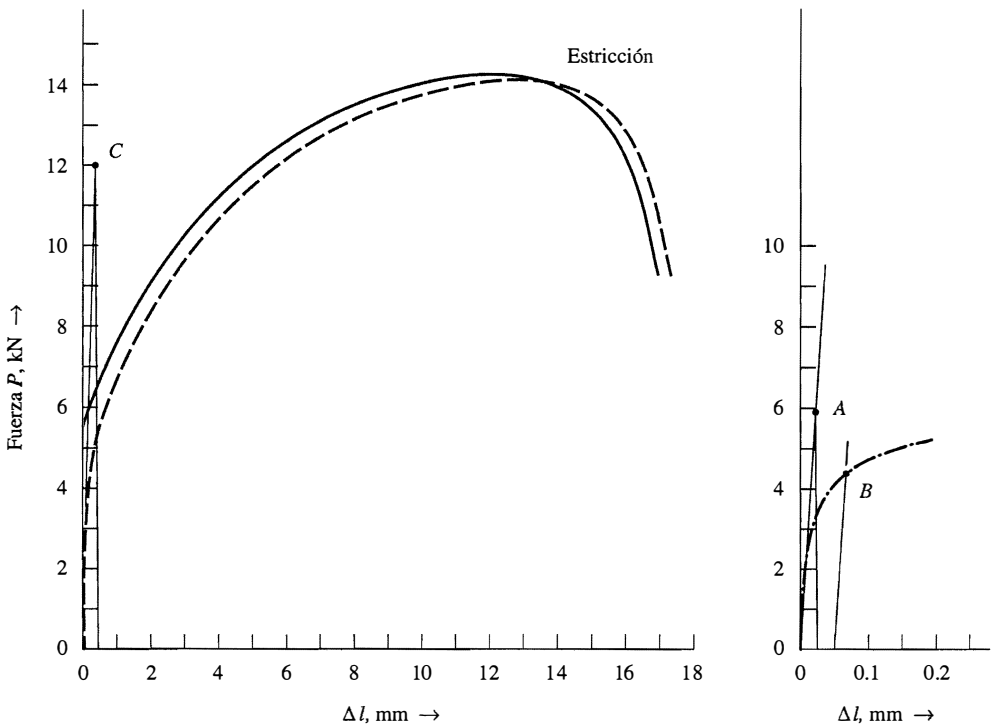


Figura ejemplo 4-4

(*a*) Para el módulo elástico, dibuje una línea recta a través del rango elástico; seleccione un punto conveniente. En el ejemplo elegido (punto *A*), $P = 5.7$ kN y $A_0 = (6.35)(6.38) = 40.5$ mm^2 $= 40.5(10^{-6})$ m^2. La extensión es $\Delta l = 0.025$ mm, de aquí $e_t = 0.025/25.0 = 0.001$. De la ecuación (4-6),

$$E = 5\,700/((40.5)(10^{-6})(0.001)) = 141 \text{ GPa}$$

Para el resto, es conveniente preparar una hoja para los cálculos repetitivos. Así, la hoja de cálculo puede servir como una plantilla para todos los ensayos de tensión. Constante: $l_0 = 25.00$ mm. Como los resultados del ensayo están en forma de una curva registrada, se necesitan encontrar:

(*b*) Para el límite de fluencia, la fuerza donde la deformación $e_t = 0.2\% = 0.002$. De la ecuación (4-4*a*), $\Delta l = 0.002(25.0) = 0.05$ mm. Para la curva discontinua punteada dibuje una línea desde este punto, paralela a la elástica. Ésta interseca el registro en el punto *B*, donde $P =$ 4.4 kN.

(*c*) Para la TS, se necesita la carga máxima: $P_{máx} = 14.2$ kN.

(*d*) Para la elongación, se usa $l_f = 42.2$ mm medida en la probeta. Del registro (línea continua) $(l_f - l_0) = 17.0$ mm y $l_f = 17.0 + 25.0 = 42$ mm, lo cual es ligeramente menor que la l_f medida porque el ajuste perfecto de las mitades rotas es difícil.

(*e*) La reducción de área se calcula por medio de los valores medidos. $A_f = 2.85 \times 3.5 =$ 9.975 mm^2.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Especif.	A_0	P0.002	YS	Pmáx	TS	l_f	el. (25 mm)	A_f	q
	mm^2	N	N/mm^2	N	Nmm^2	mm	%	mm^2	%
			Ec. (4-7)		Ec. (4-8)		Ec. (4-9b)		Ec. (4-10)
1	40.51	4 400	108.2	14 200	350.5	42.2	68.8	9.975	75.4

Siempre es aconsejable verificar los resultados con la información publicada. Para esta aleación, los manuales establecen, para un material suave, YS = 90 MPa, TS = 340 MPa, y el. = 40%. Así, la concordancia es aceptable, excepto que la elongación medida es mucho mayor. Sin embargo, note que las bases de datos se refieren a una longitud calibrada de 50 mm, mientras que en el *presente ensayo la longitud calibrada fue de sólo 25 mm* (véase ejemplo 4-3).

Ejemplo 4-5

Para explorar los efectos de la deformación de la máquina de prueba, se repitió el ensayo de tensión del ejemplo 4-4, pero esta vez el registro fue hecho a partir del movimiento del cabezal (línea discontinua). Calcule la constante de resorte del sistema.

Tomando un punto conveniente en, digamos, $\Delta l = 0.4$ mm (punto *C*), la fuerza es $P = 12.0$ kN. De esta forma, la constante de resorte general $K = P/\Delta l = 30$ kN/mm. La deformación elástica total es la suma de las deformaciones en la probeta y en la máquina; la contribución de cada una se puede calcular si la constante de resorte de la máquina es conocida o si se calcula la de la probeta.

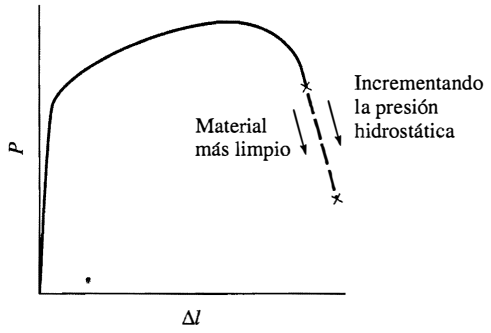


Figura 4-7 La deformación posterior a la estricción se puede incrementar (*a*) asegurando una mayor limpieza o (*b*) imponiendo presión hidrostática.

4-1-5 Aseguramiento del incremento de la ductilidad

La reducción del área, y por lo tanto la tenacidad, son muy sensibles a la condición del material y rara vez se dan en las especificaciones de éste. Sin embargo, son de gran importancia para el servicio y el procesamiento, y a menudo se hacen esfuerzos sustanciales para incrementar la ductilidad:

1. Se puede esperar que las cavidades se formen antes si hay puntos de debilidad en el material. Por lo tanto, uno de los objetivos principales del control de la manufactura es asegurar la *ausencia de defectos internos*. En la sección 6-3-4 se verá que las inclusiones pueden crear esos defectos, y que la *limpieza* es un requisito de primordial importancia para mejorar la ductilidad. Como se ve en la figura 4-7, la resistencia no se ve necesariamente afectada, pero la deformación posterior a la estricción (la cual determina la reducción en el área) se incrementa. Los materiales dúctiles muy limpios se pueden reducir hasta un punto antes de la separación, lo cual se llama entonces *ruptura.*

2. Si los esfuerzos de triaxiales tensión triaxial son responsables de abrir los puntos débiles, la fractura se puede retrasar superponiendo esfuerzos de compresión. Cuando los tres esfuerzos son iguales, se habla de *presión hidrostática.* Esto se puede lograr, por ejemplo, conduciendo el ensayo en un fluido presurizado. La superposición de la presión hidrostática neutraliza los esfuerzos de tensión (Fig. 4-5*c*), y la deformación continuará hasta deformaciones mayores (Fig. 4-7). En forma más amplia, esta observación lleva a un principio muy importante, aplicable tanto al servicio, como a la manufactura: la *fractura en una pieza se puede retrasar o prevenir si prevalece un estado de esfuerzos de compresión suficientemente alto.*

4-1-6 Efectos de muesca

Vimos que los defectos internos o inclusiones reducen la ductilidad de los metales. Aún más dañinos pueden ser los defectos superficiales, particularmente las muescas, que

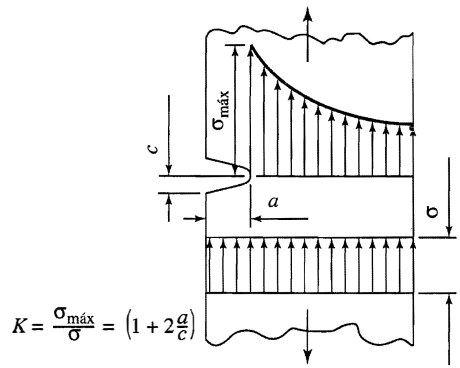


Figura 4-8 Una muesca en la superficie de un cuerpo resulta en un incremento agudo de los esfuerzos: causa concentración de esfuerzos.

causan *concentraciones de esfuerzos*, es decir, un incremento local en el esfuerzo hasta $\sigma_{máx}$. El *factor de concentración de esfuerzo* K es la razón de $\sigma_{máx}$ al esfuerzo σ que prevalecería en un cuerpo liso (Fig. 4-8), y puede alcanzar valores muy altos cuando el radio de la muesca es pequeño. Cuando el esfuerzo o la deformación unitaria máximos alcanzan algún valor crítico, se desarrolla una grieta y se propaga a velocidad elevada a través de la pieza. De esta forma, la presencia de grietas en la superficie o el interior del cuerpo puede reducir mucho el esfuerzo de tensión que un material puede soportar sin fracturarse. Se puede demostrar que este *esfuerzo de fractura* σ_{fr} depende del radio de la grieta r_c y de la profundidad de la misma (longitud de la grieta) a como

$$\sigma_{fr} = \left(C \frac{r_c}{a} \right)^{1/2} \qquad \textbf{(4-11a)}$$

donde C es una constante del material. Para materiales verdaderamente frágiles, r_c está en el orden de radios atómicos; entonces la ecuación (4-11a) se reduce al *criterio de Griffith*

$$\sigma_{fr} = \left(C \frac{1}{a} \right)^{1/2} = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right)^{1/2} \qquad \textbf{(4-11b)}$$

donde γ_s es la energía superficial de las superficies de las grietas. Las grietas tienden a una distribución aleatoria; así que, todas las propiedades mecánicas influidas por las grietas u otros concentradores de esfuerzos, también están sujetas a la dispersión. Es necesario conducir ensayos repetidos y tratar los resultados por métodos estadísticos.

4-1-7 Ensayos de flexión

Con frecuencia los materiales frágiles se usan en situaciones en que los esfuerzos de tensión se aplican ya sea en tensión pura o en flexión. El ensayo en la tensión es difícil porque la desalineación más ligera en las quijadas impone flexión, la cual incrementa

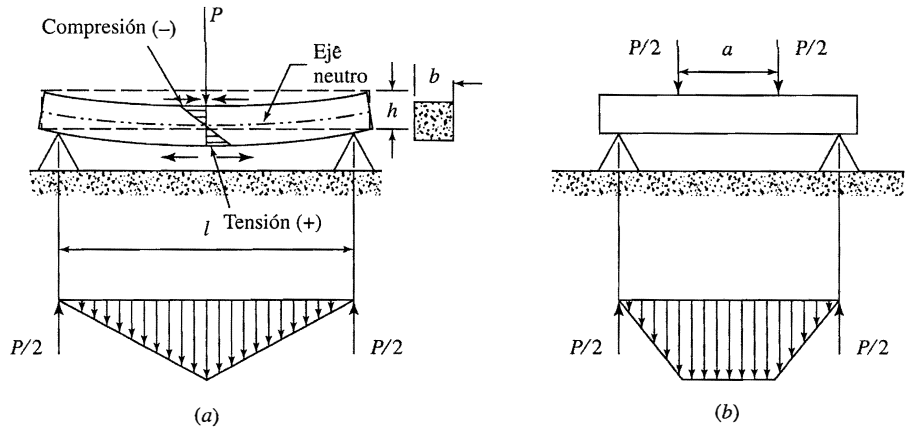


Figura 4-9 Los materiales menos dúctiles a menudo se someten a ensayos de flexión de (*a*) tres puntos o (*b*) cuatro puntos. Los esfuerzos de tensión tienen un pico en el centro en el ensayo de tres puntos, pero se distribuyen de manera uniforme entre los dos puntos de carga en el ensayo de cuatro puntos.

los esfuerzos en una manera desconocida. Existen quijadas especialmente diseñadas que facilitan los ensayos de probetas preparadas con mucho cuidado, pero muchos ensayos aún se conducen en flexión pura (Fig. 4-9).

La probeta es soportada en dos puntos (ASTM F417). En el *ensayo de tres puntos* (Fig. 4-9*a*) se aplica una fuerza P en el centro. La probeta se flexiona, y la mitad exterior (inferior) se pone en tensión, mientras que la mitad interior se pone en compresión. Los esfuerzos de tensión alcanzan su máximo en la superficie exterior, a medio camino entre los soportes. La falla (fractura) ocurre cuando el esfuerzo de tensión máximo alcanza un valor crítico, a menudo llamado *resistencia a la ruptura* (o *resistencia a la flexión* o *módulo de ruptura*). Para una viga rectangular

$$\sigma_B = \frac{3}{2}\frac{Pl}{bh^2} \qquad \textbf{(4-12a)}$$

Para una probeta redonda

$$\sigma_B = \frac{8Pl}{\pi d^3} \qquad \textbf{(4-12b)}$$

De manera alterna, se proporciona la deflexión para una carga dada (o carga para una deflexión específica).

El *ensayo de cuatro puntos* (Fig. 4-9*b*) genera esfuerzos de tensión uniformes entre los puntos de carga. Si $a = l/3$, el módulo de ruptura para una probeta rectangular es

$$\sigma_B = \frac{Pl}{bh^2} \qquad \textbf{(4-12c)}$$

Los materiales menos dúctiles, tales como algunas aleaciones, la mayoría de los cerámicos y muchos polímeros con carga, pueden tener defectos diminutos, grietas en

la superficie o en el cuerpo de la probeta (Secc. 4-1-6). La resistencia a la ruptura es entonces una función del método de ensayo, y es más alta y muestra la mayor dispersión en la flexión de tres puntos, ya que hay una remota probabilidad de un defecto en el punto del esfuerzo máximo. La distribución uniforme del esfuerzo en el ensayo de cuatro puntos hace más probable que se encuentre un defecto, de aquí que la resistencia a la ruptura sea más baja pero más consistente. Note que la resistencia a la ruptura no es igual a la resistencia a la tensión.

Ejemplo 4-6

Un cerámico de alta tecnología (nitruro de silicio prensado en caliente, Si_3N_4) se ensayó flexionando especímenes de 3.2 mm de espesor y 6.4 mm de ancho cargados sobre un claro de 38 mm. La fractura ocurrió en una carga de 1 070 N en la flexión de tres puntos, y en 1 250 N en la de cuatro puntos. Calcule el esfuerzo máximo en cada caso.

De la ecuación (4-12*a*), ensayo de tres puntos $\sigma_B = 3(1\,070)(38)/(2)(6.4)(3.2)^2 = 930$ MPa.

De la ecuación (4-12*c*), ensayo de cuatro puntos $\sigma_B = (1\,250)(38)/(6.4)(3.2)^2 = 725$ MPa.

En la sección 12-1-2 se verá que casi todos los cerámicos tienen imperfecciones diminutas, como grietas en la superficie. La probabilidad de encontrar una de esas grietas se incrementa con el aumento de la longitud sobre la cual se aplica un esfuerzo elevado, de aquí que la resistencia medida sea menor en la flexión de cuatro puntos que en la de tres. (Los datos para este ejemplo se tomaron de D.W. Richerson, *Modern Ceramic Engineering*, Dekker, 1982.)

4-2 ENERGÍA DE IMPACTO Y TENACIDAD A LA FRACTURA

En la sección 4-1-4 se mencionó que algunas veces se usa la energía por unidad de volumen como una medida de la tenacidad. Sin embargo, se ha determinado que algunos materiales normalmente dúctiles y tenaces sufren fractura frágil cuando están en la forma de una probeta o componente muescado y se someten a una carga repentina (fuerza de impacto), sobre todo por debajo de una *temperatura de transición de dúctil a frágil*. Esto puede ser un problema, por ejemplo, en el servicio a bajas temperaturas de estructuras soldadas como barcos, plataformas de perforación y tuberías que pueden tener defectos planos en la soldadura y también esfuerzos residuales.

Existen varios *ensayos de impacto* (ASTM E32); en cada uno se emplean diferentes geometrías de ensayo y métodos de carga. En el ensayo de impacto se aplica una carga repentinamente, por ejemplo, por medio de un péndulo oscilante (Fig. 4-10*a*). La energía de impacto absorbida por la probeta (la energía perdida del péndulo) se reporta (en unidades de joules). En la temperatura de transición, la energía absorbida baja más o menos de forma repentina. También, la apariencia de la superficie de fractura cambia.

En la figura 4-10*b* se nota que la probeta de impacto está muescada, estableciendo de esta forma una concentración de esfuerzo (Secc. 4-1-6) para hacer el ensayo más severo. Debido a la gran sensibilidad de los resultados del ensayo de impacto a la geometría y preparación de la probeta, la energía de impacto que se proporciona es sólo un valor comparativo entre materiales probados en condiciones idénticas. Esto representa un indicador del control de calidad muy útil pero no se puede usar para propósitos de cálculos de diseño.

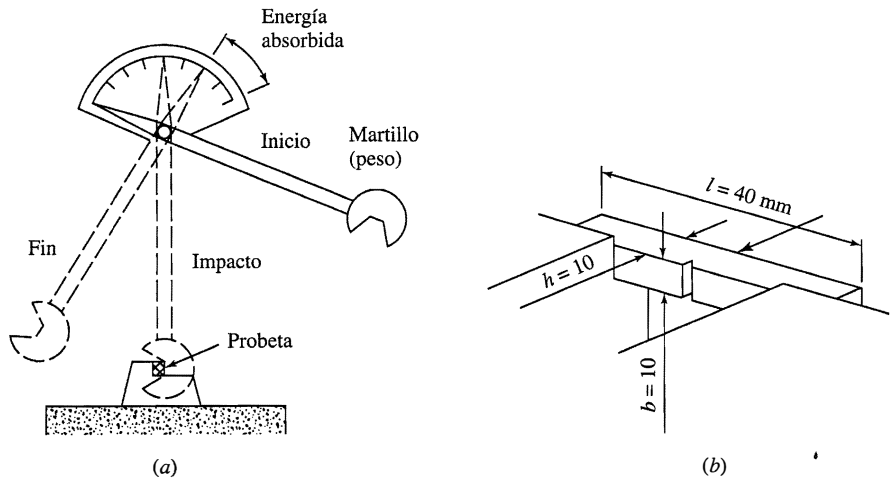


Figura 4-10 (*a*) El ensayo de impacto de Charpy es uno de los ensayos para determinar la tenacidad a la fractura de un material; (*b*) para inducir una concentración de esfuerzos, la probeta se muesca.

En un sistema de un material dado, por lo general la resistencia más alta se puede obtener sólo a costa de la ductilidad y, de esta forma, se incrementa la sensitividad a la fractura frágil. Esto es válido, por ejemplo, en las aleaciones de aluminio usadas en la construcción de aeronaves y en los aceros de más alta resistencia. La necesidad de diseñar con este peligro en mente ha conducido al desarrollo del enfoque de la *mecánica de fractura elástica lineal*. Se usan ensayos especiales (ASTM E813) para determinar la *tenacidad a la fractura en el plano de deformación* K_{Ic},

$$K_{Ic} = \alpha\sigma\sqrt{\pi a_c} \qquad \textbf{(4-13)}$$

donde α es un factor que depende de la geometría de la probeta y de la grieta; σ es el esfuerzo o una función de campo del esfuerzo, y a_c es la longitud crítica de la grieta debajo de la cual no ocurrirá la fractura. De esta forma, una estructura se puede diseñar con el esfuerzo permisible si la longitud probable de la grieta se conoce, o se puede especificar la longitud máxima permisible de la grieta para un esfuerzo de diseño dado.

En la sección 4-1-5 se analizó que la ductilidad se puede incrementar removiendo defectos internos o imponiendo un estado de esfuerzo de compresión. Los mismos principios se aplican para aumentar la tenacidad a la fractura. Las grietas y muescas pueden ser un problema en todos los materiales, excepto en los más dúctiles, y uno de los objetivos de los procesos de manufactura es *prevenir la formación de grietas*. Si esto no es posible, las *grietas se deben mantener en compresión* durante el servicio de la parte. Ello se puede lograr por medio de un diseño que permita sólo cargas de compresión, o por procesos de manufactura que induzcan esfuerzos residuales de compresión en la superficie de la parte (Secc. 4-7).

Ejemplo 4-7

Durante la Segunda Guerra Mundial se construyó un gran número de barcos de transporte (los barcos "Liberty"). La estructura remachada tradicional se abandonó a favor de la soldada, acelerando la tasa de producción. De los más de 2 700 barcos construidos, cerca de 24 tuvieron agrietamientos serios y alrededor de una docena se partieron en dos en las frías aguas del Atlántico Norte. Las fracturas fueron del tipo frágil, aunque el acero era dúctil en los ensayos de tensión e impacto a temperatura ambiente. La investigación de las causas del problema ayudó mucho para aclarar la transición de dúctil a frágil y ha dado como resultado la especificación y manufactura de aceros con energías de impacto garantizadas a temperaturas bajas.

4-3 COMPRESIÓN

Por razones que se explicarán más adelante, algunos materiales como el hierro fundido gris y el concreto son débiles en tensión, pero resistentes en compresión (en contraste, algunos materiales compuestos son más débiles en compresión). Cuando el diseño de la estructura asegure que sólo se impondrán cargas de compresión, el *ensayo de compresión* (ASTM E9) será más relevante.

De nuevo, el equipo de prueba es una prensa (o una máquina universal de ensayos), esta vez configurada de manera que la probeta se comprime entre dos platinas endurecidas, bien lubricadas, planas y paralelas. Las deflexiones elásticas en la prensa y las herramientas causarían errores importantes, por lo tanto, la deformación de la probeta se mide entre las platinas (Fig. 4-11*a*). De nuevo se aplica el principio de la invariabilidad del volumen [ecuación (4-2)]: el área de la sección transversal de la probeta (perpendicular a su eje) se debe incrementar para compensar por la disminución de la altura. Así, la fuerza registrada se incrementa no sólo debido al endurecimiento por deformación (si está presente), sino también por el aumento del área de la sección transversal (Fig. 4-11*b*). El área instantánea de la sección transversal A se puede calcular por medio de la altura instantánea h que se obtiene de la salida del transductor de desplazamiento ($h = h_0 - \Delta h$).

$$A = \frac{A_0 h_0}{h} = \frac{V}{h} \tag{4-14}$$

En cualquier punto de la carrera de la prensa, la *presión de la matriz* p es la fuerza dividida entre el área; en la sección 9-2-1 se analiza que, *si los efectos de la fricción son despreciables*, el estado de esfuerzo es de compresión uniaxial, y la presión de la matriz es igual a la *resistencia a la compresión* (real).

$$\sigma = \frac{P}{A} \tag{4-15}$$

La *deformación unitaria por compresión* de ingeniería es

$$e_c = \frac{h_0 - h}{h_0} = \frac{A - A_0}{A} \tag{4-16}$$

Note que *la deformación unitaria por compresión que se define de esta forma es numéricamente diferente de la deformación unitaria por tensión equivalente.*

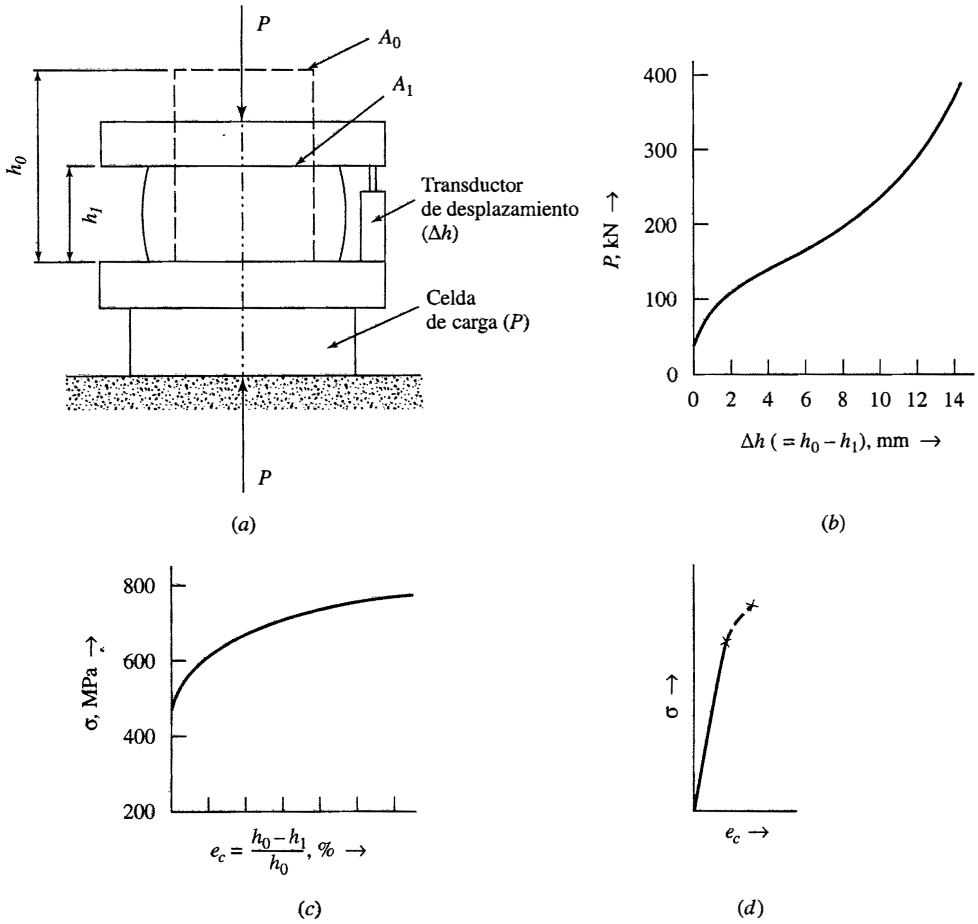


Figura 4-11 En (*a*) los ensayos de compresión, el área de la sección transversal se incrementa continuamente, por lo tanto, (*b*) la fuerza registrada se eleva aun si el material no se endurece con la deformación. (*c*) La curva esfuerzo-deformación unitaria derivada en este ejemplo presenta endurecimiento por deformación. (*d*) Los materiales frágiles se fracturan después de la compresión elástica inicial, aunque algunas veces se observa alguna deformación plástica (línea discontinua).

Ejemplo 4-8

En lo que al material concierne, el alargamiento de una probeta de una longitud de $l_0 = 30$ mm a una longitud de $l_f = 60$ mm es lo mismo que comprimir de $h_0 = 60$ mm a $h_f = 30$ mm. Calcule las deformaciones unitarias por tensión y por compresión.

De la ecuación (4-4*b*), $e_t = [(60 - 30)/30]100 = 100\%$.

De la ecuación (4-16), $e_c = [(60 - 30)/60)]100 = 50\%$.

El problema se resuelve si se usan deformaciones unitarias reales (Secc. 8-1-1).

Por medio de la medición de la fuerza y desplazamiento (Fig. 4-11*b*) se puede graficar una curva esfuerzo-deformación unitaria (Fig. 4-11*c*).

Ejemplo 4-9

El registro que se muestra en la figura 4-11*b* se hizo comprimiendo, a temperatura ambiente, un cilindro de acero AISI 1020 laminado en caliente de 15.00 mm de diámetro y 22.5 mm de alto. Para reducir la fricción se usó grasa grafitada. Las lecturas de la fuerza P en seis puntos se dan abajo junto con las alturas instantáneas h. Calcule el esfuerzo real σ y la deformación por compresión e_c.

De nuevo es mejor preparar una hoja de cálculo. El volumen de la probeta es $V = (15.0^2\pi/4)(22.5) = 3\,976\ \text{mm}^3$.

A	B	C	D	E	F	G
Punto núm.	h	P	A_0	sigma	e_c	épsilon
	mm	kN	mm^2	N/mm^2	%	
			Ec. (4-11)	Ec. (4-12)	Ec. (4-13)	Ec. (8-3)
0	22.5		177			
1	20.5	115	194	593	8.9	0.09
2	17.5	158	227	695	22.2	0.25
3	14.5	200	274	729	35.6	0.44
4	12.5	235	318	739	44.4	0.59
5	10.5	290	379	766	53.3	0.76
6	8.5	370	468	791	62.2	0.97

La gráfica resultante se da en la figura 4-11*c*. Note que no hay disminución en el esfuerzo, puesto que no existe estricción.

Rara vez se permite que los componentes o estructuras de ingeniería se deformen de manera sustancial, por lo tanto, el esfuerzo de compresión que corresponde a alguna deformación pequeña (digamos, 0.2% o 0.5%) comúnmente se toma como la base del diseño. En una compresión posterior, la probeta puede asumir la forma de un barril. El estado de esfuerzos cambia y el esfuerzo calculado por medio de la ecuación (4-15) ya no es una resistencia real a la compresión.

Como los esfuerzos de compresión mantienen unido al material (Secc. 4-1-5), podría parecer que la deformación debe continuar de manera indefinida, pero la fractura aún es posible:

1. El abarrilamiento en la presencia de fricción genera esfuerzos de tensión en la superficie, y se desarrollan grietas si el material tiene ductilidad limitada (véase la Secc. 9-2-4).

2. Tarde o temprano, la ductilidad de muchos materiales se agota y empieza la fractura (Fig. 4-11*d*), con frecuencia en una diagonal a 45°. De nuevo, la fractura se puede retrasar imponiendo presión hidrostática.

3. Los materiales frágiles fallan en forma repentina al alcanzar un esfuerzo crítico.

Ejemplo 4-10

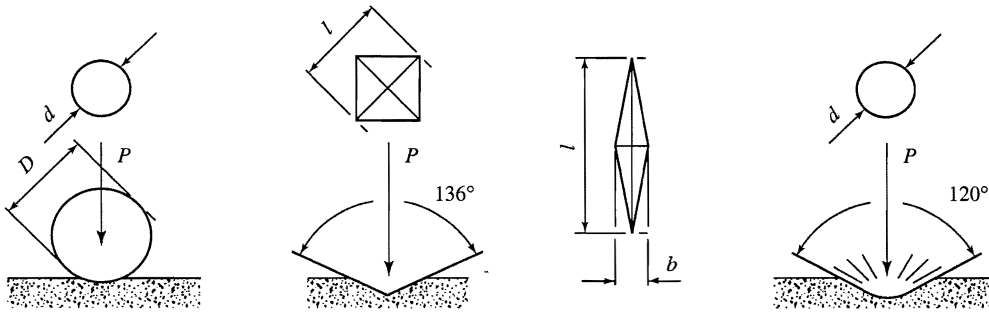
La importancia de la presión hidrostática fue reconocida hace más o menos 80 años. Los ensayos en fluido presurizado han demostrado que la ductilidad de la mayoría de los metales se incrementa casi en forma lineal. Una transición más súbita del comportamiento frágil al dúctil es común en el hierro fundido gris; por lo tanto, es necesario rodear a la probeta en una camisa de caucho para prevenir la penetración del fluido presurizado en las grietas superficiales. Una aleación frágil de Zn-5Al (similar a la que se muestra en la Fig. 4-4*b*) se deforma plásticamente con una reducción de casi 100% del área cuando la presión se eleva a 130 MPa.

4-4 DUREZA

La resistencia de un material a la deformación se ensaya mejor por medio de la indentación (Fig. 4-12). Por razones que se darán en la sección 9-2-2, la probeta debe ser lo suficientemente grande para mantener la deformación muy localizada, de manera que el indentador empuje el material desplazado alrededor de la indentación *pero no deforme todo el espesor de la probeta.* Una gran ventaja es que una indentación local relativamente pequeña puede ser permisible aun en una pieza ya completa; así no hay necesidad de destruir la parte para obtener una lectura. Los ensayos están estandarizados, así como la geometría y dimensiones del indentador, la magnitud de la carga aplicada y la velocidad de la aplicación de la carga.

1. En *el ensayo de dureza Brinell* (ASTM E10) el indentador es una esfera (Fig. 4-12*b*) de acero (o, para materiales más duros, de carburo de tungsteno). Después que la carga se aplica, se mide el diámetro medio de la impresión. La fuerza dividida entre el *área de la superficie* de la indentación proporciona el *número de dureza Brinell* (HB o BHN), el cual se da en las viejas unidades métricas de kg/mm^2. Como el área de la superficie no es una función lineal del diámetro de la impresión, hay tablas disponibles para simplificar su cálculo. Las indentaciones muy profundas se deben evitar; de aquí que la carga se reduce para materiales más suaves con el fin de mantener el diámetro de la indentación entre 2.50 y 4.75 mm.

Fundamentalmente, es más correcto el *ensayo de dureza Meyer* (Fig. 4-12*a*), en el que la carga sobre la bola se divide entre el *área proyectada* de la indentación; por desgracia, el ensayo no se ha hecho popular.



(*a*) (*b*) (*c*) (*d*)

	Carga P, kg	Rango HB		P, kg		P, kg		P, kg
Brinell	3 000	160-600	Vickers	1-120	Knoop	0.025-5	Rockwell A	60
($D = 10$ mm)	1 500	80-300					C	150
	500	26-100					D	100
Rockwell E ($D = \frac{1}{8}$ in)	100							
Rockwell B ($D = \frac{1}{16}$ in)	100							
F	60							
G	150							
Meyer	(cualquiera)							

Figura 4-12 Los ensayos de dureza tienen la ventaja de que la información sobre la resistencia a la compresión se puede obtener por medio de la deformación localizada, sin destruir la pieza de trabajo.

2. Las impresiones hechas por una pirámide (Fig. 4-12*b*) siguen siendo geométricamente similares, independientes de la carga, por lo que se pueden usar para un rango amplio de durezas. En el *ensayo de dureza Vickers* (ASTM E92) el número de la dureza (HV o VHN, en kg/mm^2) se obtiene, una vez más, dividiendo la fuerza entre el área de la superficie, calculada desde la diagonal de la impresión.

3. Los *ensayos de microdureza* (ASTM E384) se usan para explorar variaciones localizadas en la dureza dentro de un cuerpo y cerca de sus bordes. Las cargas tienen que ser muy pequeñas, de ahí que la superficie debe ser preparada por pulimento, teniendo cuidado de no causar una deformación local, lo cual incrementaría la dureza. En el *ensayo de Knoop* (Fig. 4-12*c*), la dureza se calcula desde la diagonal larga de la indentación. Debido a la recuperación elástica ante cargas bajas, la dureza (HK, en unidades de kg/mm^2) no es una función lineal de la diagonal.

4. Para propósitos de control de calidad, el *ensayo de dureza Rockwell* (ASTM E18) es el que más se utiliza debido a la conveniencia del aparato de ensayo. El indentor es una esfera de acero o un cono de diamante (Fig. 4-12*a* y *d*). Después de hacer una precarga para minimizar los efectos de la rugosidad superficial, se aplica la carga principal. El aparato mide en forma automática la profundidad de la indentación y proporciona una lectura en escalas arbitrarias, de las cuales las escalas A, B y C son las que más se utilizan (se reportan como HRA, HRB, HRC, etcétera). Es posible la conversión a otras unidades, sobre todo para materiales de bajo endurecimiento por deformación,

tales como los aceros tratados térmicamente. Las tablas de conversión se encuentran en la norma ASTM E140 y en manuales; en el apéndice A se proporciona un nomograma.

5. La dureza de partes grandes se puede medir con un escleroscopio (ASTM E448), un instrumento portátil que relaciona la dureza con el rebote de un peso pequeño (martillo) que se deja caer desde una altura estándar; se coloca un indentador de diamante en el martillo.

6. La dureza de los materiales frágiles se mide en un *ensayo de rayado* comparativo y se reporta en la escala de Mohs, la cual se basa en la resistencia al rayado de inerales selectos (véase el apéndice A).

7. Como los elastómeros recuperan su forma después de la descarga, su dureza se mide con un *durómetro* por medio de la indentación con una carga específica.

Por razones que se explican en la sección 9-2-2, la dureza de los materiales es aproximadamente 3 veces el valor de su TS (*pero sólo si ambos se expresan en unidades concordantes*). La relación funciona mejor para materiales de bajo endurecimiento por deformación (tales como los aceros tratados térmicamente) y para la HV, en menor proporción que para la HB.

Ejemplo 4-11

Una barra de acero estirado en frío tiene una dureza Brinell de HB = 190. ¿Qué TS se debe esperar?

$$TS = 190/3 = 63.3 \text{ kg/mm}^2 = 620 \text{ N/mm}^2$$

Convirtiendo a unidades convencionales, se obtiene 620 N/mm^2 = 90 kpsi = 90 000 psi. De aquí la conversión conveniente: multiplique HBN por 500 para obtener TS (psi).

Ejemplo 4-12

Un rodillo grande de un tren de laminación debía ser tratado térmicamente hasta una dureza de HRC-55. ¿Cómo se podría verificar si se hizo así?

El rodillo es demasiado grande para colocarlo en un probador de dureza Rockwell y de él no se puede cortar una probeta. Por lo tanto, se usa un escleroscopio Shore Modelo C, el cual da una lectura de 78. A partir de tablas de conversión disponibles en muchos manuales o en el apéndice B, esto corresponde a HRC 58, así que por supuesto que se ha llevado a cabo el tratamiento térmico.

4-5 FATIGA

En muchos casos, los materiales se someten a repetidas aplicaciones de carga. Aunque cada suceso individual de carga es insuficiente para causar una deformación permanente, y menos la fractura, la aplicación repetida del esfuerzo puede provocar la *falla por*

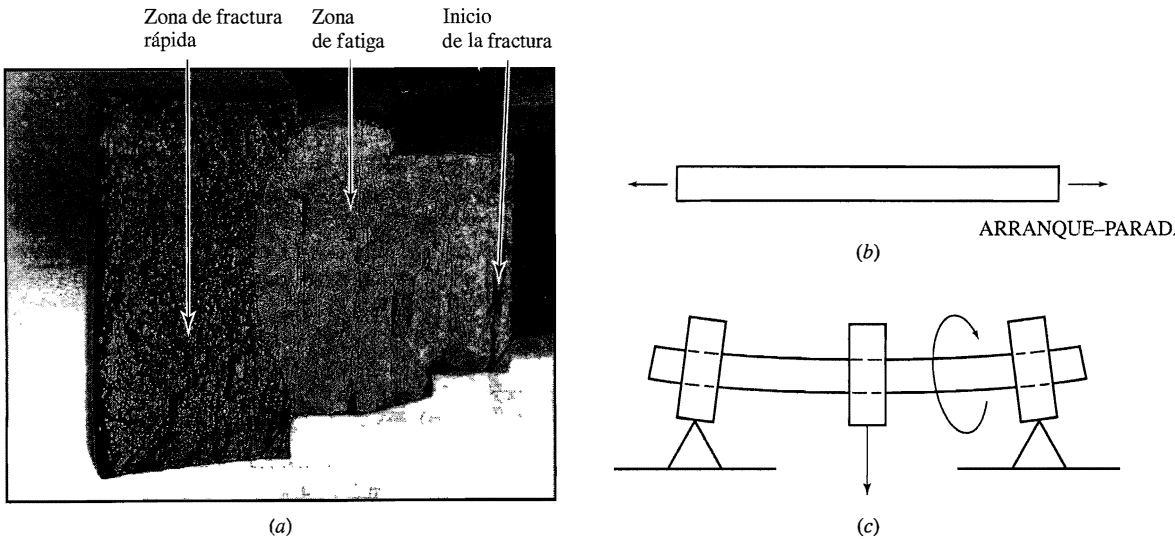


Figura 4-13 La aplicación repetida de incluso esfuerzos relativamente pequeños puede provocar fatiga; (*a*) la superficie fracturada presenta evidencia de la iniciación y propagación de grietas. Los materiales se ensayan sometiendo las probetas a (*b*) tensión cíclica, tensión y compresión, o (*c*) flexión en rotación. El ejemplo que se muestra es un anillo de sello de acero de alta resistencia, sometido a una presión interna fluctuante. (*Cortesía del Dr. D.J. Burns, University of Waterloo.*)

fatiga. La fatiga es el resultado del daño acumulado, causado por esfuerzos mucho menores que la resistencia a la tensión. La falla por fatiga comienza con la generación de grietas pequeñas, invisibles a simple vista, las cuales se propagan luego por repetición de la carga hasta que ocurre la fractura frágil o el área de la sección transversal remanente es demasiado pequeña para soportar la carga. Las superficies fracturadas presentan evidencia de esta secuencia de eventos (Fig. 4-13*a*).

La conveniencia de un material se puede juzgar por medio de experimentos (ASTM E206), en los que una probeta se somete a un nivel prefijo de esfuerzo S hasta que ocurre la fractura después de N ciclos (Fig. 4-13*b* y *c*). Los resultados se reportan en diagramas de fatiga o diagramas S-N (Fig. 4-14*a*). En algunos entornos, los materiales como el acero pueden soportar en forma indefinida algún nivel de esfuerzo mínimo, conocido como *límite de fatiga* o *límite de durabilidad.* Sin embargo, es mejor especificar el esfuerzo que se puede soportar para un número dado (digamos, dos millones) de ciclos.

Como la fatiga involucra la propagación de grietas bajo un esfuerzo de tensión impuesto, el número de ciclos hasta la falla (o el esfuerzo soportado para un número de ciclos dado) se reduce mucho si existen grietas preexistentes (Fig. 4-14*a*), defectos internos o inclusiones de naturaleza frágil. La rugosidad superficial que se produce en algunos procesos actúa en forma similar, por ello, la resistencia a la fatiga se reduce si la superficie es rugosa, sobre todo en materiales de resistencia elevada que son menos dúctiles (Fig. 4-14*b*).

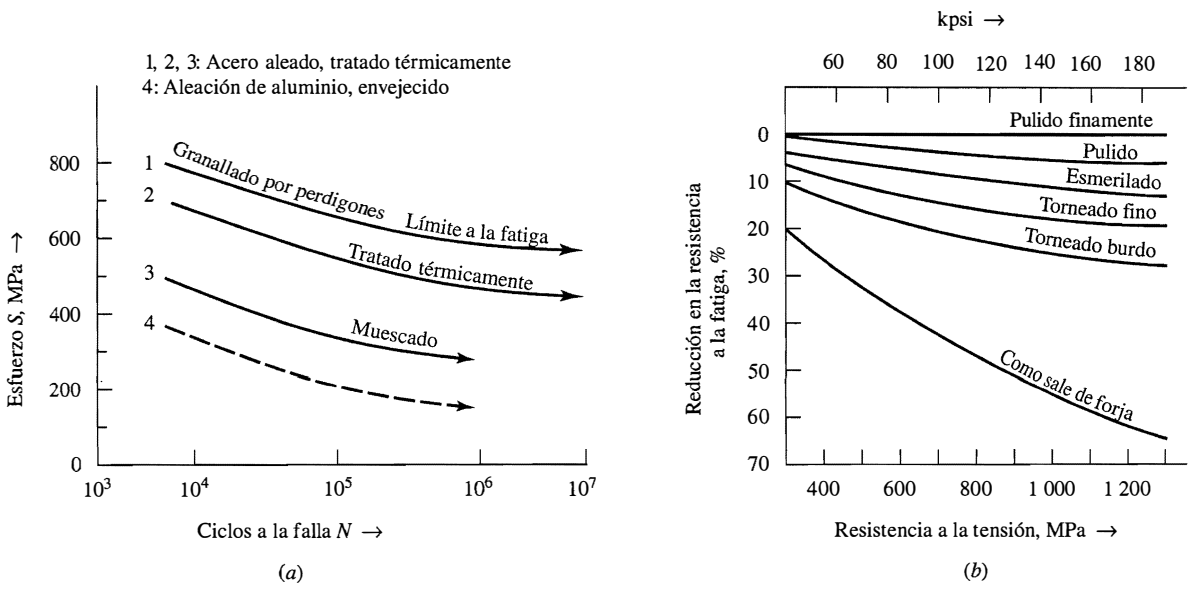


Figura 4-14 Con el incremento del número de ciclos de carga, (*a*) baja el esfuerzo en el cual ocurre la fractura, aunque algunos materiales presentan una vida indefinida en algún nivel de esfuerzo, el denominado límite de fatiga o límite de durabilidad. La resistencia a la fatiga se ve muy afectada por la presencia de grietas superficiales o muescas, y (*b*) incluso por una superficie rugosa. [(*a*) *De varias fuentes;* (*b*) *de E.S. Burdon, SCRATA Proceedings 1968 Annual Conference, Steel Castings Research and Trade Association, London, 1968, Paper No. 3, se reproduce con autorización.*]

Las cargas repetidas a temperaturas elevadas —como las causadas por la expansión y la contracción diferencial de la superficie de una parte— pueden causar la *fatiga térmica*, la cual es muy problemática en herramientas de forja, matrices de fundición y moldes para vidrio, porque el agrietamiento (cuarteamiento) se reproduce sobre la superficie de la pieza.

Una forma especial de falla ocurre cuando ciertos materiales se exponen a un entorno químicamente agresivo (corrosión). Se forman grietas, y en combinación con el esfuerzo aplicado, se provoca el *agrietamiento por esfuerzo-corrosión*. Si existen esfuerzos de tensión residuales sobre la superficie de la parte (como en la Fig. 4-18), las grietas se desarrollan aún en la ausencia de cargas externas.

Debido a la dispersión de los datos (Secc. 4-1-6), la vida a la fatiga y el esfuerzo limitante con frecuencia se expresan como probabilidades.

Ejemplo 4-13

El primer avión comercial propulsado a chorro fue el Comet Británico. Dos aviones se desintegraron en vuelo, con la pérdida de la vida de todas las personas abordo. Se sospechó de la falla por fatiga debida a esfuerzos cíclicos alrededor del fuselaje generados por la presuración repetida de la cabina. Por lo tanto, un fuselaje completo, el cual había pasado por 1 230 vuelos, se

sumergió en agua en un tanque de prueba y se sometió a ciclos de presión. Después de 1 830 ciclos, la cabina falló debido a las grietas por fatiga que crecieron en las esquinas de las ventanas de la cabina. La lección se aprendió muy bien; desde entonces se han hecho grandes avances en la ciencia del diseño con materiales de tenacidad a la fractura limitada, así como en métodos de manufactura para mejorar la tenacidad a la fractura.

No obstante, los aviones aún se inspeccionan de modo regular en busca de evidencias de grietas. Las naves se diseñan de manera que las grietas demasiado pequeñas detectadas en una inspección no crezcan demasiado rápido y provoquen una falla catastrófica antes de la próxima revisión. (Datos tomados de J.K. Williams, en *Fatigue Design Procedures*, E. Gassner y W. Schutz (eds.), Pergamon, Oxford, 1969.)

4-6 PROPIEDADES A TEMPERATURA ELEVADA

Se espera que muchos componentes funcionen a temperaturas elevadas. Nuestra percepción de la temperatura está condicionada por nuestra propia respuesta a ella; en forma similar, hay una escala de temperatura para cada material, la cual es mucho más relevante que cualquiera de las nuestras. Usando una raíz griega (*homos* = lo mismo, *legin* = hablar) esto se denomina escala de *temperatura homóloga*, lo que significa que corresponde a puntos de relevancia específicos para cada material. Uno de los puntos es el cero absoluto, el otro es el punto de fusión T_m (expresado en kelvins). Debajo de aproximadamente $0.5T_m$, la mayoría de los metales (y muchos polímeros termoplásticos) presentan un comportamiento "frío" (Fig. 4-15): la resistencia es alta, la ductilidad es relativamente baja. Arriba de $0.5T_m$, comúnmente presentan propiedades "calientes": la resistencia es menor, la ductilidad es mayor. Puede ocurrir una deformación sustancial después de la estricción, cuando ésta se difunde sobre toda la longitud de la probeta (Fig. 4-16). Las razones estructurales de este comportamiento se harán evidentes en la sección 8-1-5 para los metales, y en la sección 13-2-4 para los polímeros. Aquí se debe notar que $0.5T_m$ es una línea de división muy aproximada; las aleaciones de metales y los cambios en la estructura de los polímeros pueden retrasar el inicio del comportamiento caliente hasta temperaturas mucho más elevadas. No obstante, en algunos plásticos la transición al comportamiento caliente puede ocurrir debajo de la temperatura ambiente, mientras que se necesitan temperaturas muy elevadas para inducir ductilidad en los cerámicos (Cap. 12).

En este momento es importante tomar nota de que la deformación en el rango de temperatura caliente involucra un reacomodo sustancial de los átomos (en los metales) o de las moléculas (en los polímeros). Estos procesos toman tiempo, así que las propiedades también son una función de la velocidad de aplicación de la carga o, en forma más correcta, de la *velocidad de deformación* $\dot{\varepsilon}$ impuesta, la cual en el ensayo de tensión es simplemente

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{l} \qquad \textbf{(4-17)}$$

donde v es la velocidad del cabezal (véase Fig. 4-1) y l es la *longitud instantánea de deformación* (la longitud calibrada antes de la estricción, pero *la longitud de la porción*

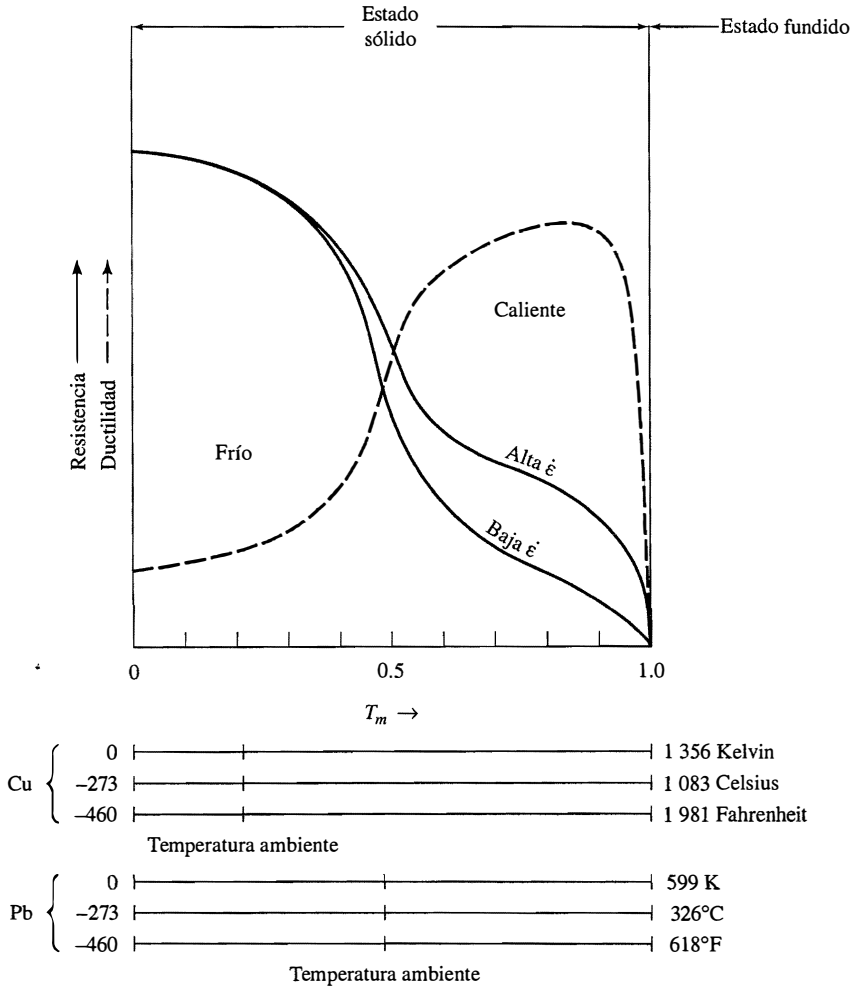


Figura 4-15 Los materiales, como los metales, tienen su propia escala de temperatura homóloga incorporada. En el régimen "frío" son fuertes pero menos dúctiles; mientras que en el régimen "caliente" son menos fuertes pero más dúctiles. En el régimen caliente su resistencia es mayor a velocidades mayores de carga.

estringida después de la estricción). Las velocidades de deformación bajas permiten un mayor tiempo para los reacomodos atómicos o moleculares, por lo que los esfuerzos son menores y la ductilidad mayor.

Esto también significa que en un periodo largo a temperaturas elevadas puede ocurrir una deformación, aun si la carga aplicada es muy pequeña. Se dice que el material sufre *termofluencia*, hecho muy importante cuando la deformación es inaceptable. El crecimiento de un álabe de una turbina dañaría un motor de reacción, y se sabe por experiencia que los productos pueden fallar después de un tiempo debido a la distorsión de alguna de sus partes plásticas.

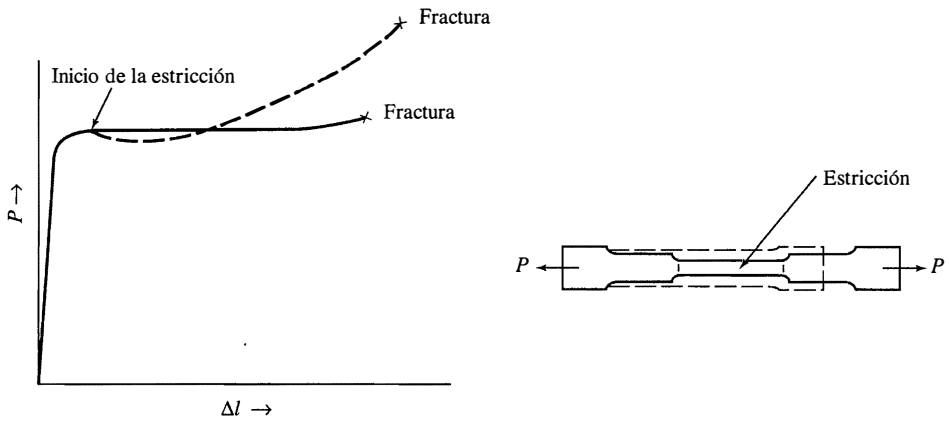


Figura 4-16 En el régimen caliente, la estricción se forma después de poca deformación, pero la deformación total es sustancial porque la estricción se difunde sobre toda la longitud de calibración. La línea discontinua es característica de los materiales poliméricos tenaces (plásticos).

En el ensayo típico de *termofluencia* (ASTM E139), una probeta de tensión se somete a una carga prefija (constante) a una temperatura constante. Existe una extensión inicial rápida (*termofluencia primaria*), seguida de una deformación más lenta a una velocidad constante (*termofluencia secundaria*) y, finalmente, cuando ocurre daño estructural, la termofluencia se acelera y la parte falla (*termofluencia terciaria*, figura 4-17*a*). Para partes que se espera que tengan un tiempo de servicio prolongado, el diseño se basa en el esfuerzo que produce una velocidad de termofluencia lineal de 1% por

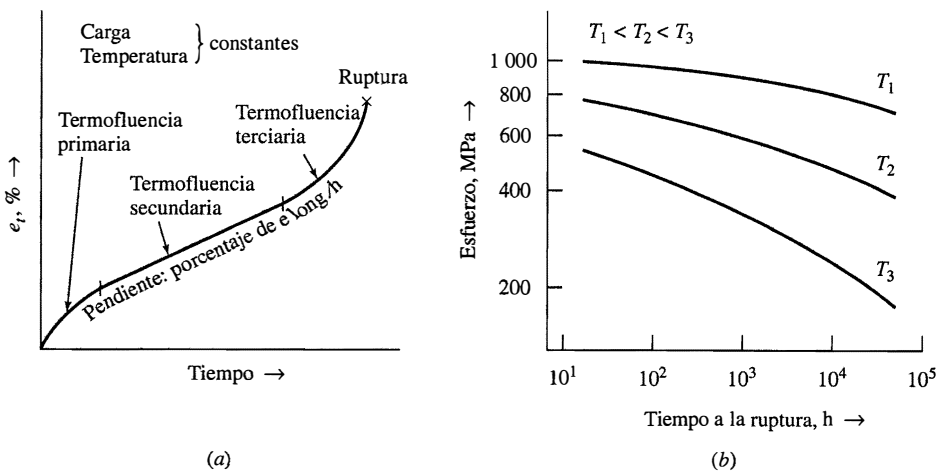


Figura 4-17 (*a*) En el régimen caliente, los materiales sufren deformación aun con esfuerzos bajos: termofluyen. Finalmente, ocurre la fractura. (*b*) La fractura (ruptura) inicia más rápido a niveles de esfuerzo y temperaturas mayores.

10 000 h (por ejemplo, para componentes de un motor de reacción) o por 100 000 h (como en el caso de componentes de turbinas de vapor). En forma alterna, la velocidad mínima de la termofluencia se grafica contra el esfuerzo (o viceversa) sobre papel con ambas escalas logarítmicas.

Para acelerar los ensayos y obtener datos de los componentes que pueden tener termofluencia pero que no deben fracturarse, los ensayos se conducen a esfuerzos mayores hasta la falla total. En los *ensayos de esfuerzo-ruptura* el tiempo que se requiere para esta última se determina en varios niveles de esfuerzo (Fig. 4-17*b*).

El inicio del comportamiento caliente en los plásticos con frecuencia se establece en un ensayo de flexión. La temperatura a la que una barra de 125 mm se flexiona 0.25 mm con un esfuerzo de 0.44 y/o 1.82 MPa se reporta como la *temperatura de deflexión por calor* (o *temperatura de deflexión bajo carga*, DTUL).

Ejemplo 4-14

Las temperaturas en la etapa de turbina de los motores de reacción están limitadas por la deformación por termofluencia de los álabes de la turbina. De 1940 a 1960, las mejoras en las superaleaciones permitieron elevar las temperaturas gradualmente; después de 1960, un gran incremento en la temperatura se hizo posible con la introducción de álabes enfriados de manera interna. Primero, el aire más frío se conducía de la etapa del compresor a través de agujeros provistos en la longitud del álabe. Más tarde, se pasaba aire frío sobre la superficie del álabe para proporcionar una capa de límite de enfriamiento (Fig. 1-4*b*). La resistencia del material del álabe a la termofluencia también se mejoró por medio de técnicas de manufactura novedosas, como la solidificación direccional (Secc. 7-5-3). Sin embargo, se pueden obtener temperaturas mayores con cerámicos (Cap. 12) y recubrimientos de barrera térmica (Seccs. 19-4-4 y 19-6-1).

4-7 ESFUERZOS RESIDUALES

Las estructuras y los componentes se diseñan para soportar los esfuerzos impuestos de manera externa, aunque éstos no son necesariamente los únicos esfuerzos activos. Como resultado de las operaciones de manufactura, también puede haber *esfuerzos internos* o *esfuerzos residuales*, confinados en la pieza o estructura.

Para entender cómo se originan los esfuerzos internos, considere un componente cilíndrico. Suponga que éste se hizo uniendo un tubo corto con un núcleo más largo que tiene ajuste estrecho (Fig. 4-18*a*). También suponga que mientras se realiza la unión, el núcleo fue comprimido hasta la longitud del tubo (Fig. 4-18*b*). Una vez completa la unión, el núcleo se libera de la compresión, después de lo cual el cilindro tiene una nueva longitud: el núcleo requiere la expansión hasta su longitud original, al igual que el tubo. Las fuerzas ejercidas mutuamente deben alcanzar un equilibrio. Como el núcleo y el tubo son del mismo material y se eligieron para tener la misma área de la sección transversal, el cilindro adoptará una longitud que será un promedio entre las originales del tubo y del núcleo (Fig. 4-18*c*). El tubo se extenderá en relación con su longitud original y se someterá a esfuerzos de tensión (residual o interna), mientras que el núcleo se comprimirá y someterá a esfuerzos de compresión. Aunque el cilindro es

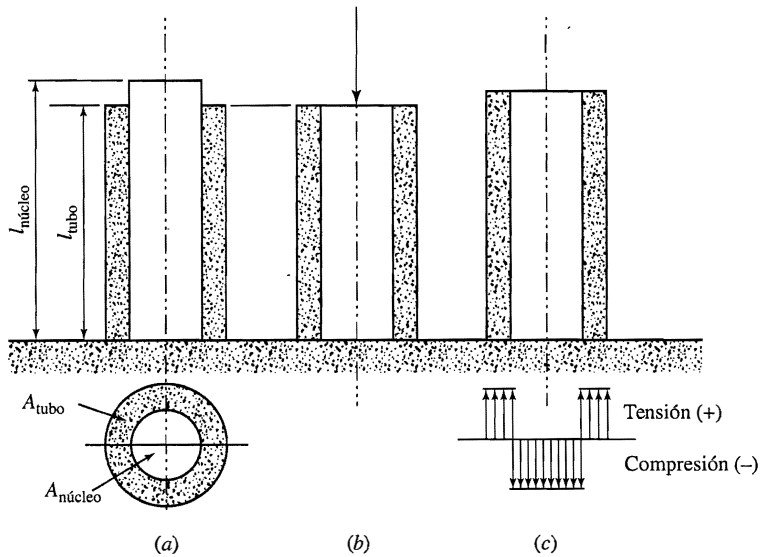


Figura 4-18 Si una barra (*a*), más larga que un tubo en el cual se ajusta, se (*b*) une a éste mientras se comprime hasta la misma longitud que el tubo, el ensamble, liberado de la compresión, (*c*) ocupará una longitud intermedia, y se generarán esfuerzos de tensión superficiales.

sólido y está en buen estado, su superficie se encuentra en tensión. Cuando el componente se pone en tensión, el esfuerzo aplicado se suma al residual superficial. Esto sería peligroso para un material de ductilidad limitada, porque cualquier defecto superficial se propagaría mucho antes y el cilindro fallaría en tensión o sucumbiría a la fatiga en cargas menores, en comparación con un cilindro libre de esfuerzos internos. También puede ocurrir la corrosión por esfuerzo.

Los esfuerzos internos se pueden reducir por calentamiento a alta temperatura (*recocido para alivio de esfuerzos*). Como se puede ver en la figura 4-15, la resistencia de los materiales disminuye a altas temperaturas; por lo tanto, los esfuerzos internos se reducen hasta el YS, que prevalece en la temperatura de recocido. Esto puede tener consecuencias indeseables. Por ejemplo, tome una pieza manufacturada con forma rectangular, la cual tiene un esfuerzo residual superficial de compresión elevado en una superficie, equilibrado por un esfuerzo de tensión menor en la masa. La forma de la parte permanecerá estable siempre y cuando haya equilibrio de fuerzas (Fig. 4-19*a*). En el recocido para alivio de esfuerzos, el esfuerzo superficial de compresión se reduce, pero el esfuerzo de tensión, siendo menor que el YS en la temperatura de recocido, permanece sin cambio. De esta forma, se afecta la fuerza de equilibrio dentro de la pieza; la masa, originalmente sometida a tensión, ahora se encoge, por lo que se debe establecer un nuevo equilibrio de fuerzas (Fig. 4-19*b*). Físicamente, esto significa que la parte se curva (alabea).

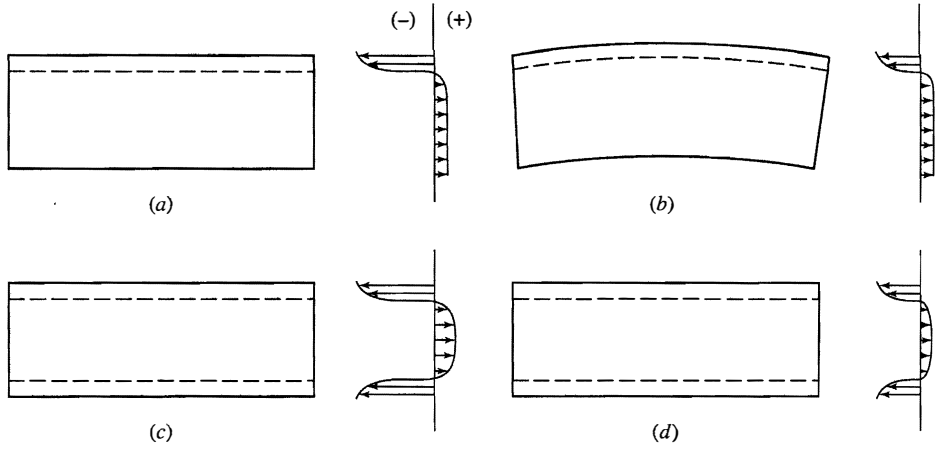


Figura 4-19 Una pieza rectangular, (*a*) producida con un esfuerzo residual de compresión en una de las superficies, (*b*) se distorsionará cuando se someta alivio de esfuerzos por recocido; en contraste, (*c*) una pieza de trabajo con esfuerzos residuales iguales en ambas superficies (*d*) retendrá su forma.

Los esfuerzos residuales se pueden eliminar por medios mecánicos, es decir, deformando el cuerpo para inducir un esfuerzo que exceda el límite de fluencia. Puede ser suficiente con deformaciones pequeñas, que incluyen vibraciones. Si los esfuerzos residuales no son simétricos, puede ocurrir distorsión cuando la carga mecánica o vibración cambie el equilibrio de fuerzas (Fig. 4-19*c*).

Los procesos o secuencias de procesos de manufactura, o las secuencias de procesos, a menudo se dirigen a minimizar los esfuerzos residuales o a introducir una distribución favorable de los esfuerzos. Recordando que los esfuerzos de compresión retrasan la fractura, se inducen esfuerzos residuales de compresión en la superficie de una parte de manera que la resistencia a la tensión, y particularmente a la fatiga, se incrementen (Fig. 4-14*a*). Si los esfuerzos de compresión son iguales en ambas superficies (Fig. 4-19*c*), la forma no cambia aun si los esfuerzos se alivian parcialmente (Fig. 4-19*d*).

Los esfuerzos residuales en una pieza se pueden determinar taladrando su centro o removiendo capas superficiales y midiendo los cambios dimensionales resultantes. También se encuentran disponibles métodos no destructivos con base en rayos x.

4-8 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (NDT)

En componentes críticos, la presencia de grietas y otros defectos se verifica por medio de varias técnicas de *ensayos no destructivos* (NDT). Muchas de ellas se pueden enlazar a una computadora para la rápida adquisición y procesamiento de datos y se pueden usar para la inspección del 100% de las partes durante su proceso. Algunas técnicas también son adecuadas para calibración.

1. La *inspección por líquido penetrante* expone defectos superficiales. Se aplican penetrantes (tintes) en forma de rocío o por inmersión a una superficie totalmente limpia y seca. Después de retirar el exceso, el penetrante atrapado en los defectos se extrae y se hace visible por medio de un revelador absorbente. Algunos tintes son fluorescentes y hacen el defecto altamente visible en luz ultravioleta. Una gran ventaja es que el proceso se puede aplicar a todos los materiales.

2. La *inspección por partículas magnéticas* se limita a piezas de trabajo ferromagnéticas. Cuando la pieza de trabajo se magnetiza, las grietas que yacen más o menos perpendiculares al campo magnético lo interrumpen y se hacen visibles cuando se espolvorean partículas ferromagnéticas finas sobre la superficie.

3. La *inspección por corriente parásita* se puede llevar a cabo en cualquier material conductor. Una sonda abastecida con una corriente de alta frecuencia induce un campo eléctrico en la parte; el campo cambia en la presencia de defectos en la superficie o cerca de ella. Estos cambios se ponen de manifiesto en los instrumentos. La técnica es de no contacto y resulta adecuada para la inspección en línea, en la medición del espesor de los recubrimientos superficiales, y en la de los cambios en la condición metalúrgica.

4. La *inspección ultrasónica* se basa en observar cuando un haz de energía ultrasónica (energía acústica de alta frecuencia comúnmente, 1-25 MHz) pasa a través de una estructura sólida con poca pérdida, pero se refleja parcialmente desde las superficies internas. Por lo tanto, las grietas y cavidades se ponen de manifiesto en una terminal de presentación de video. Al mover el transductor o la probeta en un patrón *x-y* se permite la representación, así el retraso del tiempo de la onda reflejada proporciona la dimensión de la profundidad. Un buen acoplamiento entre el transductor y la pieza de trabajo se asegura por un fluido de acoplamiento (acoplante). Esta técnica es el método más importante para materiales compuestos de matriz polimérica.

5. La *inspección radiográfica* con rayos x, rayos gamma o neutrones es capaz de revelar defectos internos, así como grietas superficiales que reducen la absorción de la radiación penetrante, los cuales se muestran como áreas más oscuras. También, la absorción de los rayos x y rayos γ aumenta al elevarse el número atómico y densidad, de aquí que se vean las estructuras internas (como en los dispositivos semiconductores). Los neutrones son absorbidos por algunos elementos ligeros, incluyendo el hidrógeno, haciendo la técnica adecuada también para los plásticos. En la radiografía convencional se crea una imagen bidimensional sobre una película, por lo que la localización de los defectos y las características dentro de la profundidad del cuerpo no se conoce. Esta desventaja se elimina por medio de la *tomografía computarizada* (TC), desarrollada originalmente para propósitos médicos. Un haz de rayos x en forma de ventilador, muy colimado, se pasa a través de la pieza y se mide su absorción por medio de un arreglo lineal de fotodetectores. Las mediciones se repiten mientras la parte se gira y mueve (se traslada) (Fig. 4-20). Por medio de algoritmos de computadora se construye una imagen tridimensional (3-D) de la pieza, con todos los detalles del interior. La resolución espacial es mejor que 50 μm y la exactitud dimensional mejor que 10 μm; así, la técnica es adecuada para la ingeniería inversa de componentes que tienen formas comple-

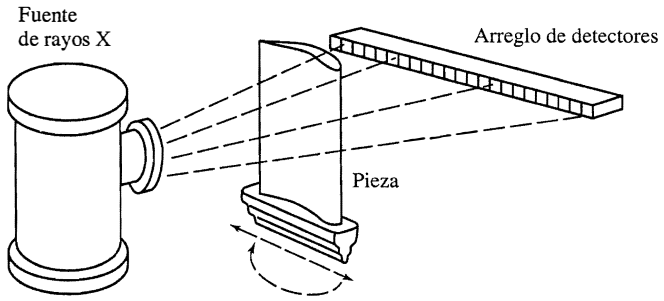


Figura 4-20 En la tomografía computarizada (TC) se construye una imagen 3-D pasando rayos x a través de la parte, mientras que ésta se gira y traslada.

jas y cavidades internas. La salida se puede convertir de manera directa en un modelo sólido.

6. El *ordenamiento electromagnético* se usa para separar componentes ferromagnéticos de acuerdo con su dureza, composición o cambio de composición en las capas superficiales (como ocurre en el endurecimiento superficial). El ordenamiento se basa en los efectos de estas variables en las propiedades magnéticas.

7. Por medio de la *holografía* se construye una imagen en 3-D de la parte. La holografía óptica muestra los defectos superficiales; la holografía acústica, en la que se usan ondas ultrasónicas, revela fallas internas.

8. La *emisión acústica* es de gran valor para monitorear procesos y maquinaria. Los procesos internos como la fractura y la deformación plástica volumétrica, y los procesos superficiales como el corte y el deslizamiento, causan la liberación de pulsos cortos de energía elástica, los cuales se pueden detectar con transductores colocados en la superficie. El análisis del espectro de emisión da claves valiosas con respecto al proceso y, en algunos casos, se puede usar para el control de lazo cerrado.

La interpretación de los ensayos no destructivos requiere de una habilidad considerable y de buen juicio. El sesgo personal se minimiza cuando las gráficas de la computadora se usan para presentar e interpretar señales. Entonces es posible obtener un mapa completo de las imperfecciones en una pieza de trabajo grande.

4-9 PROPIEDADES FÍSICAS

Las propiedades físicas diferentes a la resistencia a menudo son de gran importancia y deben satisfacer las piezas manufacturadas.

4-9-1 Densidad

De nuestra experiencia cotidiana sabemos que un componente pesa mucho menos cuando está hecho de aluminio que de acero: la densidad del aluminio es aproximadamente un

tercio de la del acero. La densidad es la masa por unidad de volumen. La unidad SI de la masa es el gramo o megagramo (Mg; tonelada métrica); en el sistema convencional de Estados Unidos, la libra (lb). Para una conversión rápida, 1 kg = 2.2 lbs. De esta forma, la densidad en unidades de Mg/m^3 (= g/cm^3), o en el sistema convencional de Estados Unidos, lb/in^3. Si un componente de aluminio tiene la misma resistencia que el acero, tendrá una razón de resistencia al peso (o resistencia a la masa) 3 veces mayor. Esto explica por qué los aviones subsónicos se construyen sobre todo con aleaciones de aluminio. Sin embargo, existen aceros que son mucho más fuertes que cualquier aleación de aluminio, y las partes que tienen un esfuerzo mayor estarán hechas de acero (o de una aleación de titanio). En otras circunstancias, la densidad elevada es un beneficio. Por ejemplo, los pesos de equilibrio que se colocan en los aros de las ruedas de un automóvil son de plomo, y las paredes o faldas de plomo los usan los radiólogos para protegerse de la radiación de los rayos x. Así, la densidad será uno de los factores de selección del material en el capítulo 5.

4-9-2 Propiedades tribológicas

La *tribología* es la ciencia, tecnología y práctica relacionada con las superficies que interactúan en movimiento relativo. El término se acuñó en Inglaterra en 1966, del griego (*tribein* = frotar), en reconocimiento de la gran importancia de este tema interdisciplinario. Abarca varios campos:

Adhesión Cuando dos cuerpos están en un contacto tan íntimo que los átomos se encuentran a distancias interatómicas, se pueden desarrollar fuertes enlaces; en el lenguaje de la tribología, ocurre *adhesión*, y requiere de una fuerza considerable para separar los dos cuerpos. La adhesión entre dos sólidos puede resultar en la formación de una fuerte unión (*soldadura por presión*), y la manufactura tiene como objetivo controlar la resistencia de la unión. La resistencia elevada se desea cuando el propósito es formar una estructura compuesta, tal como el revestimiento de níquel de las monedas de Estados Unidos. Es indeseable cuando se pretende asegurar fricción y desgaste bajos, ya sea en la manufactura o en el servicio, como en el contacto entre la matriz y la pieza de trabajo o en los cojinetes.

La adhesión se puede reducir por medio de una elección adecuada de los materiales en contacto. Por lo general, los materiales de mayor dureza presentan menos adhesión, y algunos materiales presentan adhesión inherentemente baja (por ejemplo, plomo en contacto con otros metales, o PTFE en contacto con metales o plásticos). De manera alternativa, una película contaminante se puede interponer para prevenir la unión atómica. Algunas películas contaminantes las suministra la naturaleza: los materiales procesados en la atmósfera terrestre normal tienen películas superficiales formadas en contacto con el aire. Al menos, hay películas adsorbidas de gases y vapor de agua. En muchas superficies también ocurren reacciones químicas: la mayoría de los metales se oxidan en el aire (Fig. 4-21*a*); además, algunos polímeros y cerámicos experimentan un cambio irreversible en contacto con el aire húmedo. De esta forma, las superficies técnicas nunca están absolutamente limpias. No obstante, la adhesión aún puede ocurrir cuando el deslizamiento relativo causa que las películas superficiales se rompan, y cuando

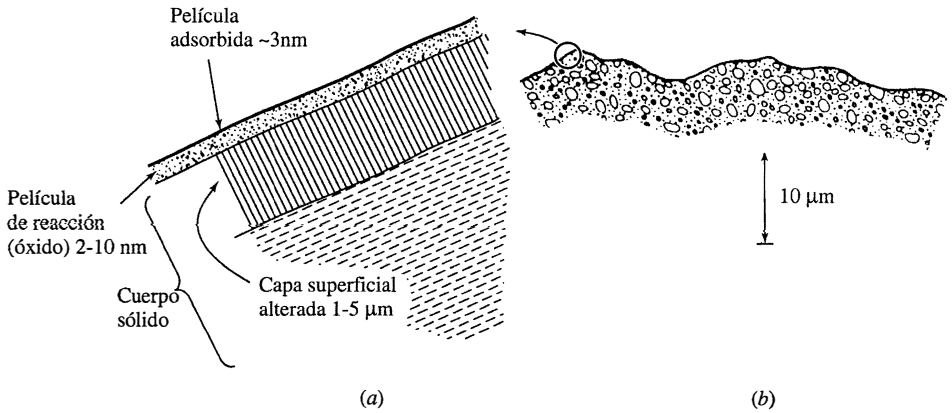


Figura 4-21 (*a*) La superficie de los materiales difiere de su masa, presentando evidencia de procesamientos y reacciones anteriores con la atmósfera y otros medios. (*b*) Muy pocas superficies son verdaderamente lisas; la mayoría presenta picos (asperezas) y valles.

las temperaturas son lo suficientemente elevadas para causar la migración (difusión) de átomos de un cuerpo al otro.

Fricción Con frecuencia, los componentes mecánicos se deslizan contra otro cuerpo. La fuerza normal P ejerce un esfuerzo normal, el cual suele llamarse *presión de interfaz* y se denota como p (en vez de σ). La fuerza que se requiere para mover el cuerpo paralelo a la superficie se llama fuerza cortante F (Fig. 4-22); al dividir F entre el área de la superficie A, se obtiene un *esfuerzo cortante* τ_i (el subíndice i significa la interfaz). Por definición, el *coeficiente de fricción* μ es

$$\mu = \frac{F}{P} = \frac{\tau_i}{p} \qquad \textbf{(4-18)}$$

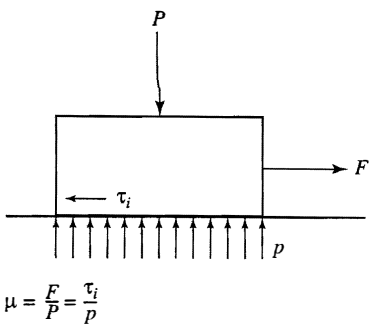


Figura 4-22 Cuando dos cuerpos están en contacto, se requiere una fuerza finita para moverlos de forma relativa a sí mismos. Esto nos permite caminar, pero también es responsable de mucha pérdida de energía.

En escala microscópica, las superficies no son perfectamente lisas, sino que muestran colinas (*asperezas*) y valles (Fig. 4-21*b*). La fricción se origina de la interacción de estas asperezas y de la adhesión. En muchas aplicaciones es necesario minimizar μ, ya sea por medio del uso de un lubricante, o seleccionando materiales que presenten fricción inherentemente baja, o ambas cosas. Los pares de materiales que usualmente presentan adhesión baja, también proporcionan fricción baja, pero no siempre. Las técnicas de manufactura se pueden dirigir para producir una estructura interna en un componente que es favorable para fricción baja (véase la Secc. 11-6). La textura superficial (rugosidad y su orientación) de la parte, la cual se controla por el proceso de manufactura, también asume una importancia fundamental.

Desgaste Las pérdidas económicas debidas al desgaste son enormes. El *desgaste* es la pérdida progresiva de la sustancia de la superficie de operación de los componentes. Usualmente es una consecuencia de la acción simultánea de varios mecanismos, con uno dominante. Las más importantes son las siguientes:

1. El *desgaste adhesivo* ocurre cuando una unión soldada por presión es más fuerte que uno de los cuerpos en contacto y arranca una partícula de ese cuerpo (Fig. 4-23*a*).

2. El *desgaste abrasivo* se origina por partículas duras, ya sea que estén dentro de uno de los cuerpos en contacto (*desgaste de dos cuerpos*, Fig. 4-23*b*) o interpuestas entre los dos componentes (*desgaste de tres cuerpos*, Fig. 4-23*c*).

3. El *desgaste por fatiga* ocurre cuando el paso repetido de un componente sobre la superficie del otro conduce a la separación de partículas pequeñas de dicha superficie, como en los cojinetes de bolas (Fig. 4-23*d*).

4. El *desgaste químico* sucede ante el ataque químico acelerado por la presión y el frotamiento prevaleciente en los contactos tribológicos.

Existen técnicas de evaluación del desgaste; por lo general simulan, tan cercanamente como es posible, las condiciones que se encuentran en el servicio. Se han desarrollado materiales para resistencia elevada al desgaste. En forma alterna, la resistencia al desgaste se puede incrementar recubriendo la superficie o transformándola en una

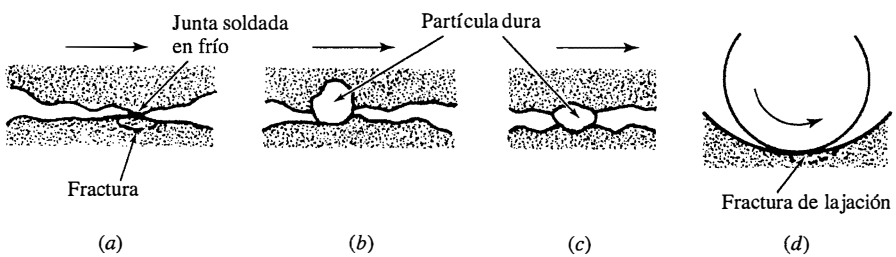


Figura 4-23 El desgaste es la pérdida progresiva de material. Se puede causar por: (*a*) la formación de juntas adhesivas; (*b*) el frotamiento (abrasión) por una partícula dura empotrada en una de las superficies de acoplamiento; (*c*) la abrasión por una partícula dura atrapada entre las superficies; o (*d*) la fatiga que resulta de cargas repetidas.

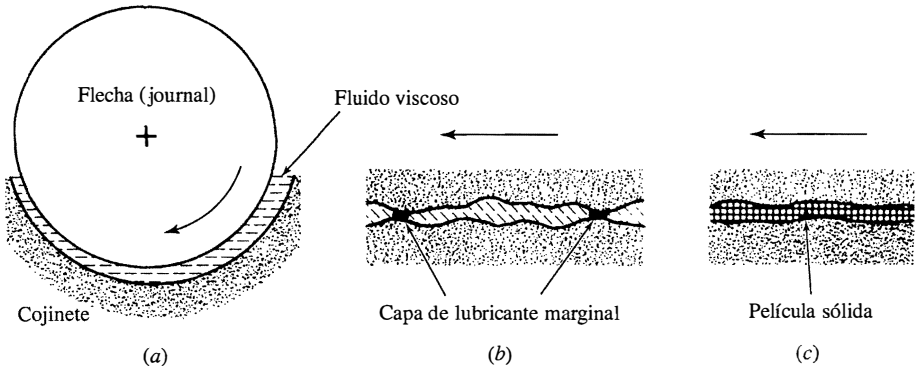


Figura 4-24 La fricción, y usualmente también el desgaste, se pueden reducir por medio de (*a*) fluidos viscosos, (*b*) lubricantes marginales colocados en la superficie por adsorción física o química, o (*c*) películas sólidas.

forma de mayor resistencia al desgaste (Cap. 19). El desgaste controlado y acelerado se induce de modo intencional en algunos procesos de manufactura (Secc. 16-8).

Lubricación El propósito de la lubricación es reducir o, con mayor exactitud, controlar la fricción y el desgaste. Además de elegir pares de materiales que presenten adhesión y fricción bajas, con frecuencia se interpone una sustancia separada (*lubricante*) entre las superficies en contacto. Los lubricantes se agrupan de acuerdo con su modo de acción:

1. Los fluidos viscosos (como los aceites minerales) introducidos en una abertura convergente entre las superficies en movimiento (Fig. 4-24*a*) pueden crear una película lo suficientemente gruesa para separarlas. Tal *lubricación hidrodinámica* virtualmente elimina el desgaste, y la fricción es muy baja.

2. Los *lubricantes marginales* son sustancias orgánicas (como los ácidos grasos) que se absorben en las superficies de los cuerpos en contacto y previenen la adhesión, aun cuando la película del fluido se adelgaza hasta el punto donde tiene lugar el contacto de las asperezas (Fig. 4-24*b*). Los aceites naturales, las grasas, los jabones y las ceras también poseen esta propiedad en alguna medida.

3. Los *lubricantes EP* (de presión extrema) son químicos (a menudo materiales orgánicos con contenido de S, Cl o P) que reaccionan a temperaturas elevadas con los metales para protegerlos de la adhesión y el desgaste rápido; con frecuencia también reducen la fricción. La preocupación por el ambiente ha conducido al desarrollo de los llamados aditivos EP pasivos.

4. Los *lubricantes sólidos* (como el grafito y el bisulfuro de molibdeno, MoS_2) separan las dos superficies con una capa de baja resistencia al esfuerzo cortante (Fig. 4-4*c*). Lubrican aun cuando las velocidades de deslizamiento son bajas o las temperaturas elevadas.

La lubricación es de importancia crítica en muchas operaciones de manufactura y en el servicio de dispositivos mecánicos. La operación exitosa de tales dispositivos

exige un control muy estrecho de las dimensiones y del acabado superficial. Esto no significa necesariamente un acabado muy liso; por ejemplo, la operación de una máquina de combustión interna depende de la rugosidad ligeramente entrecruzada, pero controlada, de las paredes del cilindro.

4-9-3 Propiedades eléctricas

Aunque hay alguna relación entre las propiedades mecánicas y las tribológicas, las eléctricas pueden ser muy independientes de ellas.

En la mayoría de los sólidos, la corriente eléctrica es conducida por el movimiento de electrones. Con objeto de que un electrón se mueva, se le debe dar energía extra por medio de la imposición de un campo eléctrico.

Los metales se pueden visualizar como centros cargados positivamente (iones) enlazados por electrones moviéndose libremente. De esta forma, los metales son *conductores*, con *resistividades* del orden de $20 \times 10^{-9}\ \Omega \cdot m$ (o 20 $n\Omega \cdot m$). La *conductividad* (el recíproco de la resistividad) a menudo se reporta como un porcentaje de la Norma Internacional del Cobre Recocido (IACS), la cual se obtiene dividiendo 1 724.1 entre la resistividad eléctrica en $n\Omega \cdot m$. Cualesquiera elementos de aleación e imperfecciones cristalinas hacen más difícil el paso de los electrones y se puede obtener una conductividad máxima sólo si la secuencia del proceso de manufactura y la condición final de la parte se controlan estrechamente.

Algunos materiales se convierten en *superconductores* a una temperatura crítica: su resistividad baja a cero. Este fenómeno por mucho tiempo fue apenas una curiosidad científica, ya que los materiales dúctiles debían ser enfriados cerca del cero absoluto. Las aleaciones metálicas de NbTi y Nb_3Sn, enfriadas por helio líquido (punto de ebullición 4 K), fueron los primeros superconductores en aplicaciones prácticas, empleados con el fin de accionar imanes altamente estables para las imágenes de resonancia magnética y para aceleradores de alta energía. En 1986, el descubrimiento de superconductores de "temperatura elevada" basados en óxido de cobre anunció una nueva era. Las temperaturas superconductoras están muy por arriba del punto de ebullición (77 K) del barato y abundante nitrógeno líquido, y los alambres compuestos de metal-cerámico (Secc. 15-5) tendrán una función cada vez mayor en los electroimanes, motores, y en la generación y distribución de la potencia eléctrica.

Los *aislantes* son materiales en los cuales todos, o virtualmente todos, los electrones están sujetos en enlaces covalentes, iónicos o moleculares. Se requiere una gran energía para perder un electrón (existe una gran separación energética). Por lo tanto, sus resistividades son mayores de $10^8\ \Omega \cdot m$. Sólo pierden su calidad aislante en una intensidad crítica de campo, la *resistencia dieléctrica.*

Algunos materiales (principalmente los cerámicos, pero también el plástico de fluoruro de polivinilideno) presentan *piezoelectricidad*: sujeto a una carga mecánica, el material genera una diferencia de potencial. De esta forma, se puede usar como un transductor de fuerza; en el modo inverso, la aplicación de una diferencia de potencial causa un cambio dimensional que se puede explotar en transductores ultrasónicos y en generadores de potencia. La resistividad volumétrica de los materiales *piezoresistivos* (sobre todo semiconductores) cambia mucho mediante la imposición de un esfuerzo.

Pero otros materiales (cristales cerámicos) son *piroeléctricos*: desarrollan un voltaje como respuesta a una diferencia de temperatura.

Gran importancia técnica tienen los sólidos que son normalmente aislantes, pero que se convierten en conductores cuando se aplica un campo eléctrico. Forman la base de la industria de los *semiconductores* y se analizan en el capítulo 20.

4-9-4 Propiedades magnéticas

Muchos materiales son *ferromagnéticos*: contienen *dominios magnéticos*. Cuando éstos son fácilmente reorientados bajo la influencia de campos magnéticos impuestos, se habla de *materiales magnéticamente suaves* (por ejemplo, las láminas del núcleo en los transformadores o motores). En contraste, los materiales magnéticamente duros son difíciles de volver a magnetizar, y los *imanes permanentes* retienen la orientación magnética impuesta durante la manufactura (por ejemplo, los imanes de los altavoces). Algunos materiales se pueden magnetizar repetidamente, abriendo oportunidades para la grabación y el almacenamiento de información, por medios magnéticos. También existe un efecto análogo a la piezoelectricidad: cuando se impone un campo magnético, los materiales *magnetoestrictivos* cambian su dimensión.

En todos los casos, no sólo la composición sino también las tecnologías de manufactura se deben controlar muy de cerca para obtener las propiedades deseadas.

4-9-5 Propiedades térmicas

Las propiedades térmicas tales como el coeficiente de dilatación térmica (CDT), el calor específico, y los calores latentes de fusión y de evaporación son importantes en muchos procesos de manufactura y en situaciones de servicios, y sus valores se pueden encontrar en manuales. En la tabla 4-1 se da una selección.

Para nuestro propósito, la más importante es el punto de fusión. En el servicio esto significa la pérdida total de la capacidad de soporte de carga; asimismo, en la sección 4-6 se vio que afecta el inicio del comportamiento caliente. También determinará en gran parte la facilidad de producir una fundición.

La dilatación térmica adquiere una gran importancia en las estructuras compuestas: una diferencia significante en el coeficiente de dilatación térmica conduce a esfuerzos elevados y posiblemente a la falla. La dilatación térmica disminuye con el incremento de la resistencia de enlace, de ahí que sea la más alta en los polímeros, menor en los metales, y la más baja en los cerámicos. La dilatación o contracción diferencial en un cuerpo crea esfuerzos que llevan al alabeo en un material dúctil y a la fractura en uno frágil (choque térmico).

En común con otras propiedades térmicas, la *conductividad térmica* es una propiedad intrínseca del material, independiente de la estructura. Sin embargo, la *transferencia de calor* en una estructura a menudo depende, además de la conducción a través de la propia estructura, del movimiento de algún material caliente, como gas u otro fluido (transferencia de calor por convección), y de la radiación. Con frecuencia, el propósito

Tabla 4-1 Propiedades térmicas de algunos materiales de ingeniería

Material	Conductividad térmica, W/m · K	Coeficiente de dilatación térmica a 20°C μm/m·K	Material	Conductividad térmica, W/m · K	Coeficiente de dilatación térmica a 20°C, μm/m · K
Plata	428	19.7	ABS		60-130
Cobre	390	16.5	Nailon 66	0.24	80
Oro	318	14.2	Relleno de vidrio	0.2-0.5	15-20
Aluminio	240	23.6	Policarbonato	0.2	70
Hierro	74	11.7	LDPE	0.33	110-220
Invar (Fe-36Ni)	11	0.6-0.3	HDPE	0.48	60-110
Kovar (Fe-28Ni-18Co)	16.7	4.4	PMMA		50-90
Acero inoxidable 304	15	16.5	Poliimida		20-50
Acero inoxidable 410	24	10.0	Polipropileno	0.12	80-100
			Poliestireno	0.12	50-80
Alúmina	17	6.6	PTFE, reforzado con vidrio	0.3-0.4	77-100
Berilia	218	8.5	PVC, rígido		50-100
Vidrio-E	1.7	6.0	Flexible		70-250
Sílica fundida	1.4	0.6-0.9	Epóxico	0.17	45-65
Silicio	1.5	2.6-3.6	Relleno de vidrio		11-50
			Relleno de plata	0.8-1.3	33-53
			Resina fenólica		30-45
			Poliimida		20-50
			Poliuretano	0.2	100-200

de la manufactura es la producción de una estructura compuesta, en la cual la transferencia de calor por estos medios o se promueve o se dificulta.

Ejemplo 4-15

Los motores de combustión interna, al igual que todas las máquinas térmicas, se hacen más eficientes a temperaturas elevadas de operación. No obstante, los límites de la temperatura se fijan por los lubricantes y los materiales de construcción. Por lo tanto, la mayor parte de las máquinas se enfrían con un fluido circulante basado en agua, del cual se extrae el calor con la ayuda de un complejo producto de la manufactura, el radiador. En éste, el refrigerante se bombea a través de tubos paralelos de los que se extrae el calor por medio de aletas. Con frecuencia las aletas se diseñan y manufacturan en formas complejas, de manera que el aire que fluye sobre ellas remueva el calor más eficientemente. Los cambiadores de calor son vitales para la operación de refrigeradores, acondicionadores de aire, hornos industriales y domésticos, colectores solares y disipadores térmicos para computadoras; todos estos productos representan retos diferentes de manufactura. En el otro lado del espectro, la transferencia de calor se minimiza por medio de estructuras aislantes tales como esterillas de fibra de vidrio, plásticos espumados y refractarios.

4-9-6 Propiedades ópticas

Los procesos de manufactura se controlan para dotar a las piezas manufacturadas con atributos ópticos deseables, por razones tanto estéticas (apariencia) como de su función técnica.

La apariencia superficial de las piezas se controla por medio de técnicas de manufactura para reflejar la luz en una manera deseable. Un acabado muy liso refleja la luz en el mismo ángulo que el de incidencia (*reflexión especular*, como la de una superficie acabada a espejo), mientras que una superficie áspera lo hace aleatoriamente (*reflexión difusa*, como la de acabado mate).

Algunos materiales absorben luz y son *opacos* (no transparentes). Otros, como los polímeros amorfos, los vidrios y los cerámicos, son *transparentes*. Si mediante técnicas de manufactura apropiadas se crean superficies internas de reflexión, el mismo material se convierte en *translúcido* (parcialmente transparente) u opaco (véase la Secc. 12-5-1).

4-10 PROPIEDADES QUÍMICAS

De muchas estructuras manufacturadas se espera una sobrevivencia por periodos prolongados, mientras que son expuestas a la atmósfera u otros gases o líquidos. Su deterioro por la acción química o electroquímica (*corrosión*) está regido principalmente por la elección de los materiales, pero también se afecta por el método de manufactura.

Por lo general el objetivo es evitar situaciones dañinas. Por ejemplo, los esfuerzos residuales pueden conducir a una corrosión acelerada y al agrietamiento por corrosión con esfuerzo (Secc. 4-5); los tornillos de acero se corroen cuando se usan para la unión de lámina de latón; algunos aceros inoxidables pierden su resistencia a la corrosión si se enfrían lentamente partiendo de la temperatura de soldado. En el lado positivo, se pueden tomar medidas para proteger una estructura de la corrosión. Por ejemplo, en la actualidad la mayor parte de las carrocerías de los automóviles se construyen de lámina recubierta de zinc.

La resistencia a la corrosión puede ser indeseable en la manufactura cuando la función de un lubricante requiere que tenga lugar una reacción química. Así, la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables necesita del uso de técnicas de lubricación especiales en el proceso de formación.

4-11 RESUMEN

El término *manufactura*, como se usa para el propósito presente, se refiere a la producción de artículos durables, que deben cumplir con un número de requisitos de servicio. Los procesos y sus secuencias se deben elegir y controlar para dar una combinación óptima de las propiedades. Por esta razón, una de las actividades importantes en la manufactura es la medición de las propiedades tanto durante la manufactura como cuando el producto ya está terminado.

1. Las propiedades mecánicas se determinan bajo condiciones diseñadas para simular las cargas en el servicio. De esta forma, los ensayos conducidos en tensión, flexión o compresión proporcionan información sobre la resistencia y la ductilidad.
2. La fractura en los materiales dúctiles se inicia por medio de esfuerzos triaxiales de tensión en puntos de debilidad. Por lo tanto, muchos procesos de manufactura tienen como objetivo la generación de esfuerzos de compresión y la eliminación de puntos débiles con el incremento de la limpieza del material.
3. Las muescas y grietas en la superficie de las partes causan concentraciones de esfuerzos, las cuales pueden conducir a la fractura prematura y a variaciones aleatorias de las propiedades. Por lo tanto, una de las metas del procesamiento es prevenir la formación de grietas o neutralizar su efecto dañino. Estas medidas también incrementan la resistencia a las cargas repentinas, a la fractura rápida y a la fatiga en cargas repetidas.
4. Las fuerzas que actúan sobre la probeta también deforman la máquina. Por supuesto, la deformación elástica del equipo tiene consecuencias importantes en muchas operaciones de manufactura.
5. Las propiedades mecánicas de todos los materiales son una función de la temperatura. En los metales y en algunos polímeros termoplásticos, una transición al comportamiento "caliente" ocurre en $0.5T_m$ en la escala de la temperatura homóloga; entonces, la resistencia se hace una función de la tasa de deformación.
6. El servicio prolongado en el régimen de temperatura caliente exige resistencia a *la termofluencia y vida prolongada al esfuerzo-ruptura*, propiedades que de nuevo se mejoran enormemente por la ausencia de características internas de debilitamiento, tales como inclusiones, grietas y vacíos.
7. Todas las propiedades mencionadas son sensibles a la estructura, es decir, cambian, para un material dado, con la estructura interna de la pieza. Estas características se pueden modificar, de manera controlada, por medio de técnicas de manufactura.
8. Una poderosa ayuda para mejorar la calidad es el ensayo no destructivo para la detección y cuantificación de defectos superficiales e internos, esfuerzos residuales y desviaciones de las condiciones especificadas del material.
9. Entre las propiedades físicas, la densidad no es sensible a la estructura. Todas las otras propiedades (tribológicas, eléctricas, magnéticas y ópticas) son sensibles a la estructura y se controlan por medio de técnicas de manufactura.
10. Las propiedades químicas tales como la resistencia a la corrosión son vitales en muchas aplicaciones y se pueden controlar por medio de técnicas de manufactura, incluyendo tratamientos superficiales especiales.

Se debe tomar nota de que es factible sumar los sistemas de adquisición de datos a todo el equipo de ensayo, y que esta información se puede procesar en una computadora. Combinados con el control computarizado del equipo mismo de prueba, los ensayos pueden ser completamente automatizados. Por supuesto, existen instalaciones en las cuales grandes cantidades de probetas codificadas por barras son cargadas por robots de propósito especial, y movidas a través de una sucesión de unidades de ensayo, y los resultados se procesan inmediatamente, todo sin la intervención de un operador.

PROBLEMAS 4A

4A-1 Defina (*a*) el límite elástico y (*b*) la resistencia a la tensión.

4A-2 Nombre y defina dos mediciones de la ductilidad obtenidas por medio del ensayo de tensión.

4A-3 Diga dos métodos para incrementar la reducción del área para un metal. Justifique su respuesta.

4A-4 Defina la tenacidad; dibuje un boceto para clarificar su respuesta.

4A-5 Explique por qué la presión hidrostática incrementa la reducción del áreá en el ensayo de tensión. Para hacer su explicación más clara, haga un boceto de una probeta a tensión con los esfuerzos que actúan sobre ella.

4A-6 Defina (*a*) la resistencia a la ruptura, (*b*) la resistencia a la flexión y (*c*) el módulo de ruptura.(*d*) Haga bocetos para mostrar cómo se determinan estas propiedades.

4A-7 Haga tres bocetos, mostrando las curvas de esfuerzo-deformación unitaria ingenieriles para un ensayo de tensión, para (*a*) un material dúctil, (*b*) un material de ductilidad muy limitada, y (*c*) un material completamente frágil. (*d*) En las coordenadas, dé las definiciones del esfuerzo y de la deformación. En los diagramas identifique (*e*) $\sigma_{0.2}$; (*f*) TS; (*g*) la elongación total, y (*h*) la tenacidad.

4A-8 Defina la velocidad de deformación en el ensayo de tensión.

4A-9 Defina la "temperatura elevada" para un metal. Dibuje una curva para mostrar la deformación por tensión a temperatura elevada contra tiempo; identifique los regímenes de termofluencia primaria, secundaria y terciaria.

4A-10 (*a*) En un diagrama, dibuje dos curvas que describan la dependencia de la resistencia y de la ductilidad de la mayoría de los metales puros, así como la función de la temperatura homóloga (dibuje curvas separadas para la velocidad de deformación baja y alta, cuando se requiera). (*b*) Muestre el efecto de la aleación en el inicio del régimen de temperatura caliente.

4A-11 Defina la temperatura homóloga.

4A-12 Una parte de acero se somete a una carga cíclica de tensión. (*a*) Dibuje un diagrama para mostrar el esfuerzo en el cual ocurre la falla como una función del número de ciclos. Marque esta línea (*a*). Dibuje líneas adicionales para indicar el esfuerzo de falla si la parte (*b*) tiene una superficie rugosa, (*c*) tiene esfuerzos residuales de compresión o (*d*) esfuerzos residuales de tensión en la superficie.

4A-13 Haga un boceto para definir el coeficiente de fricción.

4A-14 Haga bocetos para mostrar (*a*) el desgaste adhesivo y (*b*) el desgaste abrasivo.

4A-14 Defina la adhesión.

PROBLEMAS 4B

4B-1 La probeta que se especificó en el ejemplo 4-4 se ensaya en una máquina de 20 kN de capacidad. Los registros se hacen del cabezal de la máquina. ¿Se esperaría que la pendiente inicial del registro sea más aguda para la máquina más pequeña? Justifique su respuesta.

4B-2 En la industria de la construcción se usa acero o concreto reforzado en muchas aplicaciones en los que se generan esfuerzos de tensión (por ejemplo, vigas en puentes y pasos a desnivel en caminos). ¿Qué método de prueba se recomendaría para establecer el esfuerzo de tensión seguro para (*a*) acero y (*b*) concreto reforzado?

4B-3 Se conducen ensayos de tensión en un cerámico. Los resultados muestran una dispersión extrema. Sugiera tres causas probables.

4B-4 Para caracterizar un cerámico de alúmina, se ensaya una probeta en flexión de tres puntos (σ_B = 420 MPa) y otra en flexión de cuatro puntos (σ_B = 485 MPa). Someta los resultados a una crítica: (*a*) ¿Puede σ_B ser mayor en la flexión de cuatro puntos? Justifique su respuesta. (Dibuje bocetos.) (*b*) ¿Son adecuados los datos para caracterizar verdaderamente las propiedades de tensión del material? ¿Por qué? (*c*) ¿Qué ensayos serían mejores?

4B-5 Un acero se va a usar en la construcción de una plataforma de perforación marina para el Mar de Beaufort. ¿Qué ensayo recomendaría para las verificaciones rápidas acerca de su susceptibilidad a la fractura frágil?

4B-6 Las forjas hechas para aplicaciones de aeronaves deben estar libres de solapas, costuras y grietas. Liste todas las técnicas NDT que consideraría si el material es: (*a*) acero, (*b*) aleación de aluminio, o (*c*) aleación de titanio; o si (*d*) la forja se reemplaza por un compuesto reforzado con fibra de base polimérica. Indique qué técnica es adecuada para defectos superficiales o internos.

4B-7 Con frecuencia se ha determinado que una aleación dada tiene una resistencia a la fatiga mayor en una forma de granos finos que en forma de granos gruesos. Explique por qué sucede esto.

4B-8 Existen materiales especialmente desarrollados que se describen como *resistentes a la termofluencia*. ¿Esto significa que no fluyen, o alguna otra cosa?

4B-9 Algunos libros aportan datos para la resistencia a la compresión de los metales. (*a*) Defina qué se entiende por resistencia a la compresión. ¿Cuál es el significado de tales aportaciones para materiales (*b*) frágiles y (*c*) dúctiles (para clarificar su respuesta, dibuje unas curvas típicas de fuerza-desplazamiento)?

4B-10 Un componente aeroespacial crítico está hecho por fundición. ¿Qué técnica es la más adecuada para determinar el tamaño y la localización de la porosidad potencial? ¿Por qué?

4B-11 Uno de sus compañeros afirma que se deben hacer todos los esfuerzos para eliminar los esfuerzos residuales en una pieza metálica sometida a una carga de fatiga en el servicio. Critique la afirmación. Justifique su opinión.

4B-12 Una parte de acero se somete a esfuerzos cíclicos de compresión durante el servicio. El esfuerzo es igual a un tercio del límite de fluencia. ¿Se espera la falla por fatiga? Justifique su respuesta.

4B-13 En los proyectos de investigación, con frecuencia las muestras son demasiado pequeñas para cortar especímenes estándares de prueba de 50 mm de longitud calibrada, y se preparan especímenes más pequeños con 25 o incluso 10 mm de longitud calibrada (el diámetro se puede reducir proporcionalmente). ¿Los resultados de las pruebas son comparables con los de los estándar en lo que concierne a (*a*) YS, (*b*) TS, (*c*) el. y (*d*) RA? Justifique su respuesta.

4B-14 Se va a determinar el módulo elástico de un gran número de probetas; para ahorrar tiempo, se propone registrar las curvas fuerza-extensión directamente del cabezal de la máquina. ¿Está de acuerdo con la propuesta? ¿Por qué?

4B-15 Se argumenta que la adhesión baja siempre es deseable en la manufactura. ¿Está de acuerdo? Justifique su opinión.

PROBLEMAS 4C

4C-1 El alambre de acero que se usa en las llantas radiales de cinturón de acero tiene YS = 2 100 MPa. ¿Cuánta deformación elástica es posible antes de que empiece la deformación permanente?

4C-2 Una especificación de una compañía exige que un componente de acero tenga una TS mínima de 180 ksi (1 240 MPa). Se practican ensayos de tensión en muestras selectas, pero todos los componentes también se someten a la prueba de dureza de Rockwell C. ¿Cuál es el valor mínimo aceptable de HRC?

4C-3 Si los componentes del problema 4C-2 fueran demasiado grandes para ser probados en una máquina de dureza Rockwell, ¿qué método se usaría para mantener una inspección sobre la dureza durante la operación?

4C-4 Calcule la temperatura $0.5T_m$ para el Zn, Cu y Ni. Con esta base explique si se deberá esperar una termofluencia significante de los metales a 200°C.

4C-5 Los ensayos de dureza se realizan rutinariamente para verificar las propiedades mecánicas de los materiales. Para estimar la validez de este procedimiento, (*a*) verifique si la du-

reza = 3 × TS para las láminas de latón del ejemplo 8-7; (*b*) explique cualquier diferencia que pueda existir (*sugerencia*: asegúrese de convertir los valores de la dureza en MPa); (*c*) explique por qué se usan los métodos particulares de ensayo y por qué *no* se deberá usar el ensayo Brinell.

4C-6 Dibuje un modelo de resorte para el arreglo del ensayo que se muestra en la figura 4-1.

4C-7 Una barra de metal se ensaya en tensión; la reducción del área en la fractura es de 45%. El mismo metal se ensaya en compresión; grietas superficiales aparecen después de 87% de reducción en la altura. (*a*) Defina la reducción del área. (*b*) Usando el principio de la invariabilidad del volumen, convierta en deformación por tensión equivalente. (*c*) Convierta la deformación por tensión en deformación por compresión equivalente. (*d*) Compare la deformación por compresión equivalente con la deformación hasta la fractura en el ensayo de compresión. (*e*) Explique por qué el material puede soportar una deformación mucho mayor en compresión que en tensión.

4C-8 Los cables de acero que se usan en los elevadores de tiros de mina tienen YS = 2 100 MPa. ¿Cuál es la longitud de un torón individual de 1 000 m de longitud si la carga sometida desarrolla un esfuerzo igual a un tercio de YS?

4C-9 Una parte tiene dos muescas. Una tiene una profundidad de 2 mm con un radio de 1 mm; la otra tiene una profundidad de 1 mm con un radio de 0.05 mm. ¿Cuál es más peligrosa?

4C-10 Un cilindro de hierro fundido gris de 25 mm de diámetro y 25 mm de altura se ensaya en compresión. La fractura ocurre después de muy poca deformación en una carga de 354 kN. Determine la resistencia a la compresión del material.

4C-11 El mismo hierro fundido se prueba en tensión en probetas de 22.4 mm de diámetro. La fractura ocurre en una carga de 81.2 kN. (*a*) Encuentre la resistencia a la tensión. (*b*) Compare con el resultado del problema 4C-10; explique la diferencia, si hay alguna.

4C-12 Dos laboratorios prueban el mismo cobre en tensión a 600°C. Uno reporta una resistencia mucho mayor que el otro. ¿Cuál es la primera pregunta que haría para clarificar la situación? Justifique su respuesta.

4C-13 Las placas laminadas en caliente de un lote de acero se ensayaron en tensión en probetas de 50 mm de longitud calibrada. Calcule la YS, TS y la el. Determine la desviación media y estándar de estas propiedades.

Núm.	ω_0, mm	h_0, mm	$P_{0.002}$, kg	$P_{máx}$, kg	el., mm
1	12.64	3.16	1 031	1 407	21.39
2	12.60	3.22	1 022	1 340	19.50
3	12.64	3.22	964	1 349	22.09
4	12.59	3.25	959	1 376	21.95
5	12.57	3.	956	1 351	21.54
6	12.51	3.10	964	1 352	21.64

4C-14 Un cilindro de Al 1 100 de 50 mm de diámetro y 75 mm de altura se comprime con una grasa lubricante altamente efectiva. Las lecturas de la fuerza se toman en cuatro puntos en la carrera. Obtenga el esfuerzo de compresión en cada punto y grafique contra la carrera.

Punto	h, mm	P, kN
0	75	0
1	72	128.
2	65	195.1
3	55	279.7
4	45	387.3
5	40	458.9

LECTURAS ADICIONALES

ASM Handbook, vol. 10, *Materials Characterization*, 1986; vol. 11, *Failure Analysis and Prevention*, 1986; vol. 12, *Fractography*, 1987; vol. 18, *Friction, Lubrication, and Wear Technology*, 1992, ASM International. (También en CD-ROM.)

Bever, M.B. (ed.): *Encyclopedia of Materials Science and Technology* (8 vols.), Pergamon, 1986.
Davis, J.R. (ed.): *ASM Materials Engineering Dictionary*, ASM International, 1992.
Davis, J.R. (ed.): *Metals Handbook Desk Edition*, 2a. ed., ASM International, 1998.
EngineeredMaterials Desk Edition, ASM International, 1995.

Libros de introducción sobre materiales

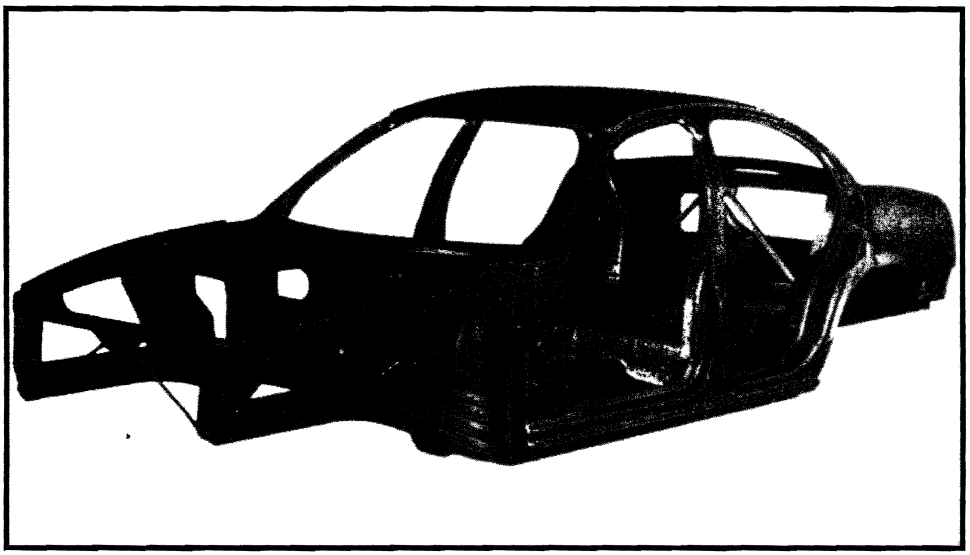
Anderson, J.C., K.D. Leaver, R.D. Rawlings y J.M. Alexander: *Materials Science*, 4a. ed., Chapman and Hall, 1990.
Askeland, D.R.: *The Science and Engineering of Materials*, 3a. ed., PWS Engineering, 1994.
Ashby, M.F. y D.R.H. Jones: *Engineering Materials 1: An Introduction to Their Properties and Applications*, Pergamon, 1980; *2: An Introduction to Microstructures, Processing and Design*, Pergamon, 1986.
Budinski, K.: *Engineering Materials: Properties and Selection*, 5a. ed., Prentice Hall, 1996.
Callister, W.D. Jr.: *Materials Science and Engineering*, 4a. ed., Wiley, 1997.
Carter, G.F., y D.E. Paul: *Materials Science and Engineering*, ASM International, 1991.
Flinn, R.A. y P.K. Trojan: *Engineering Materials and Their Applications*, 3a. ed., Houghton Miffin, 1990.
John, V.B.: *Introduction to Engineering Materials*, 3a. ed., Industrial Press, 1992.
Schaffer, J., A. Saxena, S. Antalovich, T. Sanders y S. Warner: *The Science & Design of Engineering Materials (with Materials in Focus CD-ROM)*, 2a. ed., McGraw-Hill, 1999.
Shackelford, J.F.: *Introduction to Materials Science for Engineers*, 4a. ed., Macmillan, 1995.
Smith, W.F.: *Principles of Materials Science and Engineering*, 3a. ed., 1996.
Van Vlack, L.H.: *Elements of Materials Science and Engineering*, 6a. ed., Addison-Wesley, 1989.

Comportamiento mecánico

Booser, E.R.: *Tribology Data Handbook*, CRC Press, 1998.
Boyer, H.E. (ed.): *Atlas of Creep and Stress-Rupture Curves*, ASM International, 1986.
Boyer, H.E. (ed.): *Atlas of Fatigue Curves*, ASM International, 1986.
Boyer, H.E. (ed.): *Atlas of Stress-Strain Curves*, ASM International, 1986.
Caddell, R.M.: *Deformation and Fracture of Solids*, Prentice Hall, 1980.
Courtney, T.H.: *Mechanical Behavior of Materials*, McGraw- Hill, 1990.
Dieter, G.E., Jr.: *Mechanical Metallurgy*, 3a. ed., McGraw- Hill, 1986.
McClintock, F.A. y A.S. Argon: *Mechanical Behavior of Materials*, Addison-Wesley, 1966.
Meyers, M.A. y K.K. Chawla: *Mechanical Metallurgy: Principles and Applications*, Prentice Hall, 1984.

Ensayos

ASM Handbook, vol. 8, *Mechanical Testing*, 1985; vol. 17, *Nondestructive Evaluation and Quality Control*, 1989; ASM International.
Cartz, L.: *Nondestructive Testing*, ASM International, 1995.
Cheremisinoff, N.P. y P.N. Cheremisinoff: *Handbook of Advanced Materials Testing*, Dekker, 1994.
McMaster, R.C. (ed.): *Nondestructive Testing Handbook*, 2a. ed., American Society for Nondestructive Testing, Columbus, Ohio, 1982.
Pohlandt, K.: *Materials Testing for the Metal Forming Industry*, Springer, 1989.
Whitestone, D.J.: *Handbook of Surface Metrology*, Institute of Physics Publishing, Philadelphia, 1994.



Con la cooperación entre las compañías del acero, las automotrices y los equipos de diseño se creó una carrocería automotriz de acero ultraligero (ULSAB), la cual tiene un desempeño superior, aunque 36% menos masa que las de los automóviles actuales de tamaño medio. (*Cortesía de American Iron and Steel Institute, Southfield, Michigan.)*

capítulo

5

Materiales en el diseño y la manufactura

En este capítulo volvemos a revisar la ingeniería concurrente, esta vez restringiéndonos a las interacciones entre el diseño del producto, la selección de los materiales y la elección del proceso. Analizaremos:

El diseño de las piezas que se unirán para formar un ensamble

Los grupos de materiales disponibles para el diseñador

Las fuentes de los productos primarios a partir de los cuales se harán los artículos manufacturados

El impacto de las decisiones de diseño y proceso sobre el ambiente

El reciclaje como una forma de minimizar los efectos dañinos

En el capítulo 2 se vio que la manufactura es una actividad que requiere la participación de muchos especialistas. Ahora concentraremos nuestra atención a las actividades del ingeniero de manufactura, sin olvidar en ningún momento el panorama global. El énfasis se pondrá en los procesos de manufactura; sin embargo, éstos no pueden considerarse aislados. Aun desde este punto de vista restringido no se pueden separar las interacciones entre la selección del material, la elección del proceso y el diseño de la pieza. Efectivamente, el término *ingeniería concurrente* o *simultánea* se aplica con frecuencia a este grupo de actividades.

5-1 DISEÑO

El enfoque más estrecho sobre la ingeniería concurrente se puede ilustrar a través de las interacciones que se muestran en la figura 5-1. Aquí el énfasis se hace sobre los *procesos unitarios*, un término aplicado frecuentemente a la producción de piezas, las cuales luego se ensamblarán para formar un producto funcional. Aunque se reconoce que el diseño es un proceso iterativo, en la ingeniería concurrente cada paso se refleja en los tres campos de la figura 5-1. La siguiente lista de acciones sólo es representativa y no exhaustiva.

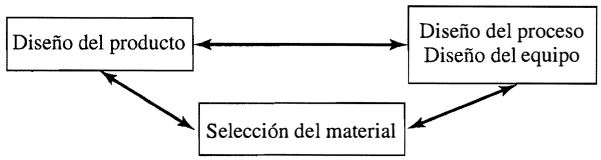


Figura 5-1 La ingeniería concurrente en el sentido más estrecho se concentra en las interacciones entre el diseño del producto y del proceso, y su influencia en la selección de los materiales.

1. Determinar las funciones que la pieza tendrá que satisfacer, con la debida consideración de las condiciones de operación, de los aspectos de seguridad (incluidas las características de seguridad, el momento de la falla), requisitos legales, implicaciones de la responsabilidad de los productos, facilidad de mantenimiento, requisitos de empaque, vida de servicio e impacto sobre el ambiente (almacenamiento y eliminación).

2. Determinar la configuración que cumplirá con las funciones requeridas y asignar dimensiones.

3. Analizar el diseño para cargas y esfuerzos, modos posibles de falla y aspectos de confiabilidad. Considerar el uso de diseños y el estándar de componentes de confiabilidad conocida.

4. Elegir un material que satisfaga todos los criterios de servicio. En manuales voluminosos se listan las propiedades de miles de materiales, comúnmente clasificados de acuerdo con la composición. Existen lineamientos de aplicación general que permiten al diseñador considerar el grupo o grupos de materiales más amplios posible sin restringir prematuramente la elección, lo cual limitará las posibilidades de manufactura. La elección del material se facilita gracias a bases de datos computarizadas cada vez más complejas.

5. Optimizar la elección del material considerando materiales alternativos. Dependiendo de la aplicación, varios factores adquieren importancia: costo mínimo para una resistencia dada (capacidad de soporte de carga), peso mínimo para una resistencia (resistencia específica = resistencia/densidad) o rigidez (módulo específico = módulo elástico/densidad) dadas. Ashby estableció un procedimiento formal para la selección.[1] Los selectores computarizados de materiales incorporan gran parte de la lógica necesaria para tomar una buena decisión.

6. Asignar las tolerancias más amplias posibles y el acabado superficial más rugoso permisible para la función dada.

7. Elegir un proceso o secuencia de procesos apropiada, con la debida consideración del costo de procesamiento y de ensamble, así como del número de piezas que se van a producir. Con frecuencia se pueden hacer ahorros combinando varias piezas (un

[1] M.F. Ashby: *Materials Selection in Mechanical Design,* Pergamon, 1992.

subensamble) en una individual. Considere la facilidad de producción "producibilidad", de inspección "inspeccionabilidad" y de ensayos "ensayabilidad". El costo de estas funciones puede exceder, por un amplio margen, el costo del material inicial. Establecer los criterios de aceptación y de rechazo. Se verá que algunos procesos no son adecuados para piezas por debajo o por encima de ciertos tamaños, o que no es factible producir paredes muy delgadas o muy gruesas y que un proceso que puede ser económico para pocas piezas puede no resultar competitivo en la producción en masa.

8. Optimizar el diseño afinando interactivamente los pasos del 2 al 7. Considere las implicaciones en el costo total; aunque un material puede cumplir la función que se requiere, también puede presentar sustanciales dificultades de manufactura. Las restricciones mutuas impuestas por los materiales y procesos las toma en cuenta Dieter.[2]

9. La producción industrial ha generado y continúa generando cantidades enormes de materiales de desperdicio. Su eliminación es cada vez más difícil y también existe un deseo genuino de ahorrar los limitados recursos de la Tierra. Por ello, se están haciendo serios esfuerzos para reducir, reutilizar o reciclar materiales.

10. En tiempos y lugares diferentes, algunas otras consideraciones asumen una importancia absoluta. Por ejemplo:

a. La energía que se consume en la manufactura varía enormemente para distintos materiales (tabla 5-1). Esto siempre es una consideración importante pero, en tiempos de escasez de energía, puede ser crítica.

Tabla 5-1 Datos de producción y consumo de energía para materiales selectos de manufactura*

	Producción mundial, 10^6Mg†		Consumo de energía, MJ/kg	
Material	**1972**	**1994**	**De mena**	**De chatarra**
Hierro (acero)	634	750	35	14
Aluminio	11	19.4	240	13
Cobre	7	11.5	120	20
Zinc	5.2	7.1	70	20
Plomo	3.6	5.4	30	10
Níquel	0.6	0.9	150	16
Magnesio	0.26	0.34	380	10
Titanio	0.06	0.1	550	
Plásticos		130	170	
Madera contrachapada			10	

* De varias fuentes.
† Mg = 1 000 kg = tonelada métrica = 2 200 lb.

[2] G.E. Dieter, Jr.: *Engineering Design: A Materials and Processing Approach,* 3a. ed., McGraw-Hill, 1999.

b. Muchas materias primas sólo se encuentran en algunas partes del mundo. Su abastecimiento puede hacerse crítico en periodos de agitación política, por lo tanto su sustitución requerirá diferentes consideraciones para el diseño y la manufactura.

Ejemplo 5-1

El proyecto de carrocería automotriz de acero ultraligero (USLAB) es representativo de la ingeniería concurrente en el sentido más estricto. Las intensas presiones competitivas para la construcción con aluminio, plásticos y marcos espaciales incitó a un consorcio de 35 compañías de la industria del acero de 18 naciones a demostrar la factibilidad de desarrollar una carrocería que ahorrando peso, excediera el desempeño de las ya existentes, se manufacture sin la necesidad de desarrollar una nueva tecnología, e hiciera todo esto con un costo potencialmente menor. La Porsche Engineering Services, Inc. fue contratada para realizar la administración de la ingeniería y la manufactura. Los usuarios (compañías automotrices) fueron consultados desde el inicio, y se estableció una línea base tomando puntos de referencia de 32 automóviles tipo sedán mediano de cuatro puertas provenientes de todo el mundo. Los puntos de referencia estructurales se basaron en nueve automóviles seleccionados. La meta era exceder no sólo los puntos de referencia actuales, sino también proyectar una estructura mejorada. Los productores de acero y los ingenieros de manufactura trabajaron con los diseñadores para encontrar la solución óptima. Se usó la simulación por computadora extensivamente para la optimización del diseño, la simulación de impacto y la simulación del formado del metal. La estructura final contenía 94 piezas importantes (en total, 158 piezas contra las más de 200 en las estructuras existentes). Todas las piezas se construyeron y ensamblaron por medio de soldadura para probar la posibilidad de su manufactura. Regresaremos a estos aspectos en capítulos posteriores. Los prototipos físicos se ensayaron para validar el desempeño del modelado estático y dinámico. Los criterios de desempeño se cumplieron completamente o se excedieron (la rigidez a la torsión y flexión se incrementaron y se mejoró la respuesta a la vibración) con una masa significantemente menor, como se muestra abajo:

	Estructura de referencia	Estructura futura de referencia	Estructura USLAB
Rigidez estática por torsión, N · m/grado	11 531	13 000	20 8000
Rigidez estática por flexión, N/mm	11 902	12 200	18 100
Respuesta a la vibración (primer modo de la estructura de la carrocería), Hz	38	40	60
Masa, kg	271	250	203

(*Fuente*: *UltraLight Steel Auto Body Final Report*, American Iron and Steel Institute, Washington, D.C., 1998.)

Ejemplo 5-2

Las defensas de los automóviles son otro ejemplo de cómo los gustos cambiantes y los requisitos de funcionalidad han afectado el diseño y la manufactura. Los automóviles de los años cincuenta tenían defensas relativamente pesadas estampadas de acero, chapadas con cromo para protección contra la corrosión y reflectividad máxima. Tenían una forma compleja que cubría completamente la parte frontal, la cual algunas veces incorporaba rasgos elevados para las luces de dirección, por lo que las dificultades en su manufactura eran sustanciales. Las defensas se colo-

caban al bastidor del automóvil a través de soportes rígidos que transmitían la fuerza del impacto más pequeño al chasis. Las defensas de los automóviles actuales son estructuras complejas completamente diferentes. Con base en el cambio en los gustos, ahora tienen una capa superficial de plástico para tener durabilidad y están coordinadas con el color de la carrocería para crear un atractivo visual. Para que tengan resistencia al impacto, el plástico comúnmente está respaldado por una pieza estampada de metal (acero o aleación de aluminio) de forma relativamente simple, que a su vez se coloca en la carrocería a través de dispositivos de absorción de energía, diseñados para minimizar el daño en choques pequeños. De esta forma, el diseño ha cambiado para satisfacer las exigencias estéticas, ofrecer protección superior y durabilidad, así como para reducir los problemas de manufactura.

5-2 TIPOS PRINCIPALES DE MATERIALES EN INGENIERÍA

La manufactura, en el sentido que se usa aquí, está involucrada con piezas y ensambles hechos de materiales capaces de soportar cargas o cumplir con otras funciones técnicas (conducir electricidad, aislar, etcétera), como se analizó en el capítulo 4. Así, nuestro libro se enfoca en la transformación de materias primas en artículos usables. La mayor parte de estos materiales son productos de previas operaciones de manufactura (*procesos primarios*). La materia prima con frecuencia se puede obtener a través de una variedad de rutas alternas, algunas de ellas mucho más cortas que otras. Sin embargo, sería demasiado apresurado concluir que los procesos más complejos son necesariamente los más costosos. Con mucha frecuencia la economía es un asunto de escala; así, se puede comprar acero en lámina a un precio menor que en polvo, en parte debido a las vastas cantidades que se producen en forma de lámina.

5-2-1 Metales

Los metales aún son los materiales de ingeniería que más se utilizan en general, y el crecimiento de su producción (especialmente el del acero) con frecuencia se ha tomado como un indicador del desarrollo industrial. Con la creciente complejidad de muchos productos y ante el crecimiento de los plásticos y de los dispositivos microelectrónicos, estas relaciones ya no son válidas, particularmente en las naciones industrializadas. En Estados Unidos, el consumo del acero declinó desde 1950 por unidad del PIB, y desde 1980 incluso per cápita. El acero todavía representa una porción abrumadora de la producción total de metal (tabla 5-1), pero otros metales ofrecen propiedades únicas y son indispensables. De esta forma, la baja densidad del magnesio y la alta razón de resistencia por masa del titanio han llevado a incrementar su uso, a pesar del alto requerimiento de energía.

Las menas, usualmente de óxidos o sulfuros, son las principales fuentes de metales. Se usan varias técnicas para enriquecerlos y hacerlos más adecuados para procesamientos posteriores. Por lo tanto, los metales se extraen a gran escala, en plantas dedicadas a ello, con diferentes métodos (Fig. 5-2).

1. En la *pirometalurgia* las menas se reducen con carbono (coque, aceite o gas) en hornos (*fundición*). Por ejemplo, los minerales de las menas se cargan en altos hornos

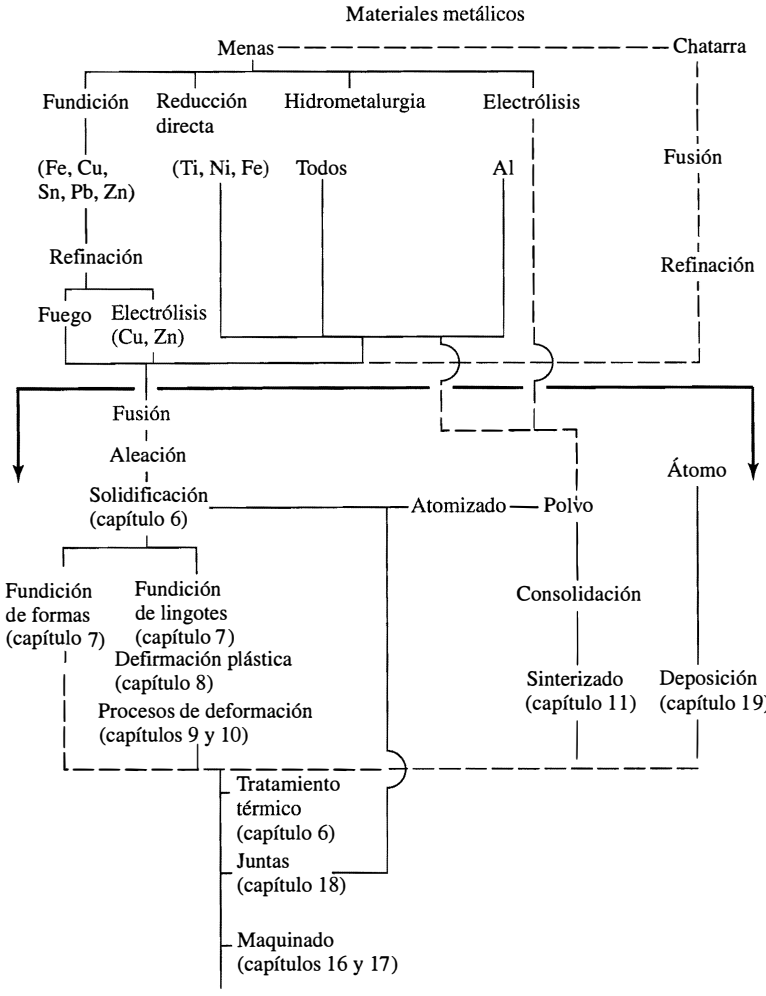


Figura 5-2 Los productos metálicos se hacen a través de una secuencia de pasos preparatorios, no analizados en este libro, y de procesos subsecuentes en los cuales se producen piezas de ingeniería. Estos procesos, que se muestran debajo de la línea gruesa, son el tema de nuestro interés.

con coque y fundentes (principalmente caliza) para producir *arrabio* de alto carbono y escoria. Por lo general la producción excede un millón de toneladas por año por horno. Las impurezas se pueden remover a través del *refinado por fuego*; en el caso del hierro, soplando oxígeno a través del arrabio fundido en un horno básico de oxígeno. Otros metales, principalmente el cobre y el zinc, a menudo se refinan por electrólisis (*electrorrefinado*), en que el metal impuro forma el *ánodo* y uno de alta pureza se deposita en el *cátodo*.

2. La *reducción directa* (sin fusión) de algunas menas produce un polvo de alta pureza.

3. La *hidrometalurgia* involucra la disolución (*lixiviación*) de la mena en un ácido. El metal se puede *precipitar* o depositar en un electrodo (*extracción electrolítica*). Las menas de grado bajo y las pilas de escoria se pueden lixiviar en el sitio.

4. La *electrólisis* de una fusión de temperatura elevada también produce metal relativamente puro pero en forma líquida, como en la electrólisis de la alúmina (obtenida de la bauxita) para producir aluminio.

Un atributo importante de los metales es que se pueden reciclar sin degradación de sus propiedades, pero el valor de la *chatarra* depende enormemente de la calidad. Como se muestra por medio de las líneas discontinuas en la figura 5-2, la chatarra altamente mezclada o contaminada puede requerir que se pase por toda la secuencia de producción con las menas; la chatarra menos contaminada puede sólo necesitar refinamiento, y la que está separada cuidadosamente puede ser un sustituto de metal nuevo (virgen).

Ejemplo 5-3

El cobre ha sido un metal clave por milenios (tabla 1-1), pero otros materiales competitivos han incursionado en muchas aplicaciones tradicionales. Así, el aluminio ha remplazado al cobre en las líneas de alta potencia y en muchos cambiadores de calor; las fibras ópticas lo han sustituido para la transmisión de señales. No obstante, su uso está creciendo, incluso en automóviles, debido al incremento de servomotores instalados. Un 60% del consumo total proviene de la chatarra reciclada, con un ahorro considerable de energía. El consumo específico de energía en MJ/kg es: 110 de la mena (minada, concentrada, fusionada, refinada); 50 de chatarra aleada (refinada por fuego y electrólisis); 20 de chatarra de Cu (electrorrefinada y refusionada). Así, el consumo de energía es considerablemente mayor si es necesario que la chatarra se introduzca en etapas más tempranas del ciclo completo. (Datos de K. Gluckmann, *CIM Bulletin*, **85**(3), 1992: 150-156.)

Estaremos interesados únicamente en el procesamiento subsiguiente de los metales, el cual se muestra en la figura 5-2 debajo de la línea gruesa horizontal.

Los metales puros tienen aplicaciones específicas (por ejemplo, el Cu o Al para alambre de conducción), pero las aleaciones se usan con mayor frecuencia. La mayoría de las aleaciones se procesa por la ruta de fusión: algunas se fundirán en partes de forma compleja (Cap. 7), pero la mayor parte se funde en formas sencillas (Cap. 7) que son adecuadas para el procesamiento por deformación (Cap. 9). Las forjas resultantes, los perfiles de construcción, el alambre, el tubo o la lámina se pueden usar directamente, pero algunas se deformarán aún más (Cap. 10) en formas más complejas, como los paneles de carrocería automotrices o las latas para bebidas.

Una ruta completamente diferente se sigue cuando el *polvo* de metal (ya sea de procesos primarios o de "atomización" de una fusión) se consolida (Cap. 11). En otro enfoque, los átomos (o más bien, los iones) se depositan de manera controlada para hacer *recubrimientos* o partes *electroformadas* (Cap. 19).

Los productos pueden estar sujetos a las mejoras de sus propiedades por medio de un tratamiento térmico (Cap. 6). El maquinado (Caps. 16 y 17) crea características especiales de la forma, y mejora las tolerancias dimensionales y el acabado superficial

Tabla 5-2 Propiedades de materiales metálicos a temperatura ambiente

Material		Densidad,	*E*,	YS,	TS,	el.,
Designación	**Composición**	**g/cm³***	**GPa**	**MPa**	**MPa**	**%**
AM60B	Mg-6A1-0.3Mn	1.8	45	130	220	6
	Be-38A1	2.1	200	190-310	260-380	7-2
A1100	99.5% Al	2.71	70	35-150	90-165	35-5
A7075-T6	A1-5.5Zn-1.6Cu-2.5Mg	2.8	70	105-500	230-570	17-11
	Ti-6A1-4V	4.43	120	920	1 000	16
AC41A	Zn-4A1-1Cu-0.04 Mg	6.6			330	7
AISI 1008	Fe-0.08C	7.87	200	160-700	260-700	45-2
AISI 4140	Fe-0.4C-1Cr-0.2Ni	7.82	200	420-1 700	650-1 900	25-8
AISI 304	Fe-0.08C-19Cr-9Ni	7.9	193	205-2 000	515-2 200	
Hierro fundido gris	Fe-3C-2Si, tensión	7.15	N.D.†	N.D.†	150-430	0.5
	Compresión				570-1 300	
C10100	99.99% Cu	8.9	130	70-365	220-255	55-4
C26000	70Cu-30Zn latón	8.53	110	75-450	300-900	66-3
	Ni	8.9	205	110-620	340-660	50-4
	W (a 500°C)	19.3	405	110	300	50

Fuente: De varias fuentes, principalmente *ASM Handbook*, vols. 1 y 2; *Properties and Selection*, ASM International, 1990 y 1991.
* Idéntico a Mg/m^3 (multiplique por 1 000 para obtener kg/m^3).
† No obedece la ley de Hooke.

de las partes fundidas o trabajadas, también se puede usar para producir partes empezando directamente de preformas simples.

Todos estos procesos no sólo definen la forma, las dimensiones y el acabado superficial deseados, sino que también afectan las propiedades del material. En la tabla 5-2 se da una idea de la enorme gama de propiedades mecánicas a temperatura ambiente que se pueden obtener. Cambiar la composición (por medio de aleación) no es la única forma de modificar las propiedades; note que, para una composición dada, las propiedades pueden tener un intervalo amplio, en función del proceso de manufactura. De esta forma, muchas aleaciones se pueden tratar para asegurar, por ejemplo, una resistencia específica elevada: esto es la causa del extenso uso de las aleaciones de aluminio en aeronaves, del acero tratado térmicamente o de las aleaciones de titanio para componentes altamente esforzados, así como de las aleaciones de magnesio donde la masa es de interés fundamental. También note que algunos materiales son mucho más fuertes en compresión que en tensión (*véase* la Secc. 4-3). Una extensión de datos a temperaturas elevadas mostraría un intervalo expandido de posibilidades. Uno de los objetivos del presente libro es mostrar cómo se pueden lograr dichos cambios en forma controlada. Las propiedades mecánicas no son los únicos atributos de importancia (Cap. 4), así que otras consideraciones —como la resistencia a la corrosión— pueden ser esenciales en la elección del material e influirán en la manufactura.

Ejemplo 5-4

Las aleaciones de aluminio-litio se han investigado desde hace mucho tiempo, porque el Li reduce la densidad e incrementa el módulo elástico. Fue necesario desarrollar técnicas especiales de procesamiento para permitir el desarrollo de aleaciones con resistencia elevada, resistencia a la fatiga, y tenacidad en temperaturas criogénicas. Así, éstas se usan en la industria aeroespacial. Por ejemplo, en un tanque de hidrógeno líquido de 47 m de longitud y 8.4 m de diámetro para el nuevo Trasbordador Espacial, se reduce el peso en 3 400 kg. [*Fuente*: P.S. Fielding y G.J. Wolf, *Adv. Mater. Proc.*, 1996(10): 21-23.]

5-2-2 Cerámicos

Los *cerámicos* son materiales inorgánicos. Los más frecuentes son los óxidos metálicos, los boruros, los carburos y los nitruros. Se caracterizan por su baja densidad y su alta resistencia a la temperatura elevada, a las que siempre se procesan. Algunos se basan en materias primas presentes en la naturaleza y se procesan sobre todo en productos con base de arcilla, como ladrillos, tejas y azulejos, servicios de mesa, etcétera. Estos *cerámicos tradicionales* se producen en vastas cantidades. Nuestro interés son principalmente los *cerámicos de ingeniería*, o *cerámicos estructurales avanzados*, derivados de materias primas procesados o que se fabrican especialmente (Fig. 5-3). A menudo reúnen requisitos críticos tales como rigidez, tenacidad, resistencia a temperatura baja o elevada, resistencia a la abrasión y a la corrosión. Así, se usan como herra-

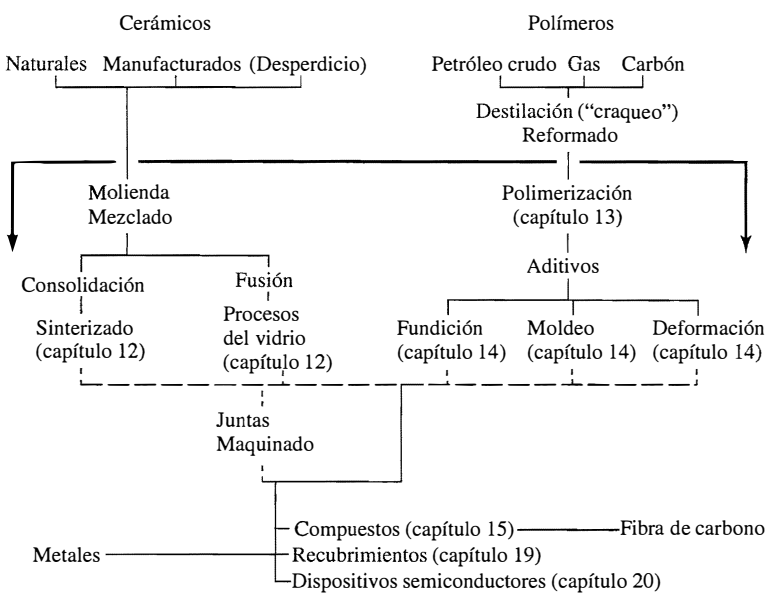


Figura 5-3 El procesamiento de cerámicos y polímeros incluye pasos preparatorios, pero el énfasis de nuestro análisis está en los procesos subsecuentes, que se muestran debajo de la línea gruesa, y cuyo objetivo es la producción de piezas de ingeniería.

Tabla 5-3 Propiedades de cerámicos selectos de ingeniería

Material	Densidad, g/cm³	*E* (tensión), GPa	Resistencia a la tensión, MPa	Resistencia a la compresión, MPa	Módulo de flexión, MPa	Tenacidad de fractura, MPa · m$^{1/2}$
SiO_2 fundida		73	70	700-1 400	100	
Al_2O_3	3.96	380	310	3 800	300-1 000	2.7-4.2
Si_3N_4	3.18	304	580	> 1 200	400-1 000	5-7
Circonia, PS	5.75	210	460	1 760	630	9
Vidrio (vidrio-E)	2.5	75	500-5 000	1 200	55	0.9
Vidrio cerámico	2.7	60-140		120-560	60-100	1.6-2.4
Porcelana para bajo voltaje	2.3	48	10-17	170-350	25-40	1
Porcelana de circonia	3.6	140-210	70-100	550-1 050	140-240	

Fuente: De varias fuentes, principalmente *Engineered Materials Handbook Desk Edition*, ASM International, 1995.
Las propiedades varían ampliamente con el método de manufactura.

mientas de corte, componentes de motores y productos para la industria química. Como son frágiles, con frecuencia se caracterizan por su tenacidad a la fractura (tabla 5-3); asimismo, muchos diseños se basan en el tratamiento estadístico. Un propósito fundamental del desarrollo del proceso de manufactura es estrechar la dispersión de las propiedades (Cap. 12).

Los *vidrios* forman una clase especial de cerámicos, ya que primero se funden y luego se forman por medio de varias técnicas (Cap. 12). Si bien las mayores cantidades de vidrio se encuentran en aplicaciones tradicionales como en ventanas, botellas y bombillas de lámparas, cantidades más pequeñas de vidrios especiales tienen funciones vitales en recipientes resistentes a la corrosión, aislantes eléctricos, etcétera. El vidrio es el único cerámico que se puede reciclar en grandes proporciones.

Las fibras de carbono y grafito no son verdaderamente cerámicos, pero tienen el módulo elástico elevado y la resistencia a la temperatura (pero no a la oxidación) de los cerámicos.

5-2-3 Plásticos

Los *plásticos* son productos en los cuales los *polímeros* (Cap. 13) son los ingredientes principales. Muy frecuentemente los polímeros se basan en un eje principal de carbono y son moléculas orgánicas de peso molecular muy grande, derivados del petróleo, gas o carbón (Fig. 5-3). Algunos de ellos se pueden usar solos, pero la mayor parte también contiene rellenos, estabilizadores, plastificantes, colorantes y otros aditivos. Con base en el método de manufactura, se clasifican en *termoplásticos* y termofijos. Todos se caracterizan por una baja densidad. Su resistencia relativamente baja a la temperatura (tabla 5-4) ha limitado por mucho tiempo su aplicación en la ingeniería; pero los *plásticos avanzados de ingeniería* se pueden emplear en aplicaciones de soporte de carga y

Tabla 5-4 Propiedades de plásticos selectos de ingeniería

Material	Densidad, g/cm³	*E* (tensión), GPa	TS, MPa	Resistencia a la flexión, MPa	Resistencia al impacto, J/m	el., %
Termoplásticos						
ABS	1.05	1.8-2.5	20-70	55-75	50-400	1-45
HDPE	0.96	1.1	20-35		20-200	10-1 200
Nailon 6/6	1.14	1.6-3.8	55-95	110	30-60	10-130
30% vidrio	1.2-1.4	9	170	280	85-240	2-30
Policarbonato	1.2	2.3	60-75	75-105	650-850	110-125
PET	1.56	9	60-160	240	100	
30% vidrio	1.68	8.9	150	235	95	2
PMMA	1.18	2.2-3.3	60-70	110	20	2-5
Temofraguados						
Poliéster (vaciado)	1.22	2.8-3.5	40-75	85-130		1.5-3.5
40% vidrio	1.60	5.5-11.5	125-195	160-240	570-640	3
Epóxico	1.22	2.7-3.4	40-80	100-130	70-210	1.2-5.7
Fenólicos	1.36	0.8	30-60			
Rellenos	1.3-2.1	7-21	100-120	70-140	15-800	
Poliamida	1.32	3.9	40	175	53	

Fuente: De varias fuentes, principalmente *Engineered Materials Handbook Desk Edition*, vol. 2, *Engineering Plastics*, ASM International, 1988.

se han hecho competitivos con los metales. Como se pueden formar en piezas de forma compleja con cierta facilidad, se están introduciendo cada vez más en los mercados de los materiales tradicionales. Actualmente la producción total de plásticos ha sobrepasado, con base en el volumen, a la producción de metal (Fig. 5-1), aunque gran parte se encuentra en bienes de consumo que en su mayoría son desechados (y no reciclados con frecuencia) después de su uso. Una clase especial de materiales no metálicos son los *elastómeros*, los cuales tienen la capacidad de deformarse en gran medida y de regresar a su forma original después que se remueve la carga.

Ejemplo 5-5

En muchas aplicaciones, los plásticos compiten con los metales. La razón para el cambio se debe a menudo al potencial para sustituir ensambles complejos con menos piezas que tengan forma más compleja. Por ejemplo, la ingeniería concurrente permitió que Ford Motor Company reemplazara un módulo frontal de un automóvil, hecho de 22 piezas de lámina, con dos piezas de plástico hechas de un compuesto para moldeo de láminas, con lo cual se ahorró 22% en masa y 14% en el costo de ensamble. [Fuente: *Manufacturing Engineering*, 1992(11):71.]

5-2-4 Estructuras compuestas

Con frecuencia la elección del material es el arte de hacer compromisos, puesto que pocos materiales pueden reunir todos los requisitos. Algunas veces las propiedades óp-

Tabla 5-5 Propiedades de compuestos selectos*

Material	Densidad, g/cm³	*E* (tensión), GPa	TS, MPa	Resistencia a la compresión, MPa	Tenacidad, MPa · m$^{1/2}$	Resistencia a la flexión, MPa
Epóxico	1.2	3	40			
Con fibra axial de Kevlar	1.4	76	1 400	280		
Poliéster (vaciado)	1.35	2	50	85		
Con fibra de vidrio axial	1.7	28	580	490		
Con tela de vidrio	1.7	12	180	220		
6061 Al	2.7	69	300			
41% fibra de C	2.44	320	620			
50% SiC	2.93	230	1 480			
380 Al, 24% Al_2O_3		120	340			
Vidrio						
10% Si_3N_4 filamentos					6.5-9.5	400-500
C con 55% fibra HTU†		125	600	285	70	1 250-1 600
55% fibra HMS‡		220	575	380	20	850-1 000

* Las propiedades dependen en gran medida de la orientación de las fibras y del método de manufactura.
† HTU = resistencia elevada a la tensión, fibra con superficie sin tratar.
‡ HMS = módulo elevado, fibra tratada superficialmente.

timas se pueden aproximar combinando dos o más materiales químicamente diferentes, en forma tal que los beneficios se retienen pero se evitan las limitaciones. Por definición, existe una interfase marcada entre los componentes, los cuales pueden ser metálicos, cerámicos o poliméricos (Fig. 5-3).

Compuestos Por convención, este término se aplica a las estructuras en las cuales uno de los componentes (comúnmente fibras o partículas) está rodeado por una matriz continua del otro componente (Cap. 15). La matriz puede ser polímero, metal, cerámico o carbono. La información en la tabla 5-5 indica el panorama de mejoramiento potencial.

Tratamientos superficiales Su objetivo es impartir propiedades especiales a la superficie (o a la región cercana a ella) de una pieza. Algunos son aplicaciones de técnicas tradicionales, por ejemplo el endurecimiento superficial por medio de un tratamiento térmico (Cap. 6); la deposición de sobrecapas resistentes al desgaste por medio de soldadura (Cap. 18); el vidriado de una tina de baño de acero (Cap. 15), o el galvanizado de lámina metálica (Cap. 10). Más específicamente, el término tratamiento superficial se aplica a procesos especiales (Cap. 19), frecuentemente relacionados con la manufactura de dispositivos semiconductores.

Dispositivos semiconductores Son estructuras compuestas demasiado complejas (Cap. 20), en las cuales semiconductores especiales se combinan con metales, cerámicos y plásticos en dispositivos capaces de realizar una gran variedad de funciones, tales como conducción, aislamiento y almacenamiento eléctrico, y emisión y recepción de luz.

5-2-5 Uniones

La mayoría de las piezas hechas por cualquiera de las técnicas arriba mencionadas se ensamblan después en estructuras más grandes y complejas. El proceso de ensamble mismo es un tema especializado que está más allá del alcance de nuestra investigación; pero las uniones que mantienen el ensamble están dentro del dominio de los procesos unitarios (Cap. 18).

Las uniones no permanentes hacen el desensamble fácil. Todos estamos familiarizados con las uniones a presión, especialmente para las partes plásticas, y con juntas atornilladas para las partes hechas de cualquier material. La durabilidad de esas uniones es en gran parte una función del diseño y de los procesos de manufactura.

Las uniones permanentes se diseñan para permitir que el ensamble se comporte como una sola parte. Están hechas por medio de técnicas derivadas de otros procesos de manufactura, como la solidificación de aleaciones o la polimerización de polímeros.

5-3 ASPECTOS AMBIENTALES

En el transcurso de muchos siglos, los humanos hemos explotado a menudo los recursos limitados de la Tierra, y al hacerlo hemos colocado una enorme carga sobre el ambiente en forma de contaminación del aire, del agua y del suelo. En las últimas décadas ha habido un incremento en la conciencia sobre las consecuencias dañinas, y esto ha conducido a nuevos enfoques tanto en el diseño como en la manufactura, lo cual se ha denominado colectivamente como *ingeniería verde*.

5-3-1 Impacto en el diseño

Las iniciativas para un diseño ambientalmente responsable se han desplomado con frecuencia por una visión demasiado estrecha, y limitada a la consideración del consumo de energía. Actualmente se reconoce que el impacto de un producto debe evaluarse de principio a fin. En un automóvil, por ejemplo, el costo e impacto de operación del vehículo se debe sumar al costo e impacto de la producción de materias primas, al de la manufactura y al de la eliminación. Esto se hace de manera formal con el *análisis del ciclo de vida* (ACV), una tarea muy exigente que requiere un conteo exacto de todas las entradas y salidas del sistema (Fig. 5-4). El resultado es demasiado sensible a las suposiciones sobre los procesos y métodos de manufactura, y al método y la eficiencia en el control de la contaminación; incluso puede depender de la localización geográfica. En un lugar con un bajo costo de la gasolina, el gasto inicial (materia prima y costo de manufactura) pesará mucho más que el de operación, aunque el costo de la contaminación permanece igual.

Ejemplo 5-6

El nuevo enfoque para el diseño lo ejemplifica la Asociación para una Nueva Generación de Vehículos (PNGV), formada en 1993 por el gobierno de Estados Unidos, Chrysler, Ford, Gene-

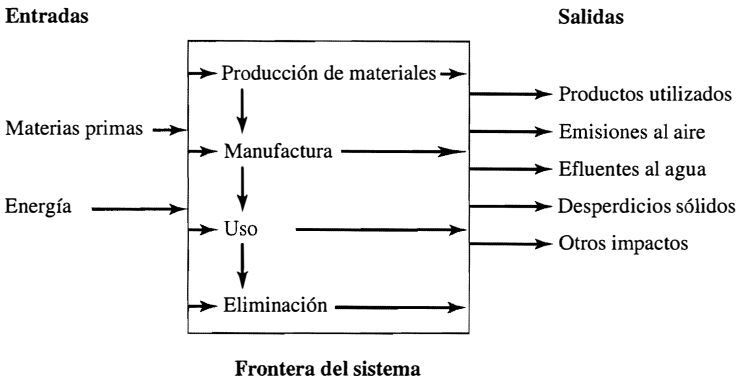


Figura 5-4 El análisis del ciclo de vida evalúa el impacto que tiene un producto manufacturado sobre el ambiente. Abarca toda la vida del producto, desde la materia prima y el consumo de energía, su manufactura, y hasta el uso y eliminación. (*Según J.L. Sullivan y S.B.Young, Adv. Mater. Proc., Feb. 1995:37-40. Se reproduce con autorización de la ASM International.*)

ral Motors, varias universidades, laboratorios y empresas. Su propósito es desarrollar un automóvil de tamaño medio que, comparado con un vehículo de 1993, sólo use un tercio de combustible (3L/100 km u 80 mpg), tenga el mismo desempeño, cumpla todos los requisitos de seguridad y de emisiones, sea 80% reciclable, y cueste lo mismo. El medio principal para lograr estos objetivos es reducir la masa del vehículo 40%. El proyecto USLAB (ejemplo 1-5) es una ramificación de éste, y a través de nuestro libro se verán otros ejemplos de contribuciones potenciales de la manufactura. En el capítulo 22 se agrupan algunas de las soluciones.

5-3-2 Impacto en la manufactura

No se puede negar que la manufactura es un usuario principal de los recursos y un contribuyente importante a la contaminación. No hace mucho tiempo los hornos industriales arrojaban humo espeso, cargado con compuestos tóxicos; los subproductos líquidos se descargaban en los ríos; los sólidos se depositaban en el terreno y se abandonaban. Todo ello ha cambiado en las últimas décadas, especialmente en las naciones industrialmente desarrolladas, donde la proliferación de leyes locales y nacionales ha forzado o implantado medidas para detener la contaminación. Se han fijado límites a los contaminantes peligrosos del aire (CPA), a los compuestos orgánicos volátiles (COV), y a los compuestos de nitrógeno-oxígeno (NO_x); asimismo, a menudo se exigen tecnologías de control máximo ejecutable (TCME). La Organización Internacional para la Normalización ha desarrollado la serie ISO 14000 de Normas para Sistemas de Administración Ambiental. Al igual que las normas ISO 9000 (Secc. 21-3-1), tienen como objetivo promover un mejoramiento continuo. También son disposiciones de acatamiento voluntario, aunque se puede esperar que las presiones competitivas aseguren el cumplimiento mundial. La culminación de todos estos esfuerzos es lo que con frecuencia se llama *manufactura verde*.

Ejemplo 5-7

El estado de Wisconsin (EU) prohibió el llenado de terrenos o quemado de recipientes desde el 1 de enero de 1995. En respuesta, John Deere's Horicon Works cambió de cajas de papel corrugado a recipientes retornables para el envío de sus piezas. Como resultado, las piezas están mejor protegidas, se ha mejorado el seguimiento del inventario, disminuyeron los costos de transporte, se mejoró la salud y la seguridad en la planta, y se detuvo el relleno de terrenos y la incineración de cajas. [*Fuente*: S.L. Buchholz, *Manufacturing Engineering*, 1993(10):136.]

5-4 RECICLAJE

Los materiales siempre han sido reciclados, simplemente por economía. Sin embargo, existen presiones adicionales. Los sitios de relleno son difíciles de encontrar, y el costo de desecho se incrementa. Algunos productos y muchos derivados de la manufactura se clasifican como materiales peligrosos que requieren un tratamiento o una contención especial y costosa. Las legislaciones local y nacional fijan límites para los métodos de eliminación. El ejemplo más vívido es Alemania, donde se exige que el fabricante recoja los artículos una vez que el consumidor no los usa. De esta forma, existen presiones que incrementan la necesidad de reciclar.

5-4-1 Metales

Como se indicó en la sección 5-2-1, los metales se pueden reciclar sin degradación de sus propiedades, aunque la ruta de reciclado depende en gran medida de la calidad de la chatarra. Como el reciclaje tiene una larga historia, el comercio ha desarrollado un sistema elaborado de clasificación para distintos grados. Para nuestro propósito, existen algunos grados con propiedades distintas:

1. La *chatarra nueva* (*en proceso, doméstica, del lugar*) se genera en el proceso de manufactura mismo. Se mantiene totalmente separada y es un sustituto para el metal puro. No obstante, se deben hacer todos los esfuerzos para minimizarla, puesto que su generación y reciclado involucra energía, trabajo y otros costos. Así, nuestro objetivo será maximizar el rendimiento de los procesos de manufactura.

2. La *chatarra segregada* consiste en devoluciones de procesamientos posteriores. Un ejemplo característico son los recortes de talleres de prensado y las virutas de talleres de maquinado. Si se segregan cuidadosamente, son de igual valor que la chatarra nueva. Las latas de bebidas constituyen una clase especial de chatarra segregada posterior al consumo. Sólo en Norteamérica se producen casi 110×10^9 latas de aluminio [que ascienden a $1\,300 \times 10^9$ g o 1.3 millones Mg (toneladas métricas) de metal], de los cuales más del 50% se reciclan. Como se conoce su composición, pueden ser tratadas como una clase especial de chatarra mezclada (véase la Secc. 7-4-1).

3. La *chatarra mezclada* consiste en devoluciones de plantas de procesamiento posterior que no mantienen las aleaciones completamente separadas. Incluye talleres

de prensado que mezclan lámina sin tratar y galvanizada, y otros que mezclan todos los aceros o todas las aleaciones de aluminio.

4. La *chatarra vieja* (*chatarra posterior al consumidor*) es de componentes desechados de composición desconocida. Las virutas mezcladas de los talleres también están en esta categoría.

Los procesos para tratar los varios grupos de chatarra dependen del metal y se pueden ilustrar en el ejemplo del reciclaje de automóviles.

Ejemplo 5-8

Un vasto número de automóviles termina en desmanteladoras automotrices (ya no sólo "deshuesaderos"). Los componentes en buenas condiciones se remueven para su reventa, una de las formas más importantes de reúso. A las baterías se les drena el líquido y el plomo se vende: se puede refinar fácilmente. Las llantas se eliminan; a menos que se encuentre un uso especial para ellas (como su adición en el asfalto para la construcción de caminos), no tienen valor y son sintomáticas de los problemas que en general presentan los polímeros. Se remueven los arneses de alambres; se quema el aislante —un proceso en donde se debe controlar la contaminación—, y el alambre, el cual siempre es muy puro, se puede agregar a una fusión o a una carga de refinación. Los radiadores de latón tienen soldadura de Pb-Sn y se fundirán al igual que las menas. Los convertidores catalíticos, con sus valiosos componentes, se retiran. Se quitan los cambiadores de calor de aluminio, se recuperan los fluorocarbonos del sistema de aire acondicionado, y se vende el metal. Se remueve el bloque del motor, se drena y se aplasta en un martinete. La clasificación magnética y manual separa el hierro fundido, que se vende a las fundidoras. El aluminio se funde en grandes bloques (lingotes) o se vende a procesadores cuyos fundidores secundarios producen aleaciones cuidadosamente controladas para la industria de la fundición, en forma de lingotes o metal líquido transferido de manera directa al taller de fundición. La carrocería se desgarra por la rotación lenta de rodillos y el material desgarrado se comprime en un martinete. Separados de esta forma, los materiales ferrosos se retiran por electroimanes. Sopladores grandes remueven el material más ligero como vidrio, plásticos, alfombra, etcétera, como *pelusa* o *residuo automotor desgarrado* (RAD); ya que éste sólo puede ser reprocesado a gran costo, con frecuencia se tira en un terreno y representa una carga financiera. Los materiales no ferrosos restantes se venden para su clasificación y reciclaje. Actualmente, los metales regenerados costean toda la operación y subsidian la eliminación del RAD.

5-4-2 Cerámicos

El reciclaje de materiales durante el proceso se analizará en el capítulo 12. Los cerámicos horneados se pueden triturar y usar en cantidad limitada como sustituto de los materiales de inicio.

El vidrio se produce a través de la etapa de fusión, de aquí que pueda ser, y es, extensivamente reciclado. El desperdicio después de su uso por el consumidor, principalmente en forma de recipientes no retornables, reemplaza las materias primas y puede ahorrar cerca del 3% de energía por cada 10% de desperdicio en la carga. Sin embargo, involucra un esfuerzo sustancial para clasificarla por color, y los contaminantes (anillos de metal, etiquetas de papel, etc.) se deben remover por medio de técnicas similares a las que se usan para los minerales.

5-4-3 Plásticos

A partir de un inicio modesto, el reciclaje de plásticos ha crecido continuamente, pero aún está muy por detrás del de los metales. La segregación de varias clases es crítica y determina el proceso:

Reciclado primario El desperdicio termoplástico en el lugar se apila y se suma a materiales nuevos (vírgenes) para su procesamiento.

Reciclado secundario Incluye la separación mecánica de acuerdo con el tipo de polímero, seguida de la trituración, el lavado, y el regreso a la aplicación original. Un problema es la multitud de plásticos. Para los bienes de consumo, la clasificación se apoya en moldear en el producto los números de código (tabla 5-6) de la Sociedad de las Industrias del Plástico (SPI), pero cada vez más se usan líneas automáticas de clasificación con rayos x o detectores infrarrojos. Más de la mitad de las botellas de PET (teraftalato de polietileno) y una porción significativa de HDPE (polietileno de alta densidad) se reprocesan. Varias organizaciones han desarrollado sistemas de codificación de mayor extensión (Society of Automotive Engineers J1344, ISO 1043, etc.). El desperdicio mezclado se tritura y procesa en productos de "madera plástica" de menor valor.

Reciclado terciario Los plásticos producidos por polimerización de crecimiento en etapas se pueden descomponer térmica o químicamente, y se usan como materia de alimentación para la polimerización o como combustible.

Reciclado cuaternario No es un reciclaje real: el desperdicio se incinera para recuperar su contenido de energía. La cantidad de energía recuperada depende del plástico;

Tabla 5-6 Códigos de reciclaje para plásticos comerciales

Código	Abreviación	Nombre del polímero	Uso del material nuevo	Productos reciclados
1	PETE	Teraftalato de polietileno	Recipientes de bebidas, botellas	Fibra de relleno, botellas de refrescos, esquíes, botes
2	HDPE	Polietileno de alta densidad	Recipientes de bebidas, juguetes	Tuberías de drenaje, tambos para reciclaje, juguetes
3	V	Cloruro de polivinilo	Empaque de comida, botellas de champú	Tapetes, mangueras, guardafangos
4	LDPE	Polietileno de baja densidad	Bolsas para víveres, bolsas para pan	Bolsas para víveres, bolsas para basura
5	PP	Polipropileno	Cazoletas para margarina, botellas	Cubetas de pintura, raspadores de hielo
6	PS	Poliestireno	Tazas de café, cajas de videocasetes, recipientes para comida rápida	Tuberías de drenaje, macetas para flores, charolas para el servicio de alimentos
7	Otros	Otros		

Fuente: American Plastics Council.

es alrededor del 40% para el polietileno, pero sólo la mitad de eso para el PVC (cloruro de polivinilo). El control de la contaminación es importante.

5-4-4 Compuestos

Los compuestos representan algunos de los mayores retos. Los compuestos de matriz polimérica se pueden reciclar hasta cierto punto. Así, las partes hechas de compuesto laminar de moldeo de lámina se pueden triturar y moler; el polvo fino se agrega al material virgen. La recuperación terciaria produce monómeros que se pueden usar como material de alimentación.

5-5 RESUMEN

La ingeniería concurrente, en el sentido más estrecho, abarca el diseño del producto, la selección del material, y la elección del proceso y sus interacciones.

1. El diseñador debe conocer el amplio rango de materiales disponibles, incluyendo metales, cerámicos, plásticos y compuestos.
2. Los procesos de manufactura, en el sentido que aquí se usa, transforman productos primarios en piezas adecuadas para su ensamble en dispositivos funcionales. El conocimiento de la fuente de estos productos primarios ayuda a comprender las implicaciones de muchas decisiones de manufactura.
3. El análisis del ciclo de vida proporciona una evaluación de principio a fin del impacto del proceso y del producto sobre el ambiente, el consumo de material y energía, así como el costo para el usuario y la sociedad.
4. El reciclaje es una forma de minimizar el impacto dañino de la actividad industrial y será uno de los temas recurrentes en este libro.
5. Muchas de las operaciones de la manufactura usan o crean productos y derivados potencialmente peligrosos; en muchos casos, las formas de tratarlos tienen una importancia primordial. Aunque este campo es enorme y no se puede analizar aquí, se darán indicaciones en los puntos pertinentes de nuestros análisis.

LECTURAS ADICIONALES

Datos de materiales

ASM Handbook, Properties and Selection, vol. 1, *Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, 1990; vol. 2, *Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, 1991, ASM International. (También en CD-ROM.)

ASM Handbook, vol. 20, *Materials Selection and Design*, ASM International, 1997.

Alloy Finder (CD-ROM), 2a. ed., ASM International, 1996.

Davies, J.R. (ed.): *Metals Handbook Desk Edition*, 2a. ed., ASM International, 1998.
Engineered Materials Handbook Desk Edition, ASM International, 1995.
Wick, C., y R. Veilleux (eds.): *Tools and Manufacturing Engineers Handbook*, 4a. ed., vol. 3, *Materials, Finishing and Coating*, Society of Manufacturing Engineers, 1985.
Bauccio, M.L.: *ASM Metals Reference Book*, 3a. ed., ASM International, 1993.
Bauccio, M.L.: *ASM Engineered Materials Reference Book*, 2a. ed., ASM International, 1994.
Brady, G.S., H.R. Clauster y J.A. Vaccari: *Materials Handbook*, 14a. ed., McGraw-Hill, 1996.
Brandes, E.A. y G.B. Brook (eds.): *Smithells Metals Reference Book*, 7a. ed., Butterworth-Heinemann, 1997.
Frick, J. (ed.): *Woldman's Engineering Alloys*, 8a. ed., ASM International, 1994.
Rahoi, D. (ed.): *Alloy Digest*, ASM International (series continuas, también en CD-ROM).
Wegst, C.G.: *Stahlschluessel (Key to Steel)*, 18a. ed., Verlag Stahlschluessel, Marbach, 1998. (También en CD-ROM.)
Worldwide Guide to Equivalent Irons and Steels, 3a., ed., ASM International, 1993.
Worldwide Guide to Equivalent Nonferrous Metals and Alloys, 3a. ed., ASM International, 1996.

Selección de materiales

Ashby, M.F.: *Materials Selection in Mechanical Design*, Pergamon, 1992.
Datsko, J.: *Materials Selection for Design and Manufacturing*, Dekker, 1997.
Dieter, G.E., Jr.: *Engineering Design: A Materials and Processing Approach*, 3a. ed., McGraw-Hill, 1999.
Farag, M.M.: *Materials Selection for Engineering Design*, Prentice Hall, 1997.
MacDermott, C.P. y A.V. Shenoy: *Selecting Thermoplastics for Engineering Applications*, 2a. ed., Dekker, 1997.
Mangonon, P.C.: *The Principles of Materials Selection for Engineering Design*, Prentice Hall, 1999.
Wroblewski, A.J. y S. Vanka: *MaterialTool: A Selection Guide of Materials and Processes for Designers*, Prentice Hall, 1997.

Ambiente y reciclaje

Ayres, R.U. y L.W. Ayres: *Industrial Ecology*, Edward Elgar, 1996.
Hartinger, L.: *Handbook of Effluent Treatment and Recycling for the Metal Finishing Industry*, ASM International, 1994.
Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 4a. ed., Wiley-Interscience, vol. 20 (1996) 1075-1134; vol. 21 (1997), 1-46; Supplement (1998) 460-473.
Lewis, R.J.: *Hazardous Chemicals Desk Reference*, 4a. ed., International Thomson Publication, 1997.
Misra, K.B. (ed.): *Clean Production*, Springer, 1996.
Mustafa, N.: *Plastics Waste Management: Disposal, Recycling and Reuse*, Dekker, 1993.
Porter, R. y T. Roberts (eds.): *Energy Savings by Wastes Recycling*, Elsevier, 1985.
Tibor, T.: *ISO 14000: A Guide to the New Environmental Management Standards*, Irwin, 1995.



Cuando se observan en una sección metalográfica, sólo son visibles las áreas blancas; las dendritas que acechan bajo la superficie se revelan cuando la matriz es atacada químicamente. (Dendritas primarias de cobalto en una matriz de aleación Co-Sa-Cu.) (*Cortesía del Dr. W. Kurz, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne.*)

capítulo

6

Solidificación y tratamiento térmico de metales

La solidificación y el tratamiento térmico se estudian en los cursos introductorios sobre materiales, pero este capítulo debe servir como un repaso útil de temas tales como:

La estructura cristalina de los metales

Los diagramas de equilibrio como mapas para las estructuras en las aleaciones

La difusión y su papel en la solidificación no en equilibrio

Las reacciones en el sistema hierro-carburo de hierro

La influencia de la estructura en las propiedades mecánicas

La función de la resistencia de la interfase en las estructuras de dos fases

Los métodos para cambiar propiedades por medio del tratamiento térmico

La obtención de una combinación deseable de propiedades en piezas de acero, a través de la modificación de una capa superficial.

La solidificación es un proceso de amplia aplicabilidad para los metales y las aleaciones. Los principios que aquí se analizan se aplican por igual a la fundición, a la metalurgia de polvos y a los procesos de soldadura; asimismo, pondrán los cimientos para comprender el comportamiento de la deformación. Una extensión de estos principios ayuda a racionalizar los cambios que tienen lugar en los tratamientos térmicos, para facilitar el procesamiento y mejorar las propiedades de servicio.

6-1 SOLIDIFICACIÓN

Los metales sólidos son materiales cristalinos caracterizados por el enlace metálico, una resistencia y una ductilidad razonables, y por una buena conductividad eléctrica. Si sus átomos, junto con sus electrones, se visualizan como esferas diminutas (de diámetro alrededor de 0.2 nm), se tiene que estas esferas ocupan posiciones estrictamente

prescritas en el espacio. El arreglo de puntos que representa el centro de los átomos se llama *red cristalina.* Los átomos vibran respecto a su posición en la red; la vibración es mínima en el cero absoluto. Cuando el sólido se calienta, los átomos vibran en amplitudes siempre crecientes; en una temperatura crítica —el punto de fusión, T_m (Secc. 4-6)— el sólido se funde, se convierte en un líquido. El orden cristalino de *largo alcance* del sólido se pierde en gran parte, aunque puede existir un orden de *corto alcance* extendiéndose a varios átomos. De esta forma, al fundirse, el sólido *cristalino* se transforma en un líquido *amorfo.*

6-1-1 Metales puros

Se puede observar la solidificación de un *metal puro* insertando un termopar en una fusión contenida en un crisol pequeño y registrando el cambio en temperatura con el tiempo (Fig. 6-1*a*). Si no se suministra calor, la fusión se enfría gradualmente, liberando calor sensible o energía interna (*A* en la Fig. 6-1*b*) hasta que en T_m se forman cuerpos

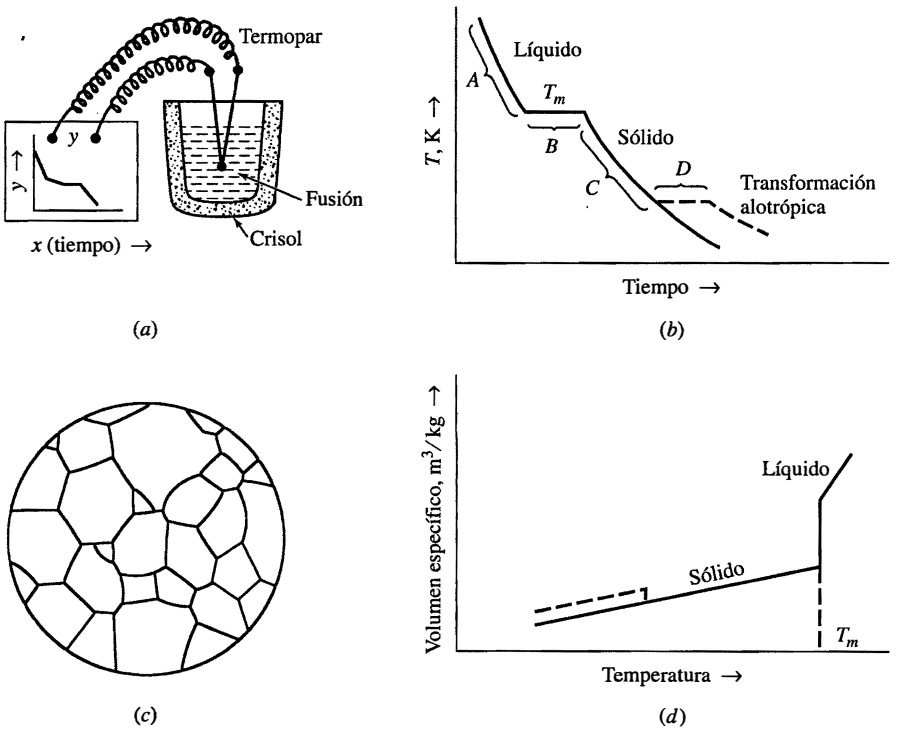


Figura 6-1 La solidificación de un metal puro se puede observar (*a*) insertando un termopar y (*b*) registrando la temperatura como una función del tiempo. (*c*) Una micrografía de la estructura resultante sólo muestra las fronteras de grano. (*d*) El volumen se contrae al solidificarse, pero se puede incrementar con una transformación alotrópica.

cristalinos muy pequeños, *núcleos*, en varios puntos en la fusión. Ahora la temperatura permanece constante mientras los núcleos crecen por la deposición de más átomos en la misma orientación cristalográfica, y el calor de fusión (*B*) es removido. Cuando toda la fusión se solidifica, la temperatura baja de nuevo (Fig. 6-1*b*), y el sólido libera su energía calorífica sensible (*C*).

El cuerpo solidificado es *policristalino*, es decir, consiste de muchos cristales orientados aleatoriamente (usualmente llamados *granos*). Las propiedades mecánicas y de otro tipo de un cristal individual son *anisotrópicas*, o sea, son una función de la dirección del ensayo relativa a la orientación de la red. En contraste, un cuerpo policristalino que consiste en un gran número de granos orientados aleatoriamente es *isotrópico* (tiene las mismas propiedades en todas direcciones), y sus propiedades representan una media de todas las direcciones cristalográficas.

Como los granos adyacentes tienen orientaciones diferentes, la *frontera de grano* es una zona de desorden. Para revelar las fronteras de granos, el cuerpo solidificado se puede cortar y la superficie puede ser fresada, pulida y atacada químicamente con un reactivo adecuado. Debido a la energía química más elevada de los átomos en la frontera de grano, se les ataca con preferencia, y el surco aparece como una línea oscura bajo el microscopio óptico (Fig. 6-1*c*).

En el estado líquido, los átomos espaciados de manera aleatoria y muy agitados ocupan mucho espacio, de ahí que el *volumen específico* (por unidad de masa) es grande (Fig. 6-1*d*). Durante el enfriamiento del material fundido, la excitación térmica se hace menos violenta, y el volumen específico baja gradualmente hasta que se alcanza el punto de fusión. Aquí los átomos ocupan sus sitios en las redes, las cuales están menos espaciadas, y el volumen específico baja sustancialmente; la *contracción por solidificación* es por lo general del 2.5-6.5%. Esto significa que si se va a producir una fundición libre de cavidades, ésta debe ser suplementada para compensar la contracción por solidificación, lo anterior representa uno de los mayores retos en los procesos de fundición. La disminución de la excitación térmica durante el enfriado en el estado sólido provoca una contracción posterior, dada por el coeficiente de dilatación térmica. Usualmente los metales se contraen cerca del 1% por cada 1 000°C de disminución de la temperatura. Hasta en un metal solidificado por completo habrá algunos sitios atómicos desocupados, *defectos puntuales*, llamados *vacancias*.

El arreglo de empaque de los átomos es característico del metal y se puede describir a través de la *celda unitaria* (el volumen más pequeño que define del todo al arreglo atómico). Para metales prácticos de ingeniería, son importantes tres tipos de redes: *cúbica centrada en la cara* (fcc) con átomos en cada esquina y en medio de la cara de un cubo (Fig. 6-2*a*); *cúbica centrada en el cuerpo* (bcc) con átomos en cada esquina y en medio de un cubo (Fig. 6-2*b*), y *hexagonal compacta* (hcp) con un átomo en cada equina, en el centro de la cara extrema (*plano basal*) y en tres sitios en medio del cuerpo (Fig. 6-2*c* y *d*). La estructura tiene funciones importantes en la solidificación y en la deformación plástica.

Algunos metales experimentan, en el estado sólido, un cambio en la estructura cristalina (*transformación alotrópica*) a una temperatura crítica, en la cual liberan el calor latente de transformación (*D* en la Fig. 6-1*b*). Por conveniencia, las diferentes formas cristalográficas del mismo metal se denotan con letras griegas. De esta forma, al enfriarse, el hierro-δ bcc cambia a hierro-γ fcc a 1 400 °C, y de nuevo cambia a hierro-

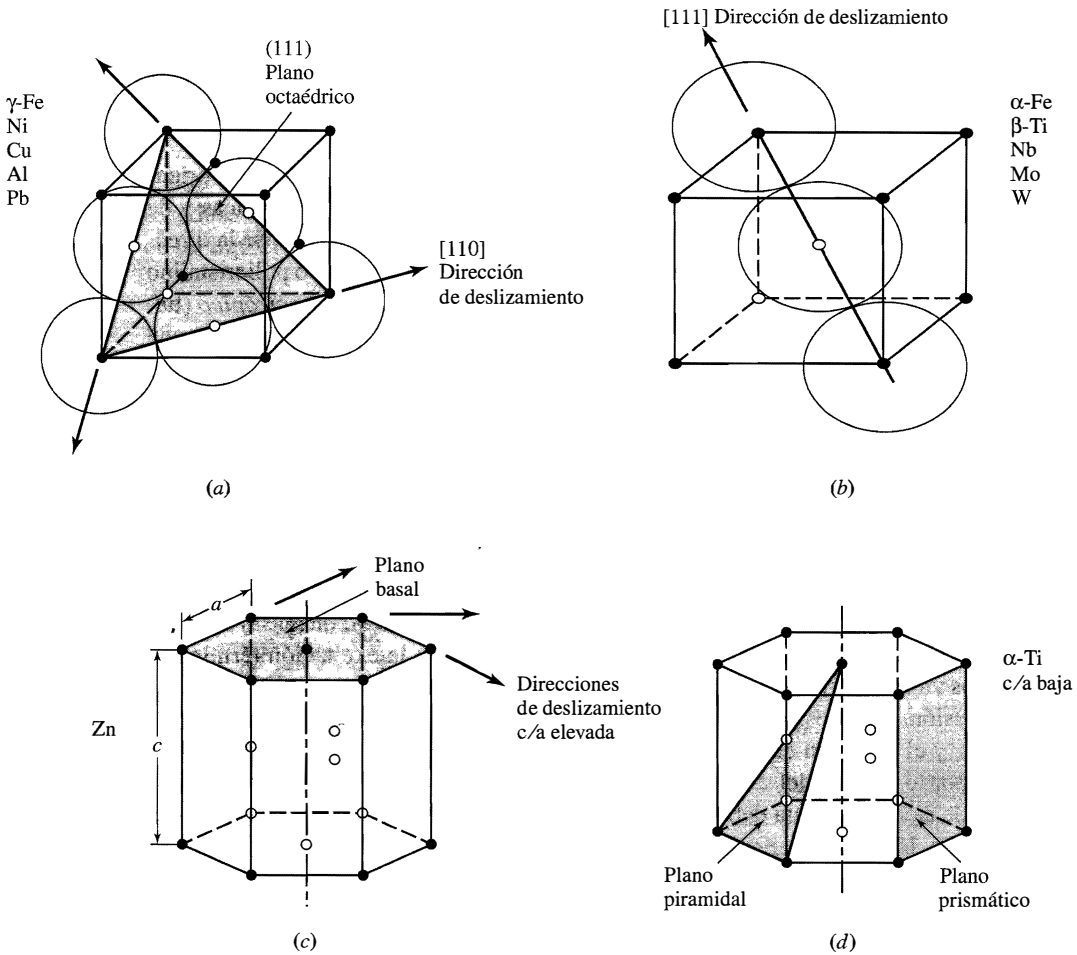


Figura 6-2 Sitios de red, planos de deslizamiento y direcciones de deslizamiento en estructura (*a*) cúbica centrada en la cara, (*b*) cúbica centrada en el cuerpo, y (*c*) y (*d*) hexagonal compactas.

α bcc a 906°C. El titanio-β hcp cambia al enfriarse a titanio-α bcc a 880°C. Con frecuencia, las transformaciones alotrópicas están acompañadas por un cambio en volumen (Fig. 6-1*d*), lo que puede ocasionar esfuerzos internos suficientes para causar agrietamiento.

6-1-2 Soluciones sólidas

La mayor parte de los metales técnicamente importantes no son metales puros, sino que contienen una variedad de otros elementos metálicos y no metálicos, que pueden aña-

dirse intencionalmente (*elementos de aleación*) o que están presentes porque no pudieron ser removidos por razones económicas (*elementos menores* o *contaminantes*). En condiciones favorables, el elemento de aleación puede estar distribuido de manera uniforme en el metal base, formando una *solución sólida.*

Tipos de soluciones sólidas Hay dos posibilidades:

1. El elemento de aleación (*soluto*) tiene una estructura cristalina similar a la del metal base (*solvente*); tiene un radio atómico similar (dentro del 15%) y satisface algunos criterios de compatibilidad en la estructura electrónica. Así, los átomos solutos pueden reemplazar a los átomos del solvente para dar una *solución sólida sustitucional* (Fig. 6-3*a*). Algunos metales pueden formar soluciones sólidas sobre todo el intervalo de composición (por ejemplo, el cobre y el níquel, con radios atómicos de 0.128 y 0.125 nm, respectivamente).

2. Los átomos del soluto son mucho más pequeños (< 60%) que los átomos del solvente y pueden caber en los espacios existentes en la red cristalina del metal solvente para formar una *solución sólida intersticial* (Fig. 6-3*b*, por ejemplo el C y el N en el hierro; también el H y el O).

Difusión Es importante darse cuenta de que los átomos no están inamoviblemente sujetos a su posición en la red. Si, por ejemplo, existe una vacante, uno de los átomos adyacentes puede mudarse; así, el sitio previamente ocupado ahora se vuelve vacante (Fig. 6-3*c*). A través de la repetición de estos sucesos, los átomos se pueden mover, es decir, se difunden dentro de la red. El caso explicado arriba se llama *difusión por vacancia* (o *difusión por átomo sustitucional*). Un átomo intersticial del soluto también se puede mover hacia un espacio adyacente entre los átomos del solvente por medio de la *difusión intersticial* (Fig. 6-3*d*); como no se requiere vacancia, la difusión es rápida.

Si los átomos del soluto no están distribuidos de modo uniforme en una solución sólida, se difundirán hasta que se eliminen los gradientes de concentración. De acuerdo con la primera ley de Fick, el *flujo de átomos J* (el número de átomos que pasa a través de un plano de área unitaria en una unidad de tiempo), en unidades de átomos/$m^2 \cdot s$, es proporcional al gradiente de concentración ΔC (el cambio en concentración) sobre una distancia Δx

$$J = -D\frac{\Delta C}{\Delta x} \qquad \textbf{(6-1)}$$

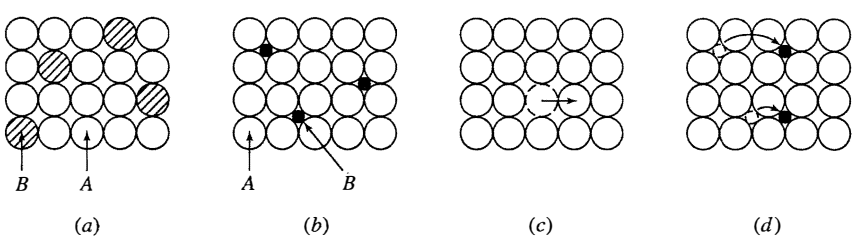


Figura 6-3 Los elementos de aleación se pueden acomodar en soluciones sólidas (*a*) sustitucionales o (*b*) intersticiales. La migración de átomos puede ocurrir por (*c*) difusión por vacante (sustitucional) o (*d*) difusión intersticial.

donde D es la *difusividad* o el *coeficiente de difusión*. El valor de D es mayor a temperaturas elevadas

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad \textbf{(6-2)}$$

donde D_0 es una constante para un par dado de materiales, Q es la *energía de activación* (la requerida para vencer la barrera de energía involucrada al mover átomos a través de la red), y R es la constante de gas ideal (9.937 J/mol · K).

La difusión es un mecanismo muy importante no sólo en la solidificación, sino también en muchas otras fases de la manufactura. Hay dos puntos importantes para recordar:

1. La difusión se acelera en gran medida gracias a las temperaturas elevadas.

2. Como la difusión lleva tiempo, si no se dispone del tiempo suficiente, la distancia sobre la cual tiene lugar la difusión se reduce mucho.

Solidificación de soluciones sólidas Los eventos que ocurren durante la solidificación de las soluciones sólidas bajo condiciones de equilibrio se pueden seguir mediante la preparación de fusiones diferentes de, digamos, cobre y níquel, con un contenido de Ni de 0, 50 y 100% en peso (%wt o, en este libro, simplemente %). Las fusiones con 0% Ni (100% Cu) y 100% Ni son metales puros y sus curvas de enfriamiento son las mismas que en la figura 6-1*b*. La fusión con una composición C_0 = 50% Ni es diferente (Fig. 6-4). La solidificación inicia a 1 315°C con la formación de núcleos, cuando se

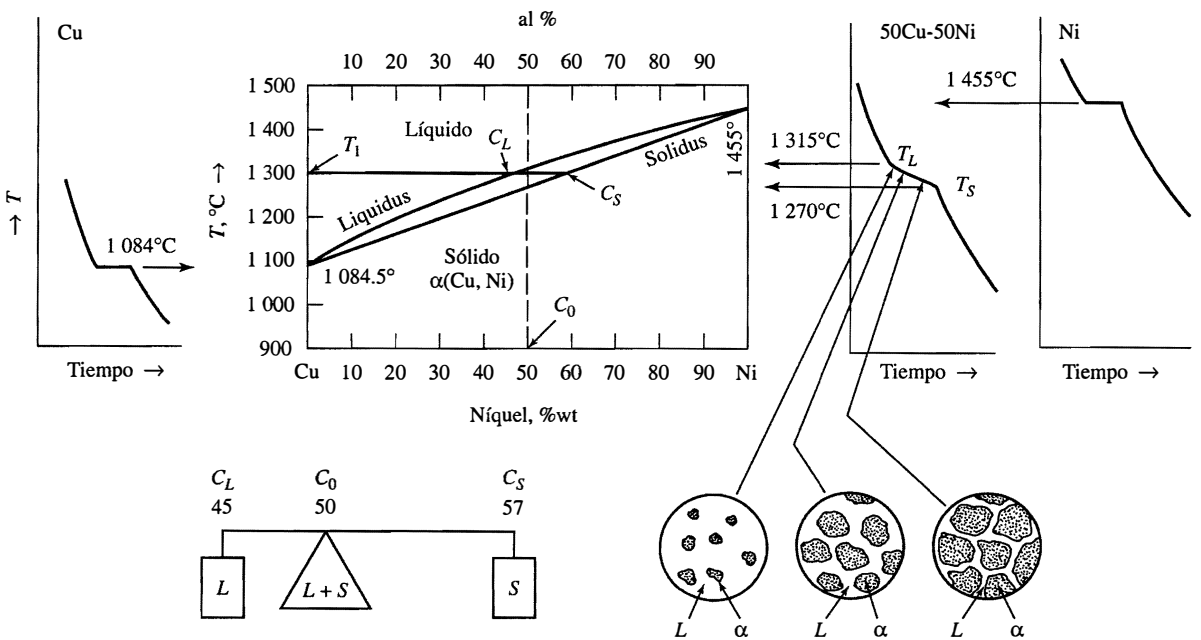


Figura 6-4 El diagrama de equilibrio del cobre-níquel muestra una solubilidad sólida completa de los dos elementos uno con otro. La solidificación de una solución sólida tiene lugar a temperaturas que descienden gradualmente y la proporción de las fases sólida y líquida se puede determinar por medio de la regla de la palanca inversa.

tiene un contenido de Ni del 68%. La temperatura baja gradualmente; la aleación menos rica en Ni se solidifica hacia los núcleos hasta que, a 1 270°C, toda la fusión desaparece. Si la solidificación fuera muy lenta y los átomos de Cu pudieran difundirse hacia los cristales ya solidificados, la composición sería uniforme en todas partes a 50% Ni. En alguna temperatura intermedia T_1, la aleación está en un *estado esponjoso*: dibujando una *línea horizontal de conexión*, se ve que los cristales sólidos (de composición C_S) coexisten con un líquido (de composición C_L). Sus cantidades relativas se dan por la *regla de la palanca inversa*; la fracción en peso del sólido S es proporcional a la distancia horizontal (brazo de palanca) entre la composición nominal C_0 y la de la fase líquida C_L:

$$\frac{S}{S+L} = \frac{C_0 - C_L}{C_S - C_L} 100\ (\%) \qquad \textbf{(6-3a)}$$

Similarmente, la fracción en peso del líquido L presente es

$$\frac{L}{S+L} = \frac{C_S - C_0}{C_S - C_L} 100\ (\%) \qquad \textbf{(6-3b)}$$

Repitiendo el experimento con otras concentraciones, se determinan las líneas que definen la fusión completa (la *liquidus*, T_L) y la solidificación (la *solidus*, T_S), y se obtiene un *diagrama de equilibrio* de la temperatura contra composición. Obviamente, la cantidad del sólido es tan pequeña que tiende a cero en todos los puntos en el liquidus, y crecen gradualmente cristales sólidos durante el enfriamiento hasta la solidus.

Como los átomos del solvente están uniformemente distribuidos en los del soluto, cada grano en un cuerpo policristalino aparecerá *homogéneo* y se verá como el de un metal puro (Fig. 6-1*c*). Usualmente, las soluciones sólidas se denotan por una letra griega minúscula.

Ejemplo 6-1

Para una aleación que contiene 50% Cu y 50% Ni, calcule las cantidades del sólido S y del líquido L presentes a 1 300°C. Demuestre que el contenido total de níquel en las fases líquida y sólida suma 50%.

El diagrama de equilibrio (Fig. 6-4) muestra que, para C_0 = 50% Ni, a 1 300°C, un líquido de una composición C_L = 45% Ni está en equilibrio con un sólido de composición C_S = 57% Ni. Sabemos que la masa se debe conservar, de ahí que para un lote de 100 g de masa,

$$L + S = 100\ \text{g}$$

También se sabe que las masas deben estar equilibradas, es decir, la cantidad total de Ni (C_0) debe residir en las fases líquida y sólida

$$C_L L + C_S S = 100 C_0$$

la sustitución de $L = 100 - S$ resulta en la ecuación (6-3*a*). Entonces

$$\frac{S}{S+L} = \frac{50-45}{57-45} 100 = 42\%$$

y

$$L = 100 - 42 = 58\%$$

La cantidad de níquel en la aleación de 100 g:

Sólido = (57)(0.42)	= 23.9 g
Líquido = (45)(0.58)	= 26.1 g
Total	= 50.0 g o 50.0%

6-1-3 Sistemas eutécticos

Generalmente los elementos que presentan una diferencia mayor del 15% en radios atómicos, o que tienen una estructura cristalina distinta, son solubles uno en el otro sólo hasta cierto límite. Cuando este límite de solubilidad sólida se excede, los átomos en exceso del soluto son expulsados hacia una *segunda fase* (fase significa una parte química y estructuralmente homogénea del sistema), la cual puede ser de nuevo una solución sólida. El diagrama de equilibrio muestra las temperaturas y concentraciones en las que puede existir una fase dada. Así, el diagrama de equilibrio es como un mapa político que revela qué fases se pueden esperar; por lo tanto, también se llama *diagrama de fase*.

Un ejemplo es el sistema plata-cobre (con radios atómicos de 0.1444 y 0.1278 nm, respectivamente). El diagrama de fase (Fig. 6-5) indica que la solubilidad máxima de la Ag en Cu es 7.9%, y que la del Cu en Ag es 8.8%. Un sólido de composiciones generales entre estos límites consistirá en una mezcla de dos fases.

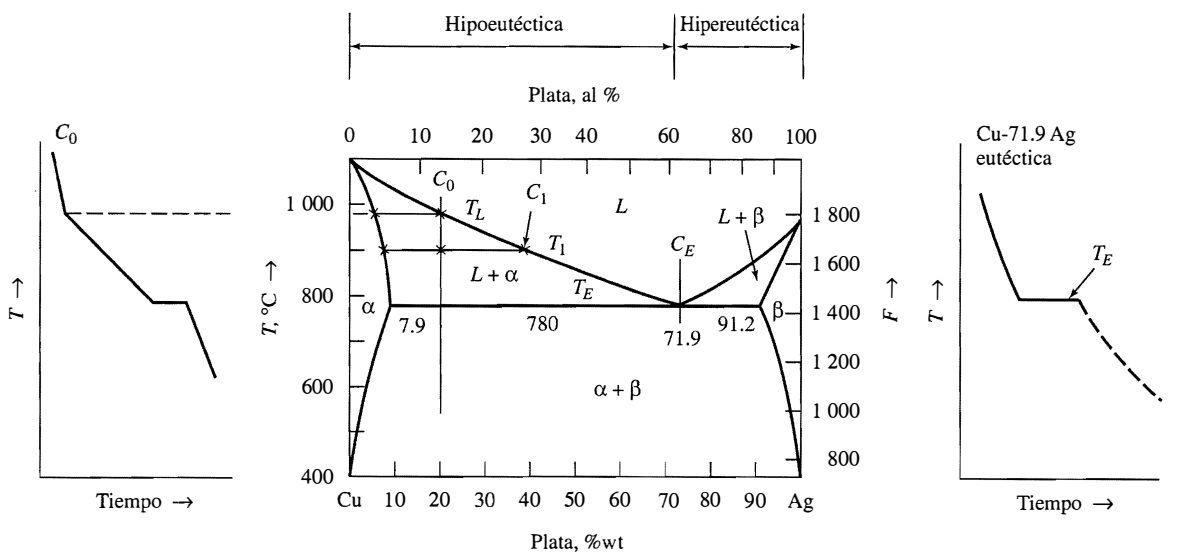
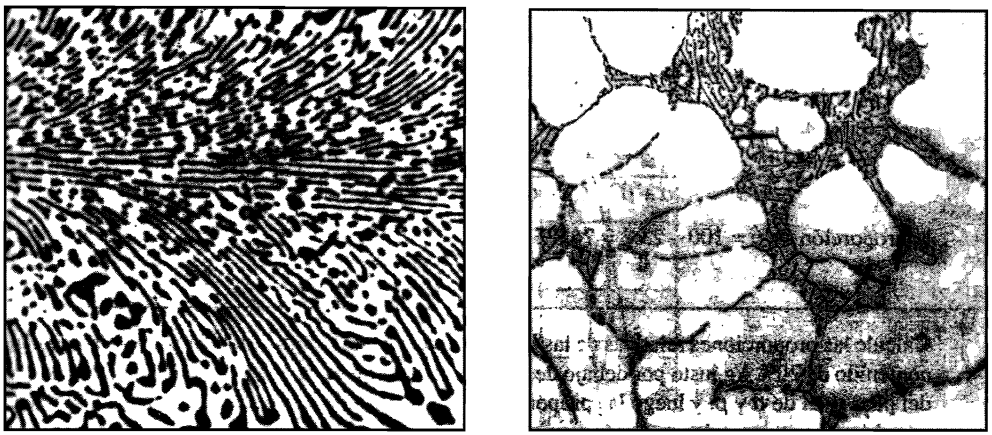


Figura 6-5 La solubilidad sólida limitada puede resultar en solidificación eutéctica.



(*a*) (*b*)

Figura 6-6 (*a*) La estructura de una aleación eutéctica a menudo es laminar. (*b*) Una aleación proeutéctica contiene principalmente granos α rodeados por la eutéctica. [(*a*) *Cortesía del Dr. H. Kerr, University of Waterloo;* (*b*) *de Metals Handbook Desk Edition, ASM International, 1985, p. 6.50. Se reproduce con autorización.*]

Existe un punto único en 71.9% Ag. Una aleación de esta composición se enfría hasta que se solidifica, como un metal puro, a una temperatura constante T_E. Sin embargo, T_E (779°C) está debajo de T_m, tanto de Cu (1 083°C) como de Ag (961°C); por lo tanto, esta composición de baja fusión se llama *composición eutéctica*. La temperatura de su solidificación (o fusión) se denomina *temperatura eutéctica* T_E. Un examen de la microestructura del eutéctico solidificado muestra que se pueden distinguir dos fases: una es una solución sólida de 7.9% Ag en Cu, y se puede llamar de manera conveniente solución sólida α, mientras que la otra, la solución sólida β, contiene 91.2% Ag (es decir, de 8.8% Cu en Ag). Las dos fases aparecen con frecuencia como placas paralelas; así que el eutéctico mostrado en la figura 6-6*a* se llama *laminar*. Como la *transformación eutéctica* sólo puede ocurrir en una composición y temperatura dadas, se llama *reacción invariante*.

Si la aleación contiene 20% Ag, la solidificación comienza en T_L con la formación de núcleos de solución sólida de aproximadamente 6% Ag. A una temperatura intermedia T_1, una mayor cantidad de solución sólida α coexiste con un líquido de composición C_1. Al alcanzar la temperatura eutéctica T_E, el líquido restante es de la composición eutéctica y se solidifica como tal. De esta forma, la microestructura consiste en cristales α de solución sólida embebidos en la eutéctica (Fig. 6-6*b*). Como los cristales α se formaron antes que la solidificación eutéctica, también se puede decir que la estructura consiste en una solución sólida α *proeutéctica* en una *matriz* eutéctica. La eutéctica en sí es una estructura de dos fases, pero con frecuencia se considera como un constituyente individual, especialmente desde el punto de vista de sus efectos sobre las propiedades mecánicas.

Ejemplo 6-2

Calcule las proporciones relativas de las fases en una aleación de Cu-Ag de composición eutéctica, justo por debajo de la temperatura eutéctica.

La regla de la palanca inversa (ecuación 6-3), se puede aplicar de nuevo para encontrar la proporción de α

$$\frac{\alpha}{\alpha+\beta}=\frac{C_\beta-C_E}{C_\beta-C_\alpha}=\frac{91.2-71.9}{91.2-}100=23.2\%$$

la proporción de $\beta = 100 - 23.2$

Ejemplo 6-3

Calcule las proporciones relativas de las fases en una aleación solidificada de cobre-plata con un contenido de 20% Ag justo por debajo de la temperatura eutéctica. Primero calcule el porcentaje del peso total de α y β, y luego las proporciones relativas de la α proeutéctica y del eutéctico E.

El porcentaje total en peso de α es, por analogía con el ejemplo 6-2,

$$\frac{\alpha}{\alpha+\beta}=\frac{C_\beta-C_0}{C_\beta-C_\alpha}=\frac{91.}{91.2-7.9}$$

y el de $\beta = 100 - 85.5 = 14.5\%$. Esto nos dice poco acerca de la estructura. Para encontrar la proporción de α proeutéctica, el cálculo se lleva a cabo para una temperatura justo arriba de la eutéctica.

$$\frac{\alpha}{\alpha+\beta}=\frac{C_\beta-C_0}{C_\beta-C_\alpha}=\frac{71.9}{71.9}$$

Los cristales α estarán rodeados por $100 - 81.1 = 18.9$
(en la cual 23.2%

Existe un elemento adicional de información importante proporcionada por el diagrama de fase: cuando la temperatura es menos que T_E, las solubilidades mutuas del Cu y de la Ag disminuyen. La composición de las fases α y β están dadas por las línea *solvus*. Los átomos en exceso del soluto serán expulsados y esto proporcionará un mecanismo poderoso de reforzamiento en algunos sistemas de aleación (Secc. 6-4-2).

6-1-4 Sistemas peritécticos

Los sistemas prácticos de aleación pueden mostrar características adicionales. Se puede generalizar el análisis llamando a uno de los metales A y al otro B.

Cuando los puntos de fusión de dos metales difieren mucho, con frecuencia la reacción invariante es del tipo *peritéctico*, el cual se ilustra en la figura 6-7 en el ejemplo del sistema Cu-Zn. Una aleación de composición peritéctica C_P (36.9% Zn) comienza a solidificarse con la formación de cristales α de solución sólida (32.5% Zn). En la temperatura invariante T_P (903°C), el líquido restante debe desaparecer y todo el sólido debe transformarse en una solución sólida β (38.0% Zn). Esto sólo se puede lograr por la difusión circunferencial de los átomos de Zn hacia los cristales α ya solidificados, de ahí el nombre de *reacción de difusión peritéctica*.

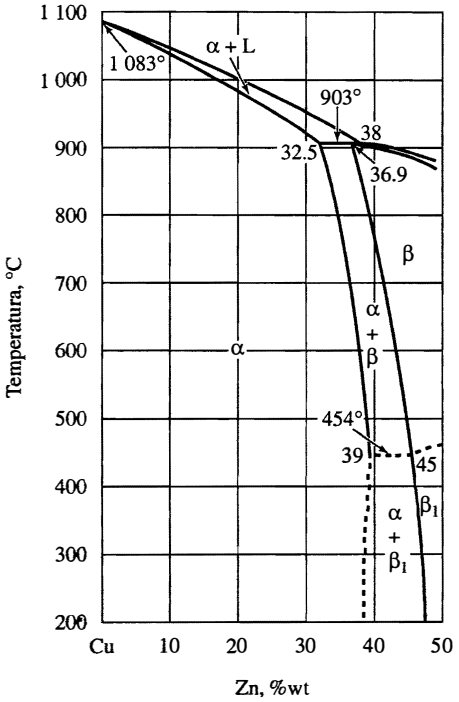


Figura 6-7 Las grandes diferencias en los puntos de fusión con frecuencia conducen a la solidificación peritéctica, como en el sistema Cu-Zn.

6-1-5 Fases intermetálicas

En muchos sistemas de aleación se forman fases con propiedades distintivas. Su composición se caracteriza por una razón más o menos fija de los dos elementos.

En los compuestos intermetálicos la razón es estequiométrica (de valor fijo) y se puede denotar como $A_m B_n$. Las dos especies atómicas A y B ocupan sitios fijos en la celda unitaria, que con frecuencia es muy grande. Los enlaces pueden tener características predominantemente covalentes, con electrones compartidos entre los átomos. Aunque se retiene alguna conductividad eléctrica, estos compuestos con frecuencia son frágiles, duros y de un punto de fusión elevado (β en la Fig. 6-8). Los compuestos también se pueden formar entre elementos metálicos y no metálicos. El ejemplo más importante es el Fe_3C en aceros (Secc. 6-2-1).

En algunos casos la fase intermetálica puede existir sobre un rango amplio de composición, y entonces se habla de una *fase intermedia* (γ en la Fig. 6-8), la cual a menudo tiene una *estructura cristalina ordenada*, en que los átomos están en localizaciones específicas en la red.

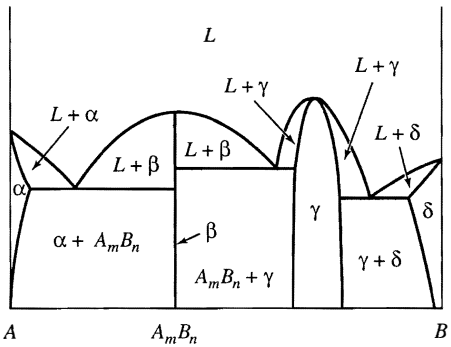


Figura 6-8 Muchos elementos forman compuestos intermetálicos ($A_m B_n$) o fases intermedias (γ).

Ejemplo 6-4

Algunos intermetálicos se pueden usar como materiales de construcción. Los aluminatos de titanio TiAl y Ti_3Al son soluciones sólidas ordenadas (con los átomos del soluto en secuencia regular), en las que la propagación de dislocaciones es difícil y requiere una energía elevada, ofreciendo de esta forma una resistencia elevada a altas temperaturas, con razonable ductilidad; se usan experimentalmente para componentes de turbinas. Otros intermetálicos son los aluminatos de Ni y Fe.

6-1-6 Solidificación no en equilibrio

Hasta ahora se ha supuesto que las condiciones de enfriamiento durante la solidificación permiten un equilibrio completo. Esto rara vez es el caso porque las velocidades de enfriamiento en la mayor parte de los procesos de solidificación son relativamente rápidas (del orden de una fracción de grado a algunos grados por segundo en la fundición, y mucho más rápidas en el procesamiento de partículas y en la soldadura por fusión), y los procesos de difusión son, en general, demasiado lentos. Por lo tanto, las estructuras solidificadas muestran por lo general características microestructurales no de equilibrio, en especial cuando el intervalo de congelamiento es amplio.

En un sistema como el que se muestra en la figura 6-9, la solidificación de una fusión de composición C_0 comienza con la expulsión de cristales α de solución sólida de composición C_1. Al enfriarse más, los cristales no sólo crecen sino que, de acuerdo con el diagrama de fase de equlibrio, su composición también tendría que enriquecerse en el elemento β, como lo dicta el solidus. Si el tiempo es insuficiente para permitir que los átomos de Mg se difundan hacia el núcleo ya solidificado, éste permanece más pobre en el elemento de aleación. Los átomos de Mg en exceso se retienen en la fusión, y la solidificación no termina cuando se alcanza la temperatura solidus de equilibrio T_S; en lugar de eso continúa por medio de la deposición gradual de capas más y más ricas. El solidus no de equilibrio que se muestra como una línea discontinua en la figura 6-9

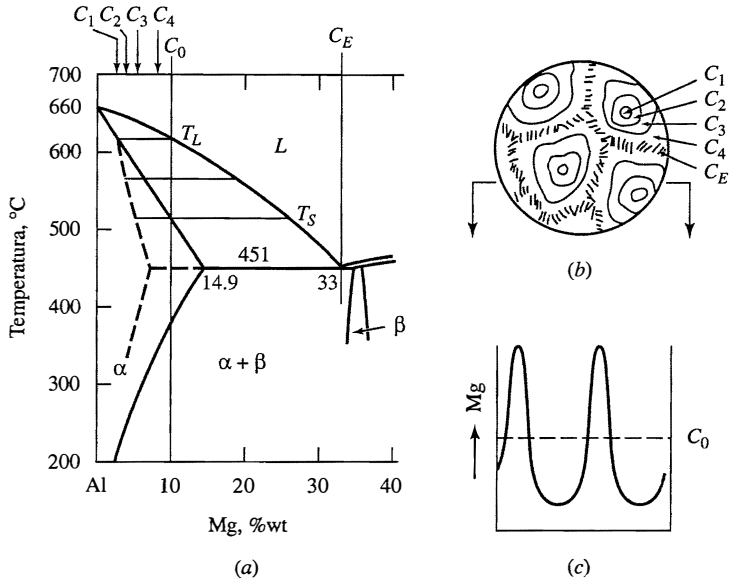


Figura 6-9 A velocidades de enfriamiento usuales, una solución sólida de composición C_0 (*a*) presentará segregación intragranular (*b*), con una concentración mayor del elemento de aleación en las fronteras de los granos (*c*), como en el sistema Al-Mg.

representa la composición promedio del sólido. Como los centros (núcleos) de los cristales que crecieron durante la solidificación no de equilibrio tienen una composición diferente (Fig. 6-9*b*), es común referirse a este fenómeno como *microsegregación* o *segregación intragranular.* Esto tiene consecuencias prácticas para una pieza terminada; puede hacerse visible si, por ejemplo, se anodiza una aleación de Al-5Mg (Secc. 19-3).

Una aleación con rango de solidificación más amplio (*rango de congelamiento largo*, $T_L - T_S$) es más propensa a la segregación intragranular. El rango de congelamiento se puede normalizar en relación con T_L:

$$\text{Rango de congelamiento} = \frac{T_L - T_S}{T_L} \qquad \textbf{(6-4)}$$

La microsegregación puede ser indeseable por una variedad de razones y, si no se puede evitar, se puede eliminar parcial o totalmente por medio de un subsiguiente tratamiento térmico de homogeneización (véase la Secc. 6-4-1).

En el caso que se muestra en la figura 6-9, una fase líquida permanece hasta que se alcanza la temperatura eutéctica, cuando el líquido remanente finalmente se solidifica a lo largo de las fronteras del grano como un eutéctico. Esto puede tener consecuencias altamente indeseables:

Fragilidad en caliente De acuerdo con el diagrama de fase de equilibrio, la aleación es una solución sólida y deberá deformarse fácilmente. Sin embargo, cuando se calienta

por arriba de la temperatura eutéctica T_E, sufre una fractura por la separación en las fronteras de los granos donde está presente la eutéctica no de equilibrio, de bajo punto de fusión. La fractura por fragilidad en caliente se identifica de inmediato por su apariencia rasgada a medida que sigue las fronteras de los granos. Algunas veces la presencia de un contaminante insospechado, el cual forma una eutéctica de baja fusión, puede destruir totalmente la ductilidad. Un ejemplo notable es el azufre en exceso de 0.004% (es decir, 40 partes por millón) en níquel o superaleaciones de alto contenido de níquel.

Ejemplo 6-5

Una aleación de Al 5056 se vació en un lingote de 0.5 m de espesor, 1.2 m de ancho y 2.4 m de longitud. Como contiene 5% de Mg, se sabe que tiene microsegregación (Fig. 6-9). Luego se colocó en un horno de aire circulante soplado desde el fondo para su homogeneización a 440°C. Después de varias horas se encontró que la parte inferior del lingote se fundió. La investigación mostró que el fondo del horno estaba 15°C más caliente que la temperatura medida a media altura; de esta forma, la temperatura eutéctica se excedió y la eutéctica no equilibrio se fundió.

Fragilidad Si el elemento β (el cual también podría ser un compuesto intermetálico $A_m B_n$) es frágil, la estructura solidificada también lo será, aunque en el diagrama de equilibrio se le juzgaría como una solución sólida dúctil.

6-1-7 Nucleación y crecimiento de granos

El informe de la solidificación que se dio arriba está muy simplificado. En realidad, los procesos pasan a través de una secuencia de nucleación y crecimiento.

Nucleación Existen dos formas en las cuales se pueden formar los núcleos:

1. La *nucleación homogénea* sólo ocurre en fusiones muy limpias. El núcleo se forma por el ordenamiento de los átomos en posiciones correspondientes a la red cristalina. Tal orden también existe en la fusión, pero sólo en distancias cortas. Debajo del punto de fusión, el ordenamiento de largo alcance es posible, pero en su mayoría es sólo temporal. Los átomos están en una condición altamente agitada a esta temperatura, y se forman y desaparecen de manera continua núcleos embrionarios. Sólo los núcleos que han alcanzado un tamaño crítico son estables y capaces de crecer lo cual hacen sólo a temperaturas considerablemente por debajo de la T_m (el grado de tal *subenfriamiento* se puede expresar como una fracción del punto de fusión y se encuentra alrededor de $0.2T_m$ en los metales puros); como se forman pocos núcleos, el tamaño de los granos es grueso.

2. La *nucleación heterogénea* es típica en la mayor parte de los metales prácticos. El número de núcleos se incrementa mucho, se reduce el tamaño de los granos y la necesidad de subenfriamiento disminuye o se elimina a través de la nucleación sobre la superficie sólido de los *agentes de nucleación*. Éstos pueden ser impurezas residuales o sustancias finamente divididas (a menudo, compuestos intermetálicos), agregados de modo intencional a la fusión, un poco antes del vaciado. Si tienen una estructura crista-

lina compatible con poca diferencia en el espaciamiento de la red y si están humedecidos por el material fundido, los átomos se pueden depositar con facilidad sobre ellos para formar cristales en un subenfriamiento menor de 5°C.

Crecimiento de cristales Una vez nucleados, los cristales crecen esencialmente en dos formas:

1. El *crecimiento planar* ocurre cuando la extracción de calor se hace a través de la fase sólida y una interfase sólida/líquida uniforme se mueve hacia el líquido (Fig. 6-10*a*).

2. El *crecimiento dendrítico* es característico en las aleaciones de solución sólida. De nuevo, los cristales crecen en la dirección de la extracción del calor pero, como se mostró en la sección 6-1-6, la solidificación comienza con una solución sólida más pobre, mientras que el sólido remanente se enriquece. Acoplado con un subenfriamiento local en el líquido, esto lleva a la formación de un esqueleto cristalino ramificado, el cual recuerda a un árbol (Fig. 6-10*b*), y es, por lo tanto, llamado *dendrita* (del griego *dendron*, árbol). A velocidades de enfriamiento mayores o en la presencia de agentes de nucleación, los granos se refinan, y con mayor relevancia para las propiedades mecánicas, también se reduce el *espaciamiento del brazo secundario de la dendrita.*

Tamaño del grano La nucleación y el crecimiento de granos ocurren simultáneamente, pero a velocidades diferentes. La velocidad de nucleación es máxima en un subenfriamiento sustancial, mientras que la velocidad de crecimiento tiene un pico cerca de la temperatura de solidificación. Por lo tanto, el tamaño del grano depende del tiempo de residencia en una temperatura dada, lo cual a su vez está en razón de la *velocidad de enfriamiento.* A velocidades de enfriamiento bajas, hay tiempo para que crezcan los nuevos núcleos formados, y la estructura será de grano grueso. A velocidades de enfriamiento elevadas, una velocidad de alta nucleación proporciona muchos sitios en los cuales puede ocurrir el crecimiento y el tamaño de los granos será pequeño.

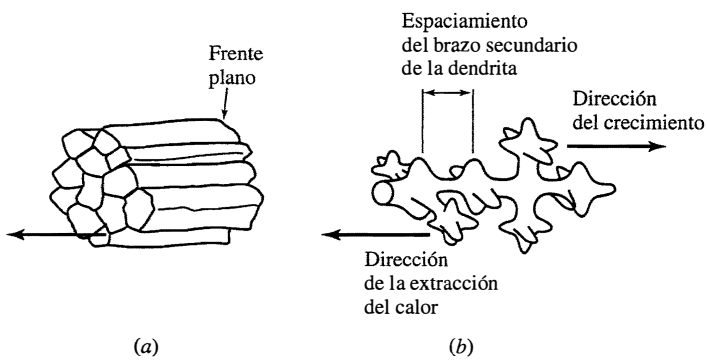


Figura 6-10 La solidificación se lleva a cabo con (*a*) un frente plano en los metales puros, pero (*b*) con el crecimiento de dendritas en las soluciones sólidas.

A velocidades de enfriamiento extremadamente elevadas la cristalización puede suprimirse y se obtiene un cuerpo no cristalino (*amorfo*) (Secc. 11-2-1).

Los núcleos preexistentes en la fusión (ya sea como núcleos homogéneos o heterogéneos) se disuelven sobrecalentando la fusión. Por lo tanto, al incrementar el sobrecalentamiento también se aumenta el tamaño del grano. La magnitud del *sobrecalentamiento* usualmente se expresa como la diferencia entre la temperatura de la fusión y la liquidus.

$$\text{Supercalor} = T_{\text{fusión}} - T_L \qquad \textbf{(6-5a)}$$

No hay mucha información, pero es razonable suponer que para materiales de diferentes puntos de fusión, los efectos del sobrecalentamiento pueden ser racionalizados al relacionarlos con el punto de fusión

$$\text{Sobrecalentamiento} = \frac{T_{\text{fusión}} - T_L}{T_L} \qquad \textbf{(6-5b)}$$

Los cristales recién formados son demasiado débiles y se rompen con facilidad para proporcionar más núcleos. De esta forma, el tamaño de los granos se refina por corrientes térmicas o agitación mecánica de la fusión en solidificación, a condición que el sobrecalentamiento sea bajo; y los fragmentos de los cristales no se funden de nuevo sino que sobreviven como núcleos (*multiplicación de granos*).

6-2 REACCIONES DE ESTADO SÓLIDO

La aleación sólida puede sufrir cambios posteriores a medida que la temperatura baja. Uno de esos sucesos se vio en la figura 6-5, en que la frontera de la fase (*solvus*) de la *solución sólida terminal* (es decir, en el extremo del diagrama de fase) indicaba que se mantienen menos de las especies solutas en solución, con la disminución de la temperatura. Entonces, el soluto en exceso se debe separar (*precipitar*) hacia una segunda fase, y esto puede ser un mecanismo poderoso para controlar las propiedades de las aleaciones sólidas, las cuales se analizan en la sección 6-4-2.

También hay otras posibilidades: cuando la temperatura baja, la estabilidad de varias fases puede cambiar también, y en una temperatura crítica, pueden suceder transformaciones similares a aquellas que ocurren en la transformación de líquido a sólido. Para distinguirlas de sus contrapartes, sus nombres se forman con la terminación *–oide*. Así, cuando una solución sólida homogénea se descompone en dos fases, se habla de una *transformación eutectoide.*

6-2-1 El sistema hierro-carburo de hierro

Algunas transformaciones se ilustran mejor en el ejemplo del sistema Fe-Fe_3C (líneas continuas, Fig. 6-11).

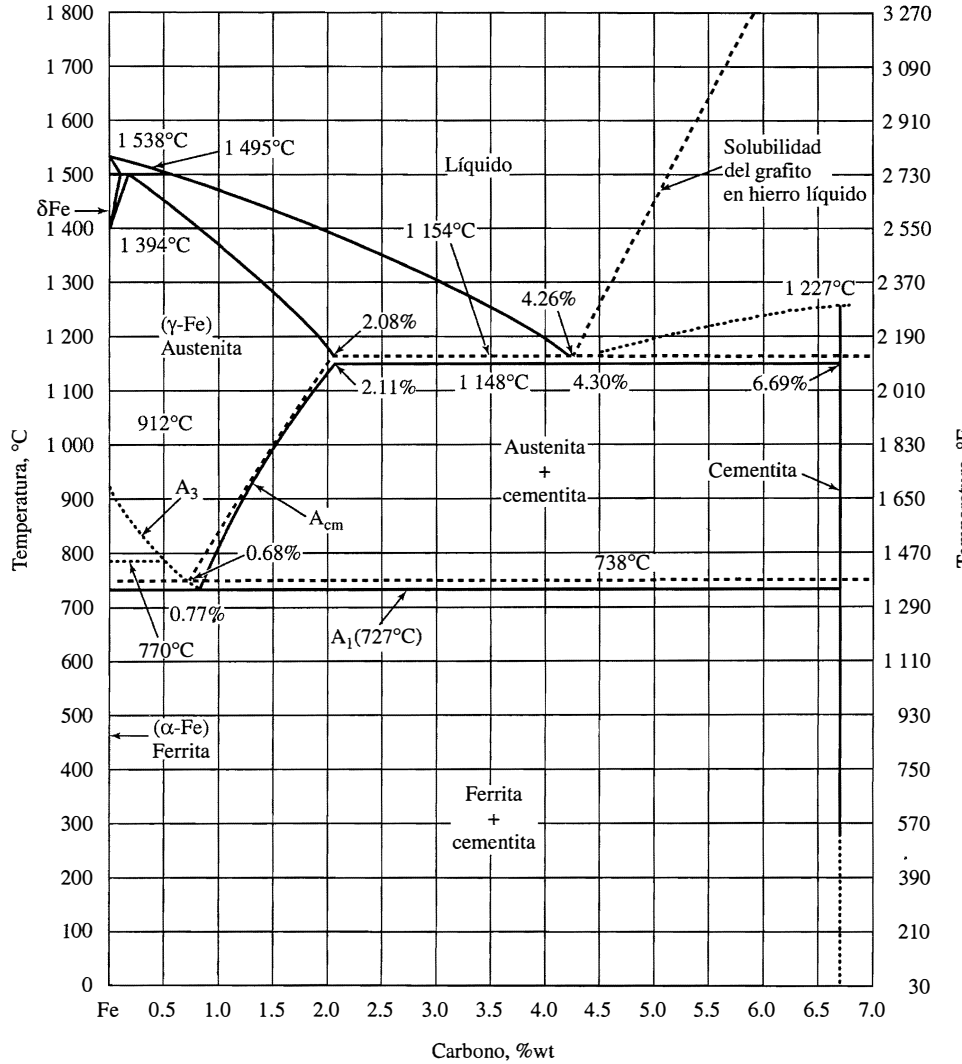


Figura 6-11 El carbono se puede presentar en el hierro en forma de cementita (líneas continuas) o grafito (líneas discontinuas). (*De Metals Handbook Desk Edition, ASM International, 1985, p. 28.2. Se reproduce con autorización.*)

Arriba del 2% C, la aleación se llama *hierro fundido.* En la ausencia de otros elementos de aleación y a velocidades de enfriamiento rápidas, la solidificación entre 2% y 4.3% C comienza con la expulsión de cristales de solución sólida γ y termina con la formación de una matriz eutéctica Fe_3C-γ. A 4.3% C, la solidificación es eutéctica; en contenidos de carbono elevados, el Fe_3C se embebe en la matriz eutéctica (Fig. 6-12*a*). Debido a la importancia industrial de las diferentes fases en el sistema, a cada una se le da un nombre. Así, la eutéctica se llama *ledeburita*, y está compuesta de *austenita* (la



(*a*) (*b*) (*c*)

Figura 6-12 En ausencia de elementos estabilizadores del grafito tales como el Si, el carbono usualmente se separa en la forma de cementita. (*a*) La cementita proeutéctica se encuentra en una matriz de eutéctico en un hierro fundido blanco. (*b*) La descomposición eutectoide de la austenita resulta en perlita (0.8% de C), en la cual se alternan laminillas de cementita y ferrita. (c) Por medio de un tratamiento térmico de esferoidización, la cementita se puede transformar en una forma esférica en un acero con 0.4% de C. (*Cortesía del Dr. G.F. VanderVoort, Carpenter Technology Corporation. También en Metals Handbook Desk Edition, ASM International, 1985, pp. 35.37, 35.42, 27.28. Se reproduce con autorización.*)

fase γ) y *cementita* (Fe_3C). Como el Fe_3C se forma durante la solidificación, se llama *cementita primaria.*

Los *aceros* son aleaciones de menos de 2% de carbono en hierro. Existe una reacción peritéctica a 1 495°C, pero para nuestros propósitos se puede ignorar. A temperaturas de importancia práctica, el C ocupa sitios intersticiales, y a temperaturas elevadas forma la solución sólida fcc γ (austenita). Al bajar la temperatura, la solubilidad del C en la austenita disminuye y en aceros con más de 0.8% C, el exceso se expulsa en la forma de Fe_3C (*cementita secundaria*).

Los intersticios en el hierro bcc son mucho menores que en el hierro fcc, y la caída repentina en la solubilidad provoca a la descomposición eutectoide de la austenita, a 727°C (también llamada temperatura de transformación A_1), en cementita y en una solución sólida de C en hierro-α (*ferrita*). Una eutectoide de estructura laminar (Fig. 6-12*b*) nuclea en las fronteras de los granos de la austenita. Como se forma en estado sólido, las trayectorias cortas de difusión hacen las láminas mucho más finas que en los eutécticos. Se llama *perlita* porque las láminas de Fe_3C causan que la superficie de una fractura fresca brille como las perlas.

En la figura 6-11 no se muestra que la solubilidad del C en la ferrita disminuye (de 0.0218%) con el decremento de la temperatura y se expulsa una cantidad pequeña de *cementita terciaria.*

Ejemplo 6-6

Varios países adoptan sus propias normas para la designación de los aceros. En Estados Unidos y Canadá se acepta ampliamente el sistema de cuatro dígitos del American Iron and Steel Institute (AISI) y de la Society of Automotive Engineers (SAE). Los primeros dos dígitos muestran qué clase de elementos de aleación se añade al hierro, y los dos últimos el contenido de carbono en centésimos de porcentaje. De esta forma, el AISI 1040 es un acero al carbono sin alear con un

contenido de 0.4% C. (Una descripción completa de la clasificación y designación de los aceros se da en MHDE, *Metals Handbook Desk Edition*.) Calcule las fases de equilibrio metaestable presentes en este acero a (*a*) 1 000°C y (*b*) la temperatura ambiente.

(*a*) A 1 000°C, la estructura es 100% austenita, con 0.4% C en una solución sólida intersticial en hierro fcc.

(*b*) Si la proporción del eutectoide se denota como $E\,D$, la proporción de proeutectoide α a temperatura ambiente se puede obtener, como en el ejemplo 6-3, tomando una temperatura un poco superior a la de transformación:

$$\frac{\alpha}{\alpha + ED} = \frac{C_{ED} - C_0}{C_{ED} - C_\alpha} = \frac{0.77 - 0.40}{0.77 - 0.02} 100 = 49.3\%$$

La perlita eutectoide constituirá $100 - 49.3 = 50.7\%$ del volumen. Ambas fases se presentarán en las mismas proporciones en la microestructura (una rebanada bidimensional a través del cuerpo). Las proporciones de ferrita (F) y cementita ($C\,M$) en la perlita eutéctica se pueden obtener como en el ejemplo 6-2:

$$\frac{F}{F + CM} = \frac{C_{CM} - C_{ED}}{C_{CM} - C_F} = \frac{6.67 - 0.77}{6.67 - 0.02} 100 = 88.8\%$$

De esta forma, $100 - 88.8 = 11.2\%$ de laminillas de cementita (en peso) alternadas con laminillas de ferrita. También se podría calcular el peso total de la fracción α presente tanto en la ferrita como en la perlita, partiendo de la composición un poco por debajo de la temperatura eutectoide:

$$\frac{F}{F + CM} = \frac{C_{CM} - C_0}{C_{CM} - C_F} = \frac{6.67 - 0.4}{6.67 - 0.02} 100 = 94.3\%$$

Sin embargo, esto dice muy poco acerca de las propiedades del acero.

6-3 RELACIONES ESTRUCTURA-PROPIEDAD

La meta de la mayor parte de los procesos de manufactura es producir piezas que no sólo tengan el tamaño y la forma correctos, sino que también posean las mejores propiedades posibles. Para componentes de soporte de carga, esto exige resistencia elevada acoplada con una ductilidad aceptable, propiedades que se ven muy influidas por la estructura.

6-3-1 Metales y aleaciones de una sola fase

En la sección 4-1-1 se analizó que los metales sometidos a carga se deforman en un esfuerzo crítico. Cuando el espécimen deformado se observa bajo un microscopio óptico, la deformación parece haber tenido lugar por el *deslizamiento* de zonas adyacentes (Fig. 6-13*a*). En altas magnificaciones, cada *zona de deslizamiento* parece compuesta de muchas etapas pequeñas, indicando que el desplazamiento debió ocurrir a lo largo de *planos preferentes de deslizamiento* en cada cristal (Fig. 6-13*b*).

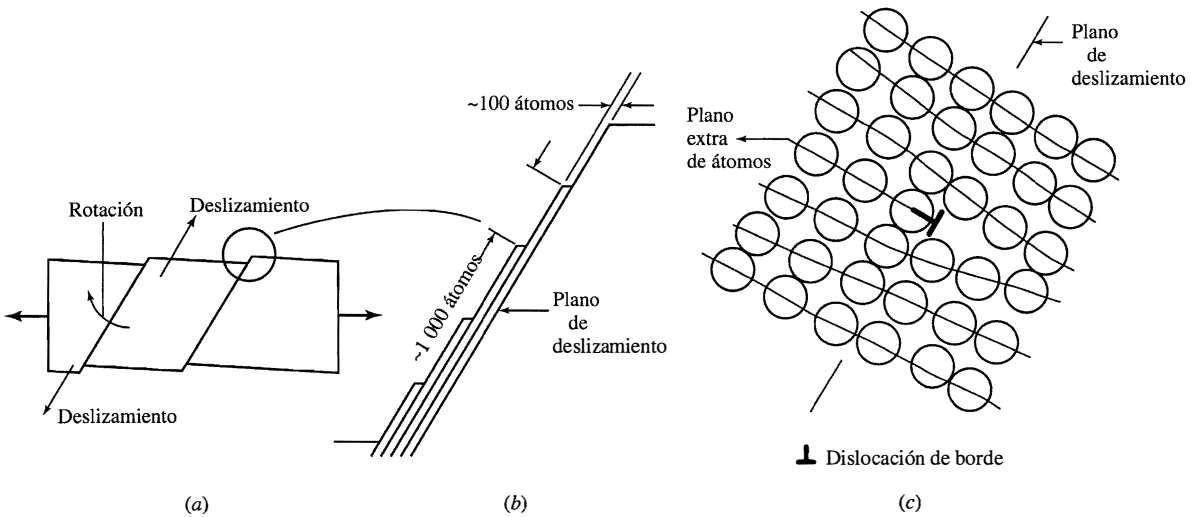


Figura 6-13 Un cristal individual sometido a tensión se deforma por (*a*) el deslizamiento de zonas adyacentes. (*b*) En una ampliación mayor, se descubren los planos de deslizamiento compactos. (*c*) Dentro de cada plano de deslizamiento, existen numerosos defectos lineales, como las dislocaciones.

Se pueden hacer cálculos para demostrar que el deslizamiento por el movimiento masivo de zonas completas de cristales adyacentes implicaría esfuerzos mucho más elevados que los que en realidad se observan. Por supuesto, se ha determinado que el deslizamiento ocurre por el movimiento de *defectos lineales* (*dislocaciones*) a lo largo de planos de deslizamiento preferidos en la red del cristal: los esfuerzos cortantes sobre estos planos deben alcanzar un valor crítico antes de que pueda comenzar la deformación. Este *esfuerzo cortante crítico* depende del metal, de la estructura cristalina y de la dirección del corte. Desde el punto de vista más sencillo, una dislocación se puede considerar como una línea extra o un plano de átomos insertados en la estructura (*dislocación de borde*, Fig. 6-13*c*); así, sólo es necesario dislocar dicha línea a lo largo del plano de deslizamiento, en vez de mover cientos de miles de átomos de un plano de deslizamiento, al mismo tiempo. Muchas de las características de la deformación de los metales se pueden interpretar contemplando la facilidad con la que estas dislocaciones se pueden mover y al considerar los obstáculos que puedan impedir o detener el movimiento.

Metales puros Se podría esperar que el movimiento de dislocación (deslizamiento) fuera más fácil sobre los planos que proporcionan el movimiento más suave, el camino menos accidentado; si los átomos se visualizan como esferas en contacto (Fig. 6-2), se tiene que el deslizamiento ocurre más fácilmente en los *planos más compactos* en las *direcciones cristalográficas más compactas*.

1. En la estructura fcc (Fig. 6-2*a*) hay cuatro planos compactos equivalentes (los planos octaédricos {111}) con tres direcciones de deslizamiento iguales ⟨110⟩, dando

un total de 12 *sistemas de deslizamiento* independientes (es decir, combinaciones de planos y direcciones de deslizamiento). Si el deslizamiento se limita en un plano debido a que las dislocaciones están detenidas, siempre existe la posibilidad de que otro sistema de deslizamiento esté orientado en la dirección del esfuerzo cortante de máxima deformación. Debido al empaque atómico compacto, el esfuerzo cortante crítico es relativamente bajo. En un cuerpo policristalino, los granos adyacentes evitan la deformación libre; si se va a evitar la fractura en la frontera de los granos, deben estar disponibles cinco sistemas independientes de deslizamiento. Esto se satisface en gran medida con las estructuras fcc, por lo que los metales fcc se conforman con facilidad, esencialmente en todas las temperaturas. En efecto, esto es una característica del Pb, Al, Cu, Ni e hierro-γ.

2. En la estructura bcc no se pueden identificar de inmediato los planos obviamente compactos, pero una dirección más compacta se encuentra en la diagonal del cuerpo (Fig. 6-2*b*). Por lo tanto, estos cristales se deslizan en sistemas que contienen varios planos con la diagonal del cuerpo $\langle 111 \rangle$ como una dirección común de deslizamiento, semejante a un atado de lápices. Este *deslizamiento de lápiz* permite una deformación extensa, por ejemplo en el hierro-α y el titanio-β. Sin embargo, como el empaque no es tan compacto como en los metales fcc, el esfuerzo cortante crítico debe ser mayor.

3. La deformación de las estructuras hcp está gobernada por la razón de las dimensiones altura a lado, la *relación c/a* (Fig. 6-2*c*). En una estructura hcp ideal esta razón sería 1.633.

a. Algunos metales presentan una razón *c/a* mayor; es decir, los planos basales están mucho más separados. Entonces, el deslizamiento sólo ocurre en los planos basales a lo largo de las tres direcciones equivalentes más compactas (*deslizamiento basal*, Fig. 6-2*c*, como en el zinc, $c/a = 1.856$).

b. Cuando la razón *c/a* es menor que la ideal, los átomos de los planos basales están en efecto aplastados entre sí, por lo que el deslizamiento se previene; el material elegirá planos de deslizamiento ya sea a lo largo del costado del prisma o sobre una superficie piramidal (*deslizamiento prismático* o *piramidal*, Fig. 6-2*d*). El ejemplo más importante de este comportamiento es el titanio-α ($c/a = 1.587$, a una temperatura por debajo de 880°C).

c. Un metal con una razón *c/a* cercana a la teórica no puede deslizarse con facilidad a lo largo de ninguno de estos planos y usualmente es necesario elevar un poco la temperatura, de manera que la libertad incrementada del movimiento atómico pone en juego un número de sistemas de deslizamiento. Esto se evidencia más en el magnesio ($c/a = 1.624$), que puede soportar muy poca deformación a temperatura ambiente, pero que se deforma fácilmente cuando se calienta a 220°C.

Con frecuencia la deformación en los materiales hcp es asistida por la *maclación* (la cual ocurre cuando una parte del cristal se voltea a una posición de imagen de espejo), trayendo más planos de deslizamiento hacia una dirección favorable relativa al esfuerzo cortante máximo.

Soluciones sólidas Las aleaciones de solución sólida tienen la estructura del metal solvente. La sustitución de los átomos del soluto con tamaño ligeramente diferente

distorsiona la red y hace más difícil la propagación de la dislocación en los planos de deslizamiento; así, la resistencia se incrementa sin reducir necesariamente la ductilidad. La mayor concentración de elementos de aleación asociada con la microsegregación puede causar un reforzamiento posterior; las dendritas menores (y aún más el espaciamiento menor del brazo secundario de las dendritas) contribuyen a una resistencia más elevada. Los elementos intersticiales tienen una función similar, al impedir la movilidad de la dislocación; aunque también pueden tener un efecto fragilizante si la bloquean por completo.

Ejemplo 6-7

Los beneficios de las aleaciones de solución sólida se ven claramente en el sistema Cu-Zn. En la condición recocida, hay un incremento útil en la resistencia con el aumento del contenido de zinc, e incluso la ductilidad se eleve más que la del cobre puro.

Composición, %	YS, MPa	TS, MPa	el.,%
Cu	70	220	55
Cu-5Zn	70	235	45
Cu-15Zn	70	270	55
Cu-30Zn	75	300	65
Cu-35Zn	97	320	65
Cu-40Zn	145	370	52

Así, la aleación Cu-30Zn es adecuada para la deformación pesada, como la que se necesita para hacer casquillos de cartuchos, de ahí el nombre tradicional *latón de cartucho.* El límite de solubilidad se excede con 35% Zn (Fig. 6-7) y la presencia de una segunda fase lleva a un incremento repentino en la resistencia y a la concomitante baja en la ductilidad.

6-3-2 Materiales de dos fases

Al considerar las propiedades de las estructuras de dos fases, es necesario reconocer que la presencia de éstas implica la existencia de una *interfase* entre ellas. La resistencia de enlace en esta interfase es crítica no sólo en las aleaciones de dos fases, sino también en todos los productos compuestos de entidades diferentes (Cap. 15).

Resistencia de la interfase Cualquier interfase, incluso una frontera de granos en un metal puro, es un sitio de muchos enlaces interatómicos rotos, insatisfechos, que resultan en una energía en exceso, la *energía interfasal* γ, cuya magnitud es mayor cuando el desequilibrio entre los agrupamientos atómicos adyacentes también lo es. De esta forma, la energía interfasal entre el vapor y el sólido γ_{SV} de una sustancia, digamos un metal, es mucho mayor que la existente entre sus fases líquida y sólida γ_{SL}. Las magnitudes relativas de las energías interfasales entre dos materiales disímiles se pueden juzgar fácilmente colocando una gota de uno sobre la parte superior de la superficie

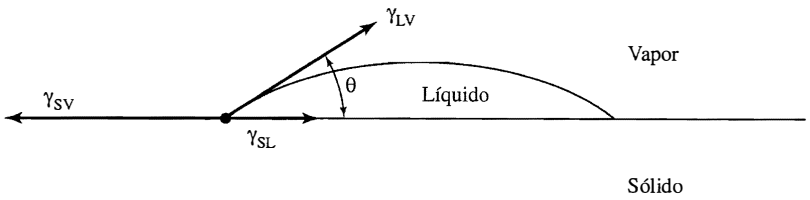


Figura 6-14 Un líquido humedece la superficie sólida cuando el ángulo θ es pequeño.

plana del otro. La gota no se mueve (de ahí el nombre *gota sésil*), pero es libre para cambiar su forma hasta que las *tensiones superficiales* establecen un equilibrio de fuerzas (Fig. 6-14):

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta \tag{6-6}$$

Cuando $\theta < 90°$, la superficie se *humedece* y la gota se difunde; cuando $\theta > 90°$, la superficie *no se humedece* y el líquido forma, en el límite, una gotita esférica.

El humedecimiento, entonces, es una indicación de las energías superficiales relativas y, a través de ellas, una medida de la resistencia de la interfase. La humedad es un signo de una compatibilidad razonable entre las redes atómicas de las fases en contacto, por lo que se puede esperar que una interfase húmeda resista esfuerzos que podrían separar las fases. Una interfase no húmeda, por otro lado, se puede comportar como una grieta preexistente y dañar las propiedades mecánicas (Secc. 4-1-6). Se debe recordar que la tensión superficial es un efecto de superficie; por lo tanto, aun las cantidades más diminutas de un contaminante segregadas en la interfase, pueden reducir de manera sustancial el humedecimiento.

Propiedades mecánicas Con estos preliminares en mente, se esperaría intuitivamente que las propiedades de una estructura de dos fases dependan de una variedad de factores tales como propiedades, cantidad, distribución, forma y tamaño de las fases individuales, y de la naturaleza de las interfases entre ellas. Se pueden concebir algunas situaciones básicamente diferentes (Fig. 6-15).

1. *Ambas fases son dúctiles y se humedecen una a la otra.* El material se comporta como un cuerpo homogéneo: las dislocaciones pasan libremente a través de ambas fases y las propiedades se pueden estimar por medio de los volúmenes relativos de las dos fases (éste es el caso para las aleaciones de Cu-Ag).

2. *Una de las fases es dúctil, la otra es frágil y humedecida.* Aquí las propiedades, la cantidad relativa, la forma (*morfología*) y la localización de la fase frágil se convierten en dominantes, porque las dislocaciones pasarán libremente a través de la fase dúctil, pero se bloquearán en la fase frágil.

a. Si la fase frágil es la matriz (es decir, la otra fase está embebida en ella), la estructura resultante será frágil; puede tener una resistencia elevada a la compresión, pero la resistencia a la tensión y a la ductilidad son bajas porque las grietas iniciadas en

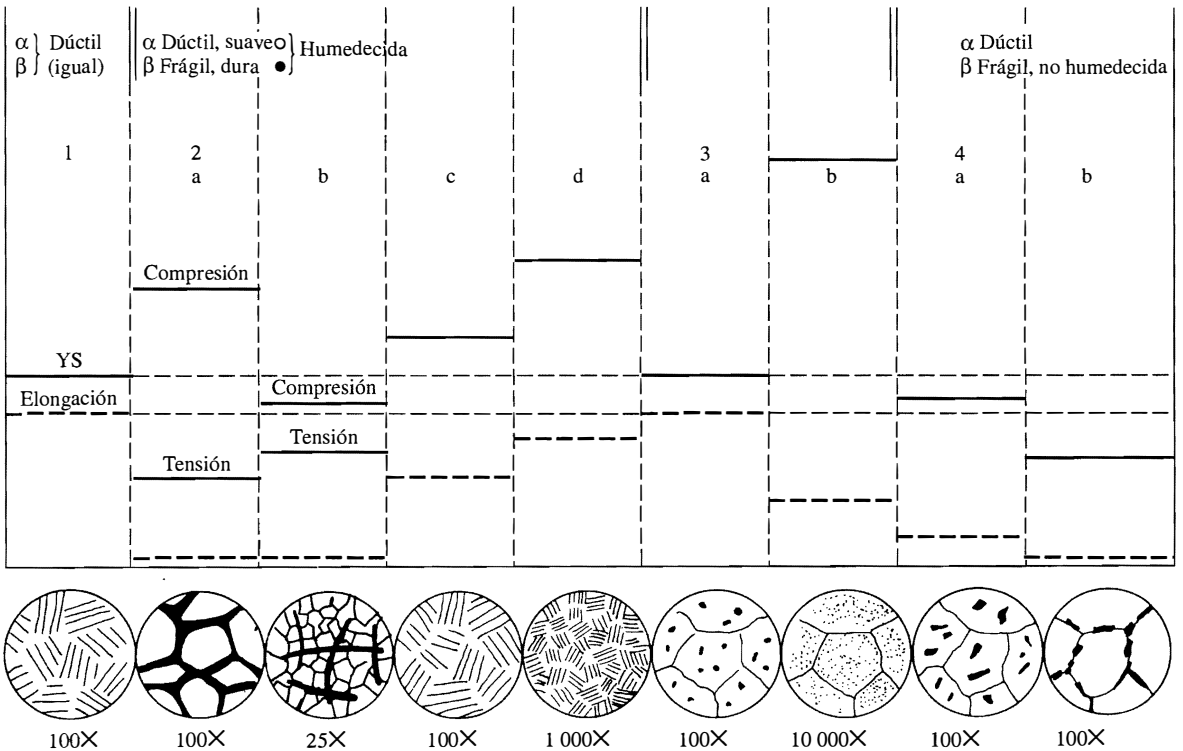


Figura 6-15 Las propiedades de las estructuras de dos fases dependen de las propiedades del humedecimiento, forma, tamaño y distribución de ambas fases. Note las ampliaciones diferentes para las microestructuras esquemáticas.

la fase frágil se propagarán con facilidad a través del material (un ejemplo es el hierro fundido blanco).

b. Si la matriz es dúctil, pero se tejen a través de ella placas gruesas (*láminas*) o agujas (*acículas*) de la fase frágil, dicha fase causa concentraciones de esfuerzos al someterla a carga, y las grietas se propagan por la fase frágil; la estructura será débil y de baja ductilidad, y también tendrá una tenacidad a la fractura baja (por ejemplo, el efecto de los sulfuros que se muestra en la figura 6-16).

c. Si las placas más finas de una fase frágil fuerte están confinadas dentro de un grano y sistemáticamente alineadas en una estructura laminar, reforzarán de modo sustancial la matriz, pero con frecuencia a costa de la ductilidad, dado que las placas frágiles se fracturan durante la deformación y los incrementadores de esfuerzos terminan la deformación plástica en la matriz dúctil. Un ejemplo se muestra con los carburos perlíticos en la figura 6-16.

d. Si la estructura de placas es extremadamente fina y compacta, de manera que la fase dura actúe como una barrera para la movilidad de la dislocación, la estructura

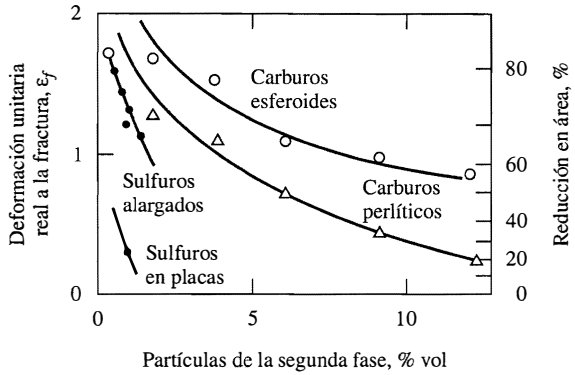


Figura 6-16 La ductilidad es muy sensible a las partículas de la segunda fase, especialmente si son de forma no favorable y de ductilidad baja. (*Según T. Gladman, B. Holmes, y L.D. McIvor, en Effect of Second-Phase Particles on the Mechanical Properties of Steel, Iron and Steel Institute, Londres, 1971. Se reproduce con autorización de The Metals Society.*)

compuesta puede presentar resistencia elevada acoplada con una ductilidad razonable porque el endurecimiento rápido por deformación retrasa la estricción (Secc. 8-1-1).

3. *El constituyente duro se humedece debido a la fase suave y está en una forma casi esferoide.*

a. Si las partículas duras son relativamente gruesas y están muy espaciadas, sólo tienen un efecto menor en la resistencia del material. La ductilidad se reduce, pero no excesivamente (carburos esferoides en la figura 6-16) porque las dislocaciones circunnavegan grandes bloques de material duro, y el efecto de muesca es mínimo debido a su gran radio.

b. Cuando el tamaño de la partícula es lo suficientemente pequeño como para detener o aminorar las dislocaciones, la estructura se refuerza. Son muy efectivas las partículas demasiado delgadas que aun retienen su registro atómico con la matriz (*precipitados coherentes* en las aleaciones de Al-Cu, Fig. 6-19). Si las partículas forman una segunda fase claramente definida, el resultado depende de la cantidad y del espaciamiento totales de las partículas duras. Se puede obtener un gran refuerzo cargando la matriz dúctil con masas de partículas (hasta que se convierta en algo más que un cemento dúctil), pero entonces la ductilidad sufrirá mucho. Lo anterior se explota en el curso de los materiales para herramientas (Secc. 16-3-1).

c. Las partículas pequeñas localizadas en las fronteras y dentro de los granos son efectivas al bloquear el movimiento de dislocación y el deslizamiento de la frontera de grano, de ahí que las aleaciones *endurecidas por dispersión* presenten un rápido endurecimiento por deformación y una buena resistencia al desplazamiento.

4. *La fase dura no se humedece por la matriz.* La interfase entre las fases actúa como una grieta previamente hecha.

a. Cuando las partículas no humedecidas están dentro de granos dúctiles, pueden ser relativamente inofensivas, aunque cualesquiera grietas que se formen pueden unirse

con facilidad, reduciendo mucho la ductilidad. Si el material base es relativamente frágil, la resistencia también se reduce porque la interfase actúa como una muesca.

b. Las partículas no humedecidas son las más dañinas cuando se localizan en la frontera de los granos, la cual tiende a ser menos dúctil en cualquier caso.

Ejemplo 6-8

Una idea de los efectos de la estructura se puede obtener a partir de los datos típicos de las propiedades mecánicas de los aceros al carbono recocidos:

Núm. AISI	YS, MPa	TS, MPa	el., %	RA,%	HB, kg/mm²
1 008	210	350	38	70	95
1 015	285	385	37	70	110
1 020	295	395	36	65	110
1 040	350	520	30	57	150
1 080	375	615	25	45	175
1 090	380	655	13	20	192

Note el incremento gradual de la resistencia y la disminución de la ductilidad con el incremento del contenido de perlita hasta la composición eutectoide y la baja pronunciada de la ductilidad con la aparición de la cementita secundaria en la frontera de los granos en el acero 1090.

6-3-3 Aleaciones ternarias y de componentes múltiples

En la práctica, se usan muy pocas *aleaciones de metales puros* o *binarias* (es decir, aleaciones formadas por dos especies atómicas). Los contaminantes siempre están presentes, aun si son solamente del orden de algunas partes por millón, mientras que las adiciones intencionales pueden alcanzar proporciones tan elevadas que se hace difícil clasificar un material de acuerdo con su metal base. Tales aleaciones *ternarias, cuaternarias*, etcétera (*sistemas de componentes múltiples*), presentan todavía las fases distintivas encontradas en las aleaciones binarias. Así, se pueden encontrar soluciones sólidas, eutécticas, peritécticas, intermetálicas, y sus diferentes combinaciones. El comportamiento y las propiedades de los sistemas de componentes múltiples se pueden derivar por analogía con los materiales de dos fases, especialmente si se conoce el diagrama de fase, o si al menos se ha establecido una sección del mismo (un *diagrama pseudobinario*, para porcentajes constantes de los otros elementos de la aleación). Se han hecho grandes progresos al usar la computadora para predecir qué fases esperar en las aleaciones de componentes múltiples, a cualquier temperatura y composición, por medio de diagramas de fase binarios y de una base de datos de información termodinámica.

Ejemplo 6-9

Todo el grupo de mecanismos de refuerzo se aplica en las superaleaciones de Ni y Co para usos en temperatura elevada, como los álabes de turbinas. El Cr, el Mo y el W proporcionan un reforzamiento de solución sólida, efectivo aun a temperaturas elevadas; el Al y el Ti proporcio-

nan endurecimiento por precipitación; y varios elementos (Ti, B, Zr, Ta, Cr, Mo, W) forman carburos muy finos, estables a altas temperaturas, que impiden el movimiento de dislocación así como el deslizamiento en la frontera de grano. La superaleación con base en Ni MAR-M 200 (Ni-9Cr-10Co-1Fe-5Al-2Ti-1Nb-12.5W-0.15C-0.015B-0.05Zr) tiene un rango de fusión de 1 315-1 370°C y mantiene una resistencia útil más allá de $0.5T_m$:

Temperatura, °C	YS, MPa	TS, MPa	el., %
21	840	930	7
540	850	945	5
650	855	950	4
760	840	930	3.5
870	760	840	4
980	470	550	4.5
1 090		325	

6-3-4 Inclusiones

El término *inclusión* se usa para describir partículas extrañas en una estructura metálica. Éstas encuentran su camino hacia la aleación usualmente desde la mena, durante la fusión (por ejemplo, desde el recubrimiento del horno, contaminación de la carga, o incluso como resultado de la reacción —oxidación— con la atmósfera circundante) o el vaciado. Al igual que con todas las partículas de segunda fase, su efecto depende en gran parte de que estén humedecidas por la matriz o no lo estén (Secc. 6-3-2).

Si las inclusiones se humedecen son fuertes e incluso dúctiles, están dispersas dentro de los granos en una forma cercanamente globular o fibrosa, son inofensivas y algunas veces útiles. Arregladas a lo largo de las fronteras de grano probablemente son dañinas, a menos que sean demasiado pequeñas y estén bien distribuidas. Las placas frágiles, y particularmente las películas (como las que se forman por el óxido de aluminio), son perjudiciales, al igual que las inclusiones de baja resistencia con forma alargada o de placa. Puede ser que la resistencia no se vea afectada en gran medida, pero se daña la ductilidad (Fig. 4-7; también los sulfuros en la Fig. 6-16), la resistencia a la fatiga y la tenacidad de fractura. De ahí que nuestro objetivo sea por lo general producir metales limpios, libres de inclusiones, excepto cuando las de tamaño y forma controladas se introduzcan de modo intencional para mejorar la maquinabilidad (Secc. 16-2).

Las inclusiones no húmedas casi siempre son dañinas, reduciendo las propiedades de resistencia, ductilidad, fatiga e impacto del material. Si hay gases presentes, tienden a congregarse en la interfase entre la inclusión y la matriz y pueden acumular presiones tan elevadas que se forma una burbuja (ampolla) en las inclusiones cerca de la superficie, particularmente si en servicio la parte está a temperatura elevada, o si se calienta durante su manufactura. Incluso dentro del cuerpo los gases que se segregan sobre las interfaces no húmedas agravan el efecto de las grietas y ocasionan a la fragilidad (por ejemplo, fragilidad de hidrógeno en el acero, Secc. 18-4-2).

Ejemplo 6-10

Del análisis anterior resulta evidente que incluso cambios menores en la estructura pueden influir en las propiedades mecánicas. Esto también significa que cualquier material producido con una especificación dada, presentará una gama de propiedades; es muy importante tomar en cuenta que se debe distinguir bien entre las *propiedades características* y el *rango en propiedades* real, como se muestra con el ejemplo de una lámina de acero calmado recocido al bajo carbono, especialmente preparada con calidad de estirado (DQSK, por sus siglas en inglés):

	YS, MPa	TS, MPa	el., %	HRB
Típica	170	290	42	40
Rango	140-210	260-340	31-47	34-51

En este libro, a menos que se especifique de otra manera, los datos se refieren a las propiedades usuales.

6-3-5 Gases

Por lo general los gases existen en forma molecular, pero a temperaturas elevadas y en contacto con un metal, una porción importante puede disociarse en la forma atómica y entrar al metal. Los gases se pueden acomodar intersticialmente en la relativamente suelta y no ordenada estructura de los metales fundidos. De esta forma, la solubilidad de los gases puede ser alta por encima del punto de fusión (Fig. 6-17), pero disminuye mucho cuando la fusión solidifica. Un poco de gas puede quedar atrapado en el sólido en la forma atómica, pero gran parte se expulsa en la interfase sólido/líquido para combinarse en moléculas. Estas moléculas se fusionan en burbujas de gas que se elevan en la fusión o, si son atrapadas durante la solidificación, causan *porosidad del gas* (*aguje-*

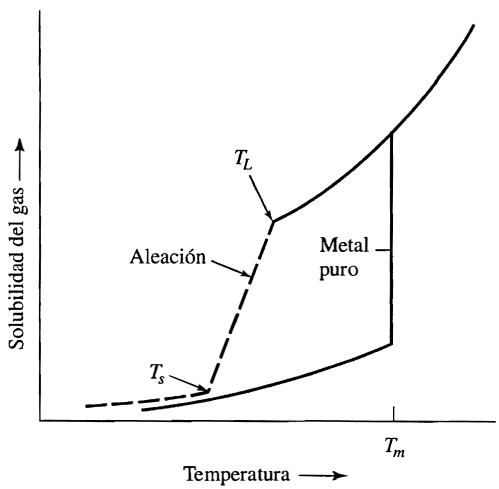


Figura 6-17 La solubilidad de los gases disminuye mucho en la solidificación.

ros de alfiler o *sopladuras* más grades) en la estructura. En contraste con la porosidad interdenderítica, los poros de gas suelen ser redondos y si contienen un gas neutro o reductor, tienen una superficie limpia y brillante. También se pueden considerar como inclusiones de resistencia cero, pero sus radios mayores los hacen menos dañinos para las propiedades mecánicas. También pueden causar ampollamiento, como se analizó en conjunción con las inclusiones no húmedas.

No todos los gases son igual de solubles en todos los metales. El hidrógeno es soluble en casi todos los metales debido al tamaño reducido de sus átomos. Se puede introducir en la fusión por la disociación del agua proveniente del aire, de la carga o de los productos de combustión. Es particularmente problemático para las aleaciones de aluminio y magnesio. En contraste con el hidrógeno, el nitrógeno es soluble en el hierro pero no en los metales no ferrosos. El oxígeno es soluble en el acero. Los gases nobles (de los cuales el argón es técnicamente el más significativo) son por completo insolubles.

La solubilidad S de cualquier gas en la fusión se incrementa (o disminuye) con la raíz cuadrada de la *presión parcial del vapor* p_g de ese gas en la fusión (ley de Sievert)

$$S = k\sqrt{p_g} \tag{6-7}$$

donde k, la constante de equilibrio, disminuye mucho con la solidificación (Fig. 6-17). Se deduce que la concentración de cualquier gas en la fusión puede reducirse ya sea disminuyendo la presión general del gas (*desgasificación por vacío*), o burbujeando un gas *expulsor* no soluble poco antes del vaciado. Como la presión parcial del gas dañino es cero en las burbujas del expulsor, el primero se retira de la solución hacia el gas expulsor ascendente y se remueve.

Algunos gases se pueden hacer inofensivos combinándolos con otros elementos. Un ejemplo fundamental es la *desoxidación*, aunque se debe tener cuidado de que el producto de la reacción misma sea inofensivo (Secc. 7-4, 8-3 y 10-1).

Ejemplo 6-11

La solubilidad máxima de equilibrio del hidrógeno en el magnesio líquido es de 26 cm^3 H/100 g; disminuye a 18 cm^3 H/100 g al solidificar. ¿Cuál será la porosidad si el Mg líquido saturado con H se pudiera solidificar?

El volumen de H expulsado en la solidificación es $26 - 18 = 8$ cm^3.

El volumen de Mg es $100 \text{ g}/(1.74 \text{ g/cm}^3) = 57.5$ cm^3.

El sólido se verá como queso suizo y tendrá un volumen total de $8 + 57.5 = 65.5$ cm^3, del cual $8/65.5 = 0.122$ o 12.2% en vol. serán poros.

Ejemplo 6-12

Cuando la presión parcial del hidrógeno es de 1 atm por encima de una fusión de aluminio, la solubilidad de equilibrio del gas es 0.7 cm^3/100 g Al. La solubilidad máxima en el Al sólido es 0.04 cm^3/100 g. ¿Cuál será la presión parcial de vapor p_{H_2} que se debe mantener sobre la fusión para obtener una fundición libre de poros?

Sustituyendo en la ecuación (6-7) para el líquido, se obtiene la constante de equilibrio

$$0.7 \text{ cm}^3/100 \text{ g} = k\sqrt{1 \text{ atm}}$$

$$k = 0.7\left(\text{cm}^3/100 \text{ g}\sqrt{\text{atm}}\right)$$

Para el sólido

$$0.04 = 0.7\sqrt{p_{H_2}}$$

$$p_{H_2} = (0.04/0.7)^2 = 0.0033 \text{ atm}$$

Note que se debe mantener una presión parcial de vapor muy baja.

6-3-6 Efectos del tamaño del grano

En un material policristalino, a temperaturas relativamente bajas, los granos individuales se pueden deformar sólo por la propagación de las dislocaciones. Las fronteras de grano representan defectos en la estructura y por ello son fuentes de dislocaciones. Sin embargo, al mismo tiempo las fronteras de grano muestran obstáculos para la propagación de las dislocaciones. Por lo tanto, se ha determinado que *el límite elástico de un material se incrementa con la disminución del tamaño de grano* (Fig. 6-18), de acuerdo con la relación de Hall-Petch[1]

$$\sigma = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \tag{6-8}$$

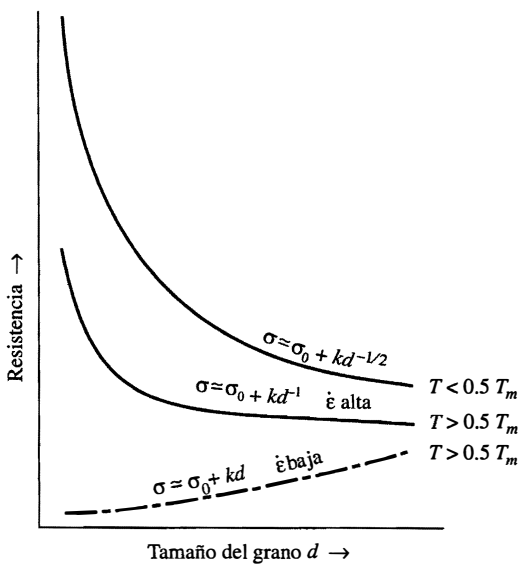


Figura 6-18 La resistencia de los metales se incrementa con la disminución del tamaño de grano, excepto cuando la deformación tiene lugar a temperaturas homólogas elevadas y velocidades de deformación bajas, con una difusión masiva de los átomos.

[1] E.O. Hall, *Proc. Phys. Soc. London*, **64B**:747 (1951); N.J. Petch, *J. Iron Steel Inst. London*, **173**:25 (1953).

donde d es el tamaño promedio del grano y σ_0 y k_y son constantes del material. En algunos metales (como en las aleaciones de Al), una concordancia aún mejor se encuentra entre la resistencia y el *tamaño de los subgranos* (subunidades relativamente libres de deformación dentro del grano mayor, configuradas con una desorientación cristalográfica ligera).

Ejemplo 6-13

Como se indicó en el ejemplo 6-7, el latón de cartuchos se usa para deformaciones grandes, con mucha frecuencia en forma de lámina. En la condición recocida está disponible con un tamaño controlado del grano, lo cual determina las propiedades mecánicas. La designación O5 indica que el recocido produjo un tamaño promedio prescrito del grano, expresado en unidades de μm (así, O5025 muestra un tamaño promedio del grano de 25 μm).

Designación	YS, MPa	TS, MPa	el., %	HRF
O5100	75	300	68	54
O5050	105	325	62	64
O5025	130	350	55	72
O5015	150	365	54	78

Cuando los datos se grafican en una escala logarítmica en ambos ejes, los resultados se adaptan razonablemente bien a una ley de potencia, aunque el exponente es un poco menor que el requerido en la ecuación (6-8). Se han determinado resultados similares para el acero.

Se debe resaltar que la ecuación (6-8) sólo es válida cuando la propagación de la dislocación es el principal mecanismo de deformación. Esto es cierto para la deformación en el *rango de temperatura fría* (Fig. 4-15), es decir, por lo general debajo de $0.5T_m$ en la escala de temperatura homóloga. A temperaturas elevadas, en el *rango de temperatura caliente*, son posibles otros modos de deformación a determinadas velocidades de deformación $\dot{\varepsilon}$ [ecuación (4-17)]. A velocidades de deformación elevadas, el movimiento de la dislocación aún domina (aunque otros mecanismos también intervienen, Secc. 8-1-6) y la resistencia disminuye con el incremento del tamaño de grano (Fig. 6-18). Sin embargo, a velocidades de deformación muy bajas, típicas de la termofluencia (Secc. 4-6), y a temperaturas próximas a T_m, hay tiempo para que ocurra una difusión sustancial. La pieza puede deformarse por el deslizamiento de granos como bloques completos, relativos uno al otro, o por el reformado de granos individuales en dirección de la carga. Ambos procesos son más fáciles si el tamaño de grano es pequeño, de ahí que la resistencia a la termofluencia disminuya con el tamaño de grano, por lo que un *tamaño grande de grano (incluso un grano individual) es preferible para materiales destinados al servicio a temperaturas elevadas.*

6-4 TRATAMIENTO TÉRMICO

En capítulos posteriores se analizará cómo se pueden variar las condiciones durante la solidificación para controlar las propiedades de la pieza terminada. Incluso con el mejor control, quizá no se obtengan las propiedades deseadas, por lo que la parte ya solidificada se puede someter a un tratamiento posterior.

6-4-1 Recocido

El *recocido* es el proceso de calentar un material a una temperatura elevada, mantenerlo en ella, y enfriarlo de regreso a la temperatura ambiente. La rapidez de calentamiento y del enfriamiento quizá se deban controlar. Las reacciones indeseables, en particular la oxidación, son importantes a temperaturas elevadas; si esto es inaceptable, el recocido se lleva a cabo al vacío o en una atmósfera de un gas inerte o reductor. El recocido puede servir para varios propósitos:

1. Ya se analizó el *alivio de esfuerzos por recocido* en la sección 4-7; usualmente se realiza debajo de la temperatura a la cual ocurriría la recristalización o la transformación de fase.

2. En algunas aplicaciones, las variaciones de la composición debidas a la solidificación no equilibrada (Secc. 6-1-6) no son satisfactorias. Por tanto, la pieza se puede someter a un *recocido de homogeneización*, así se calienta un poco por debajo de la temperatura solidus (T_S) y se mantiene, usualmente por varias horas, hasta que la difusión ecualiza la concentración del elemento de aleación en toda la pieza. Si las distancias en las cuales debe ocurrir la difusión (*trayectorias de difusión*) son grandes, los tiempos sostenidos se pueden incrementar hasta por varios días. Aún así, algunos elementos se pueden difundir muy lentamente como para lograr una homogeneización completa. Se debe tener en mente que si la solidificación no fue equilibrada, es factible la presencia de un eutéctico de bajo punto de fusión y la pieza se puede distorsionar, o en casos extremos, incluso desintegrarse (ejemplo 6-5).

3. La forma de las partículas de la segunda fase se puede cambiar manteniendo la temperatura por debajo de la temperatura de transformación. La aplicación más importante es el tratamiento de *esferoidización* de los aceros (Secc. 6-4-3).

4. El propósito del recocido puede ser remover los efectos del trabajado en frío; tal *recocido de proceso* se analizará en la sección 8-1-5.

6-4-2 Endurecimiento por precipitación

En sistemas de aleación en que la solubilidad de uno de los elementos aleantes cambia con la temperatura, hay oportunidades para influir en las propiedades mecánicas a través de varios tratamientos térmicos, especialmente si el exceso de soluto se expulsa en forma de un compuesto intermetálico. El ejemplo que se muestra en la figura 6-19 es para una aleación de Al-4Cu.

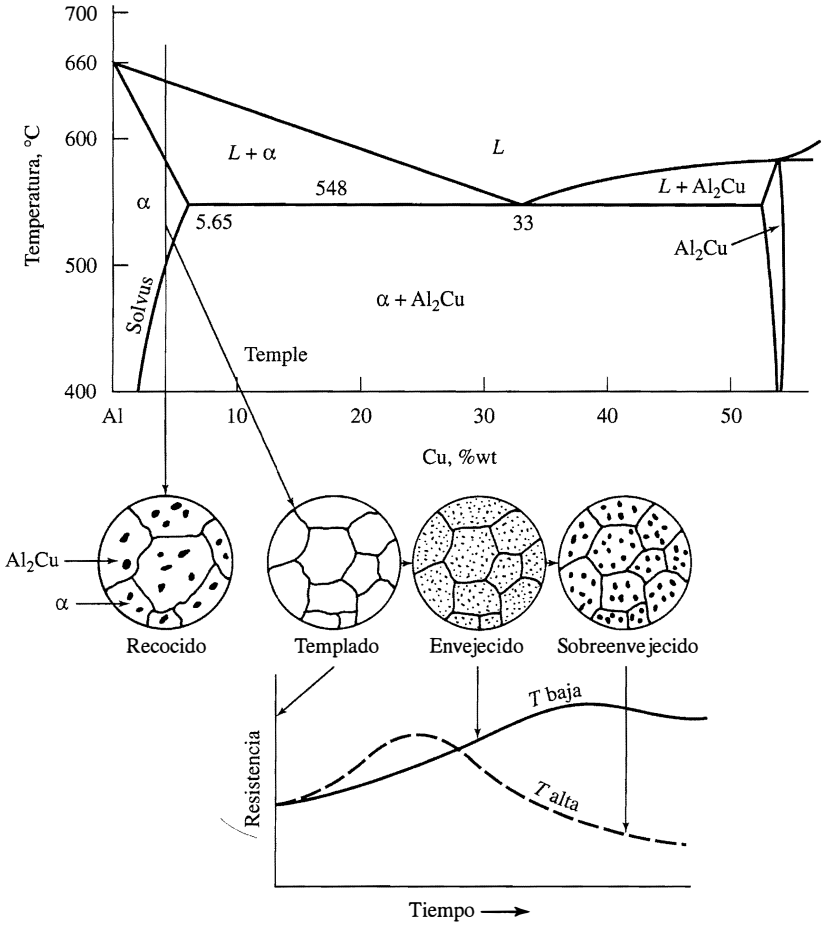


Figura 6-19 Después de la solidificación, algunas aleaciones se pueden reforzar sustancialmente por medio del tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación.

Recocido Cuando la aleación se enfría con lentitud a través de la línea solvus, los átomos del soluto expulsado se combinan con los átomos del solvente para formar partículas A_mB_n de la segunda fase, grandes y estables (Fig. 6-19, Recocido). Las relativamente pocas y grandes partículas (en este caso, el intermetálico duro y frágil $CuAl_2$) tienen poco efecto en la resistencia o ductilidad.

Endurecimiento por precipitación Se puede obtener una mejora sustancial a través de una secuencia de pasos:

1. *Tratamiento de solución.* Las partículas de la segunda fase se disuelven por completo, calentando la aleación en el rango de temperatura de solución sólida homogénea α. Esto se termina más rápido a temperaturas más cercanas a la solidus, pero la posible

presencia de fases no equilibradas de nuevo debe considerarse. También, las temperaturas elevadas del tratamiento de la solución pueden permitir el crecimiento de algunos granos a costa de los otros, y la estructura de grano grueso tendrá una resistencia menor.

2. *Templado.* La solución sólida se preserva y la difusión de átomos y la precipitación de las partículas de segunda fase se suprimen por medio del *templado* rápido, comúnmente en agua. La solución sólida que resulta (Fig. 6-19, Templada) es *metaestable*; es decir, se revierte a la estructura estable de dos fases si las condiciones son favorables para la difusión.

3. *Precipitación.* En muchas aleaciones, la precipitación procede a temperatura ambiente y entonces se habla de *envejecimiento natural.* La difusión se limita a distancias cortas; la precipitación comienza en muchos sitios, siendo las partículas precipitadas delgadas y coherentes (Fig. 6-19, Envejecida). En otras aleaciones, la difusión es demasiado lenta a temperatura ambiente y se acelera manteniéndola a una temperatura elevada; esto se llama *envejecimiento artificial.* Como se muestra en la figura 6-15, la resistencia se incrementa sustancialmente sin pérdida de ductilidad excesiva; de esta forma, la secuencia completa del tratamiento térmico también se llama *endurecimiento por precipitación.*

4. *Sobreenvejecimiento.* Cuando una parte tratada por solución se somete a temperaturas elevadas, la difusión posterior resulta en menos precipitados, más gruesos, no coherentes, estables, y la resistencia de la estructura (Fig. 6-19, Sobreenvejecida) declina. El sobreenvejecimiento también ocurre en el servicio si el material se expone a temperaturas excesivas.

No se obtienen beneficios si los precipitados no son coherentes. Por esta razón, las aleaciones de Al-Mg (Fig. 6-9) no son endurecibles.

Ejemplo 6-14

La aleación de aluminio 2024 se usa extensamente en la construcción de aeronaves y para otras aplicaciones que requieren razones elevadas de resistencia a peso. Contiene 3.8-4.9% Cu y la mayor parte de las veces se usa en la condición tratada térmicamente.

Condición	Código	YS, MPa	TS, MPa	el., %	HB, kg/mm²
Recocida	–0	75	185	20	47
Tratada por solución y envejecida naturalmente	–T4	325	470	20	130
Tratada por solución y envejecida artificialmente	–T6	415	480	13	

Note el tremendo incremento en las YS y TS en el envejecimiento natural, sin pérdida de ductilidad. La precipitación es relativamente rápida, con un incremento notable en la YS después de sólo 1 h, y un endurecimiento casi completo después de 10 h. El envejecimiento artificial confiere una YS mucho mayor con alguna pérdida de ductilidad.

6-4-3 Tratamiento térmico del acero

Los sistemas de aleación con transformaciones de estado sólido ofrecen una variedad de posibilidades de tratamiento térmico, que son mejor exploradas en el ejemplo del sistema Fe-Fe_3C (Fig. 6-11).

Aceros al carbono En la práctica, los aceros al carbono contienen hasta 1.7% de C; la composición eutectoide se encuentra a aproximadamente 0.8% de C. Los *aceros hipereutectoides* (es decir, los que contienen 0.8-1.7% de C) son duros pero frágiles, debido a la presencia de cementita secundaria y su aplicación es limitada. La mayoría de los aceros son *hipoeutectoides* (o sea que contienen menos de 0.8% de C) y su estructura consiste en una solución sólida α y una perlita eutectoide. La distribución de las fases y la morfología del eutectoide dependen de la historia de enfriamiento: la perlita es más gruesa en secciones de mayor espesor donde el enfriamiento más lento permite la difusión sobre amplias distancias. Recalentar la parte sólida hasta el rango γ homogéneo (*austenizado*) causa la disolución de todo el C presente; subsecuentemente, la formación de Fe_3C se puede controlar eligiendo una velocidad apropiada de enfriamiento a través de la temperatura de transformación. Los núcleos se resumen gráficamente en los diagramas de *tiempo-temperatura-transformación* (TTT), de los cuales un ejemplo se da en la figura 6-20 para el acero de composición eutectoide.

Por arriba de 723°C existe la austenita estable. Al enfriarse por debajo de 723°C, la austenita se descompone en ferrita de bajo carbono (α) y en cementita (Fe_3C). Como la difusión del C lleva tiempo, la austenita metaestable existe por algún tiempo. La transformación comienza y se completa sólo después de que ha transcurrido cierto tiempo, el cual es una función de la temperatura, dando las curvas características en forma de "C" o sigmoidales en el diagrama TTT.

1. En enfriamiento lento (Fig. 6-20, línea 1) la curva de transformación se cruza a una temperatura elevada. La perlita se nuclea en las fronteras de grano de la austenita; la difusión es rápida, y la estructura consistirá en laminillas gruesas de cementita en una matriz de ferrita. Esta *perlita laminar* gruesa es relativamente suave pero no dúctil. El tratamiento térmico que consiste en austenización seguida por enfriamiento lento al aire se llama *recocido de normalización.* La cementita puede ser cambiada a una forma esferoidal manteniendo el acero un poco por debajo de la temperatura eutectoide, o calentándola y enfriándola en forma repetida un poco por arriba y por debajo de dicha temperatura. Los aceros *esferodizados* (Fig. 6-12*c*) tienen una resistencia menor pero una ductilidad mucho mayor.

2. En un enfriamiento más rápido (Fig. 6-20, línea 2), la curva se cruza a temperaturas menores. La difusión es más lenta y la estructura consistirá en perlita mucho más fina pero aún laminar, de mayor resistencia (Fig. 6-15).

3. Si el acero se enfría muy rápidamente y después se mantiene a una temperatura intermedia, digamos alrededor de 300°C, la nariz de la curva de transformación no se cruza y la transformación ocurre *isotérmicamente*, a lo largo de la línea 3 en la figura 6-20, con la formación de *bainita* (*austemperizado*). En ésta, la falta de tiempo de difusión hace que las partículas de carburo aparezcan como esferoides extremadamente finos en una matriz de solución sólida α. Como se espera de la figura 6-15, una estruc-

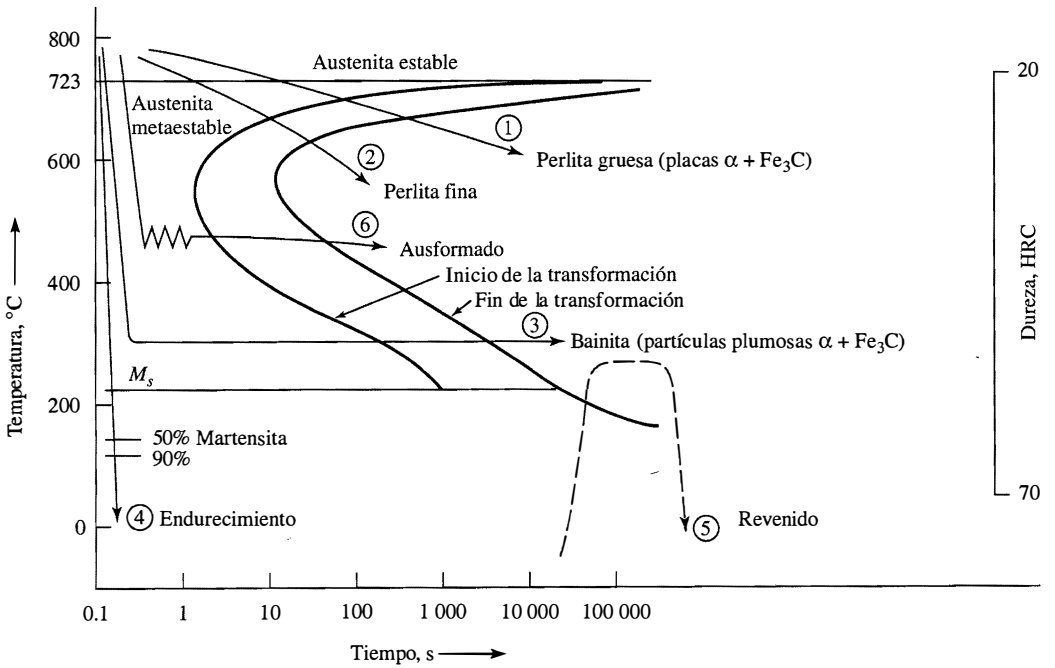


Figura 6-20 Dependiendo de las velocidades de enfriamiento, la descomposición eutectoide de la austenita puede propiciar una variedad de estructuras. El ejemplo que se muestra es para el acero con un contenido de 0.8% de C; la dureza de las estructuras resultantes se da, aproximadamente, en la ordenada a la derecha.

tura como ésta posee una combinación deseable de resistencia y ductilidad. La transformación isotérmica que ocurre alrededor de los 400°C resulta en la formación de perlita muy fina (explotada en el *tratamiento térmico patentado*).

4. Cuando el enfriamiento es de nuevo suficientemente rápido para no cruzar por completo la nariz de la curva (Fig. 6-20, línea 4), pero ahora se lleva a temperatura ambiente (*templado*), la separación de la fase de carburo se suprime, aunque la transformación sin difusión del hierro de la forma fcc a la bcc no se puede evitar. La transformación inicia a la temperatura marcada M_S en la figura 6-20 y se completa antes de que se alcance la temperatura ambiente. Los átomos de carbono se retienen en una solución sólida supersaturada, distorsionando la estructura bcc a una red tetragonal centrada en el cuerpo. Esta estructura altamente esforzada (*martensita*) es muy dura y frágil. La formación de la martensita resulta en un incremento del volumen, y esto puede conducir a *grietas de templado* en la superficie de una pieza: la martensita se forma primero en la superficie; cuando el centro se transforma, su expansión pone a la superficie en tensión y la martensita frágil se agrieta.

5. La ductilidad se puede restaurar recalentando la martensita (Fig. 6-20, línea 5) de manera que el carburo se pueda precipitar en una forma muy fina. La resistencia y la dureza de esta *martensita templada* es un poco más baja, pero el sacrificio está bien

justificado ante el incremento de la ductilidad y de la tenacidad. El calentamiento a temperaturas todavía más elevadas causa *sobretemplado*: las partículas de Fe_3C se hacen más gruesas y la dureza baja. (Se debe subrayar que existe martensita en diferentes sistemas de aleación, pero no todas son necesariamente duras.)

Los aceros al carbono deben tener un mínimo de 0.2% de C para beneficiarse del endurecimiento martensítico. Una desventaja es que el templado rápido provoca gradientes de temperatura pronunciados; la contracción diferencial resulta en la generación de esfuerzos internos altos, lo cual puede conducir a agrietamientos e incluso a la desintegración de la pieza.

Ejemplo 6-15

Una pieza hecha de acero AISI 1040 se someterá a un tratamiento térmico para obtener una resistencia elevada. En el ejemplo 6-6 se analizó que existe suficiente carbono para formar 50.7% de perlita, de ahí que la martensita se formará en el templado. Primero, la fundición debe calentarse hasta el rango de temperatura austenítico. De la figura 6-11, todos los rastros de ferrita y perlita desaparecen a 780°C (en realidad, la temperatura de transición es 793°C en el calentamiento). En la práctica, se calienta a una temperatura un poco más elevada, digamos, otros 50°C. Las temperaturas excesivas causan el engrosamiento de la austenita con algún deterioro en las propiedades finales. Por ello, se austeniza a 830-855°C y se templa. Como la nariz de la curva del diagrama de transformación para este acero es similar a la de la figura 6-20, será necesario el templado con agua. Esto podría causar distorsión y provocar esfuerzos internos que conduzcan al agrietamiento. Adicionalmente, la profundidad a la cual se forma la martensita también está limitada pues, dentro de la pieza, las velocidades de enfriamiento no serán lo suficientemente elevadas para evitar la transformación perlítica. (Si se requiere un endurecimiento de la masa, se debe elegir un acero de aleación.) La dureza, tal como sale del temple será elevada cerca de HV 700. El revenido reduce la dureza, pero imparte ductilidad (tenacidad).

Temperatura de templado, °C	TS, MPa	YS, MPa	el., %	RA, %	HB, kg/mm²
205	780	590	19	48	260
425	760	550	21	54	240
540	720	490	26	57	210
650	635	435	29	65	190

Aceros de aleación Las *velocidades críticas de enfriamiento* se reducen (la nariz de la curva en la figura 6-20 se cambia a la derecha) por medio de la adición de elementos de aleación (usualmente varios elementos) a un acero al carbono. Estos aceros aún forman una estructura martensítica característica al templarse, pero permiten el tratamiento térmico de las secciones más gruesas; las velocidades de templado requeridas son menores y el templado se puede llevar a cabo en aceite o incluso al aire. Algunos elementos desempeñan funciones múltiples. Por ejemplo, el manganeso es un elemento de endurecimiento por solución sólida, el cual también es efectivo en este aspecto, incrementado así la *endurecibilidad* del acero (es decir, la profundidad a la que se obtie-

ne el endurecimiento al templar). Además, se combina con el azufre en forma de inclusiones, evitando la formación de sulfuro de hierro, el cual causaría fragilidad en caliente.

Las *fases* que aparecen al solidificar también pueden modificarse. Algunos elementos de aleación incrementan la estabilidad de la austenita (como el níquel, que es un elemento de aleación de solución sólida), otros la de la ferrita (por ejemplo, el cromo). Las concentraciones de los elementos de aleación se pueden elevar hasta el nivel en que la austenita se retiene a temperatura ambiente en la forma estable (*aceros inoxidables austeníticos*). Sin embargo, en otros aceros se introducen elementos de aleación como el cromo, el vanadio y el molibdeno, que se combinan con el carbono para formar carburos muy estables, de manera que los aceros retienen su dureza a temperaturas en las que la martensita sería sobretemplada. Además de su uso en el servicio a temperatura elevada, estos aceros tienen aplicaciones en los procesos de manufactura como moldes, matrices y herramientas de corte.

6-4-4 Tratamiento superficial del acero

En muchas aplicaciones —como engranes, flechas, rodillos de trenes de laminación y componentes sometidos al desgaste— es deseable tener una dureza elevada en la superficie, combinada con una gran tenacidad en todo el cuerpo de la pieza. Una opción es aplicar un recubrimiento superficial (Cap. 19); la otra es cambiar las propiedades en una capa superficial de la pieza de acero misma. Tres aproximaciones fundamentalmente diferentes están disponibles.

1. El acero tiene carbono suficiente y una concentración del elemento de aleación para formar martensita mediante el templado. Entonces, el *endurecimiento superficial* es posible por medio de un tratamiento de dos pasos: primero, la parte se trata térmicamente para obtener la tenacidad requerida en el núcleo. Segundo, una capa superficial de la parte se calienta con rapidez (por ejemplo, por inducción, flama o haz de láser) y se templa de inmediato. En forma alterna, el mismo resultado se obtiene en un solo paso: se elige una composición que se transformará, mediante el templado controlado desde la temperatura de austenización, en martensita sobre la superficie, pero en perlita en el núcleo (*endurecimiento de cáscara*).

2. El acero tiene un contenido bajo (usualmente 0.2%) de carbono y la superficie se hace dura difundiendo carbono en la superficie —por medio de una atmósfera de gas, un líquido o sólido— en el rango de temperatura austenítica. Mediante el templado, la capa superficial enriquecida por carbono se transforma en martensita, mientras que el núcleo permanece tenaz. Por ello el término *endurecimiento superficial* o *carburizado*.

3. El acero se endurece difundiendo nitrógeno en la superficie (*nitrurado*). El tratamiento que se lleva a cabo por debajo de la temperatura de transformación Al; por lo tanto, no se requiere el templado, la distorsión es menor, pero el tiempo del tratamiento es más largo. El peligro de distorsión se evita completamente por medio de la *nitruración iónica*, es decir, de la inyección de átomos de N en la superficie (véase la Secc. 19-6-4).

6-5 RESUMEN

Para la vasta mayoría de los materiales metálicos, la solidificación es el primer paso en la manufactura; la solidificación es también un proceso básico en muchas técnicas de unión. Principios básicos se aplican a todos estos procesos, y algunos de ellos tienen aplicaciones en otros tratamientos térmicos.

1. Los metales puros experimentan un cambio de fase en el punto de fusión T_m. La mayor parte de los metales prácticos solidifican en cristales fcc, bcc o hcp. Muchas aleaciones son soluciones sólidas en las cuales los átomos del elemento soluto se acomodan por sustitución o ajustándose en los intersticios de los cristales.
2. Una vez que se exceden los límites de solubilidad, la solidificación puede ocurrir formando eutécticos, peritécticos o intermetálicos. Los diagramas de fase son mapas para comprender la solidificación en equilibrio, para la cual es necesaria la difusión perfecta. La difusión es rápida a temperaturas elevadas, pero aún requiere tiempo, por lo tanto, la falta de difusión conduce a una solidificación no equilibrada a velocidades de enfriamiento prácticas.
3. Los cristales se pueden formar por medio de la nucleación homogénea, pero en muchos casos las partículas sólidas existentes inician la nucleación heterogénea. Mientras que el crecimiento de grano es más rápido a temperaturas elevadas, la nucleación es más rápida a mayor enfriamiento; de aquí que se pueda controlar el tamaño del grano controlando las velocidades de enfriamiento.
4. Los efectos del tamaño de grano dependen del mecanismo de deformación. En el rango de temperaturas frías, el grano más pequeño proporciona una resistencia mayor; en el rango de temperaturas elevadas es deseable el grano grueso.
5. Los metales polimorfos experimentan reacciones de estado sólido, de las cuales el ejemplo fundamental es la descomposición eutectoide en el sistema Fe-Fe_3C.
6. Las propiedades mecánicas de las aleaciones se ven afectadas en gran medida por la estructura metalográfica. Éstas dependen de las propiedades, tamaño, forma y distribución de las fases individuales y están influidas esencialmente por la resistencia de la interfase. Una interfase débil actúa como una grieta preformada en el cuerpo. Las interfases entre la matriz metálica y las inclusiones a menudo caen en esta categoría; esto explica la necesidad del control de las inclusiones.
7. Las propiedades de una pieza ya solidificada se pueden cambiar por medio de tratamientos térmicos, tales como el recocido, el endurecimiento por precipitación y los tratamientos especiales posibles por la transformación eutectoide en el acero.

PROBLEMAS 6A

6A-1 Dibuje bocetos de las celdas (*a*) fcc y (*b*) bcc; dé un ejemplo de un metal de estructura (*c*) fcc y (*d*) bcc.

6A-2 (*a*) Defina la transformación alotrópica. (*b*) Dé un ejemplo importante en la práctica.

6A-3 (*a*) Dibuje un diagrama de equilibrio que muestre la solubilidad completa de los metales *A* y *B*. Nombre las líneas que definen la temperatura del (*b*) inicio y (*c*) del final de la solidificación.

6A-4 Dibuje un diagrama de fase eutéctico típico con la composición eutectoide en 60% *B* y una solubilidad limitada del 10% en ambos extremos. (*b*) Identifique los campos de las fases. (*c*) Indique los rangos de las aleaciones hipoeutéctica e hipereutéctica.

6A-5 Dibuje un diagrama de fase hipotético incorporando tanto (*a*) un compuesto intermetálico como (*b*) una fase intermedia.

6A-6 Dibuje un diagrama que muestre la resistencia como una función del tamaño del grano. Dibuje líneas que indiquen las tendencias esperadas para (*a*) deformación en frío, (*b*) deformación en caliente lenta y (*c*) rápida.

6A-7 (*a*) Dibuje el extremo rico en *A* de un diagrama de una fase eutéctica con la solubilidad sólida limitada de *B*. (*b*) Elija una composición que resulte en una solución sólida. (*c*) Dibuje una línea que muestre el cambio en solidus debido a la solidificación no equilibrada. (*d*) Haga un boceto de la microestructura esperada.

6A-8 (*a*) Dibuje una parte de un diagrama de fase adecuado para explicar el endurecimiento por precipitación. Determine (*b*) los pasos de proceso necesarios para el desarrollo de la resistencia máxima, (*c*) la estructura en cada paso, y (*d*) qué tipo de precipitado proporcionará la resistencia máxima.

6A-9 Defina isotropía.

6A-10 (*a*) Dibuje la porción del diagrama de fase del Fe-Fe_3C que incluye todos los aceros (ignore la transformación peritéctica de temperatura elevada). (*b*) Dé la composición aproximada y la temperatura para la transformación eutectoide. (*c*) Identifique los campos de las fases y la estructura cristalina asociada, dando también el nombre acostumbrado de cada fase.

PROBLEMAS 6B

6B-1 La aleación del ejemplo 6-9 se va a usar como material para la charola de un horno de alta temperatura. (*a*) ¿Recomendaría un tamaño del grano grande o pequeño? (*b*) ¿Por qué?

6B-2 La lámina anodizada de aleación Al-Mg a menudo se usa como acabado decorativo. Las diferencias en la concentración debidas a la microsegregación afectan la apariencia. (*a*) ¿Qué solución sugeriría? (*b*) ¿Qué precauciones se deberán tener en el inciso (*a*)?

6B-3 Bajo condiciones de otra manera idénticas, ¿podría una fusión calentada a 1.2 T_L proporcionar una fundición de grano más fino que una calentada a 1.1 T_L? Dé dos razones de su respuesta.

6B-4 Una parte de una aleación de Al-4Cu falla en el servicio por fractura por tensión. La fractura es dúctil y las investigaciones muestran una estructura con partículas gruesas de segunda fase. (*a*) Indique la causa probable de falla. (*b*) Sugiera al fabricante una solución para prevenir fallas futuras. (*c*) Indique los pasos de proceso que se deben seguir.

6B-5 Un acero AISI 1045 se va a formar en frío. (*a*) ¿Cuál es el contenido de C? (*b*) ¿Qué estructura se espera a temperatura ambiente? (*c*) ¿Qué forma de la estructura dará la ductilidad mayor?

6B-6 Un componente de acero se examina y tiene colonias laminares finas en una matriz sin características. (*a*) Sugiera de qué pueden ser las colonias y la matriz. (*b*) ¿Cuál es la secuencia de producción probable que condujo a esta estructura?

6B-7 Una palanquilla de acero, calentada a 900°C, se lamina y los rodillos de acero endurecido

desarrollan de inmediato un agrietamiento superficial severo donde se hizo contacto con la palanquilla. (*a*) ¿Cuál es la causa probable? y (*b*) ¿qué solución sugeriría?

6B-8 Las flechas de acero que se usa con rodamientos lineales debe tener un núcleo tenaz y una superficie muy dura. Nombre tres métodos por medio de los cuales se puedan producir esas barras.

6B-9 Una aleación fundida de Al tiene una resistencia insuficiente. Sugiera dos formas de incrementarla sin cambiar su composición.

PROBLEMAS 6C

6C-1 Aplique un balance de materiales al ejemplo 6-2 para demostrar que 28.1% de Cu está en la aleación.

6C-2 ¿Esperaría segregación intragranular significativa en las aleaciones de (*a*) Cu-10Ni; (*b*) Cu-30Zn; (*c*) Al-5Mg? Argumente su opinión con planteamientos cuantitativos.

6C-3 Indique las temperaturas y secuencia del tratamiento de endurecimiento por precipitación en una aleación de Al-4Cu.

6C-4 (*a*) Grafique los datos de las propiedades dados en el ejemplo 6-15 como una función de la temperatura de revenido. Conecte los puntos con una curva continua; note la declinación más rápida de las propiedades de la resistencia en la temperatura más elevada. (*b*) Verifique si la dureza es en efecto tres veces mayor que la TS.

6C-5 Tomando σ_0 y k_y en la ecuación (6-8) arbitrariamente iguales a la unidad, calcule σ para d variando de 10^{-2} a 10^{2}.

6C-6 Las fundiciones de una aleación de Al-4Cu se tratan por solución en un horno continuo del tipo de banda a 545°C por 15 min. El horno tiene tres zonas de calentamiento, cada una capaz de mantener la temperatura con una variación de ±10°C. Recientemente, muchas fundiciones han sufrido una distorsión severa, desplomándose en el horno. Sugiera una razón o razones del problema.

6C-7 (*a*) Unas barras de acero AISI 1010 y 1045 se calientan a 900°C. ¿Qué fase de qué estructura cristalina está presente? (*b*) Ahora las barras se templan en agua. Uno de los aceros se endurece, el otro permanece suave. ¿Cuál de ellos permanece suave y por qué? (En su respuesta refiérase a la estructura metalográfica de cada acero.)

6C-8 Con base en el diagrama que se dibujó en el problema 6A-6, indique qué tamaño de grano es deseable para (*a*) una aleación de aluminio que opera cerca de la temperatura ambiente y (*b*) una superaleación para el álabe de una turbina operando a temperaturas cercanas al punto de fusión.

6C-9 Los manuales indican que la aleación 5056 Al (5% Mg) no es tratable térmicamente. Inspeccione el diagrama de equilibrio. Con esta base, la afirmación quiere decir que (*a*) no se puede aplicar un tratamiento térmico o (*b*) no es posible el endurecimiento por precipitación. (*c*) Explique sus respuestas con referencia a los eventos en los incisos (*a*) y (*b*).

6C-10 Grafique la YS y TS del ejemplo 6-13 como una función del tamaño del grano y determine si siguen la relación de Hall-Petch [ecuación (6-7)]. (*Sugerencia*: si se grafica contra $1/\sqrt{d}$, la pendiente es igual a k_y).

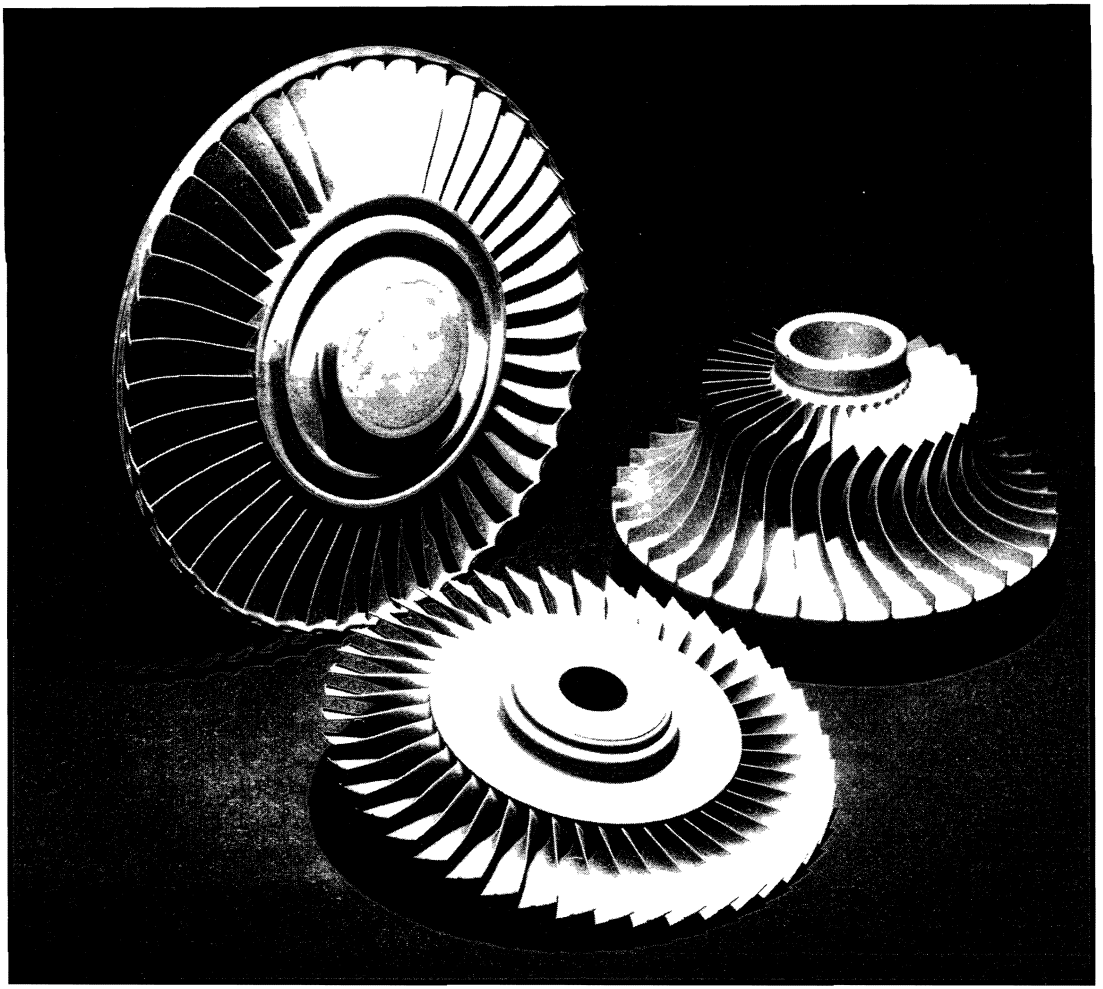
6C-11 Continuando con el problema 6A-4, elija una composición con 20% *B*. Calcule la proporción de la solución sólida α en la aleación.

LECTURAS ADICIONALES

ASM Handbook, vol. 3: *Alloy Phase Diagrams*, 1992; vol. 4, *Heat Treating*, 1991; vol. 9, *Metallography and Microstructures*, 1985; ASM International.

Alexiades, V.: *Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes*, Hemisphere, Washington, 1993.

Chalmers, B.: *Principles of Solidification*, Wiley, 1964.
Flemings, M.C.: *Solidification Processing*, McGraw-Hill, 1974.
Karlsson, L. (ed.): *Modeling in Welding, Hot Powder Forming and Casting*, ASM International, 1997.
Kurz, W. y D.J. Fisher: *Fundamentals of Solidification*, Trans Tech Publications, Suiza, 1994.
Poirier, D.R.: *Heat Transfer Fundamentals for Metal Casting*, The Minerals, Metals, and Materials Society, 1992.
Poirier, D.R. y G.H. Geiger: *Transport Phenomena in Materials Processing*, The Minerals, Metals, and Materials Society, 1994.
Szekely, J.: *Fluid Flow Phenomena in Metals Processing*, Academic Press, 1979.
Totten, G.E. y M.A.H. Howes: *Steel Heat Treatment Handbook*, Dekker, 1997.



Los componentes integrales de precisión para turbinas se hacen por la fundición al vacío de superaleaciones. (*Cortesía de Howmet Corporation, Greenwich, Connecticut.*)

capítulo

7

Fundición de metales

Ahora se analiza una aplicación de los procesos de solidificación, llamado fundición de metales. Se estudiará:

La solidificación de aleaciones en moldes

Los factores que afectan la fluidez y la calidad de las fusiones

Las principales clases de aleaciones para fundición

La fundición de formas simples para su procesamiento posterior por deformación plástica

Los procesos para fundir formas en moldes desechables y reutilizables

Los métodos para mejorar las propiedades de las fundiciones

La elección del proceso de fundición y el diseño de piezas para facilidad de fundición

Los principios de la solidificación tienen su uso más amplio en los procesos de fundición. Para crear una fundición, el metal fundido se vacía en moldes fríos, que extraen calor. El vaciado involucra el flujo de un fluido; su interacción con la solidificación determina cuán adecuada es una aleación para su fundición. Por lo tanto, esta interacción se analiza antes de examinar las aleaciones de fundición y de explorar los procesos de fundición.

7-1 ESTRUCTURA Y PROPIEDADES DE LAS FUNDICIONES

A partir de lo discutido en el capítulo 6, queda claro que las propiedades de una aleación solidificada no sólo dependen de la composición, sino también del tamaño de grano y de la forma y distribución de las fases. Estos factores se pueden controlar y modificar en el curso de la solidificación.

7-1-1 Solidificación de fusiones

Cuando se vacía una fusión en un molde frío, el metal en contacto con éste se solidifica en forma de granos finos prácticamente equiaxiales (de dimensiones casi iguales en todas las direcciones), ya que las velocidades de enfriamiento son elevadas (*zona de enfriamiento*) y la pared del molde induce la nucleación heterogénea. El calor latente de fusión, liberado durante la solidificación, disminuye la velocidad de solidificación, y el curso de la solidificación posterior depende del tipo de aleación que se vacía.

Metales puros La solidificación se lleva a cabo por medio del crecimiento de algunos núcleos favorablemente orientados, en dirección de la extracción del calor. Esto conduce a la frecuentemente observada *estructura columnar* (Fig. 7-1*a*) en toda la masa de la fundición. Debido al crecimiento preferido de estos granos largos, la fundición tendrá propiedades muy anisotrópicas. (En una fundición mayor, la zona central se enfría muy lentamente y la extracción de calor es casi omnidireccional; si la solidificación ocurre por medio de la nucleación heterogénea, esto da como resultado una estructura equiaxial de granos mucho más gruesos que en la superficie.)

Como la mayoría de los metales se contrae al solidificarse (Fig. 6-1*c*), el menisco del líquido baja gradualmente y, si no hay abastecimiento de líquido adicional, queda una *cavidad de contracción*. Una cavidad con la geometría que se muestra en la figura 7-1*a* se llama *rechupe*, y siempre se forma cuando un metal puro se solidifica.

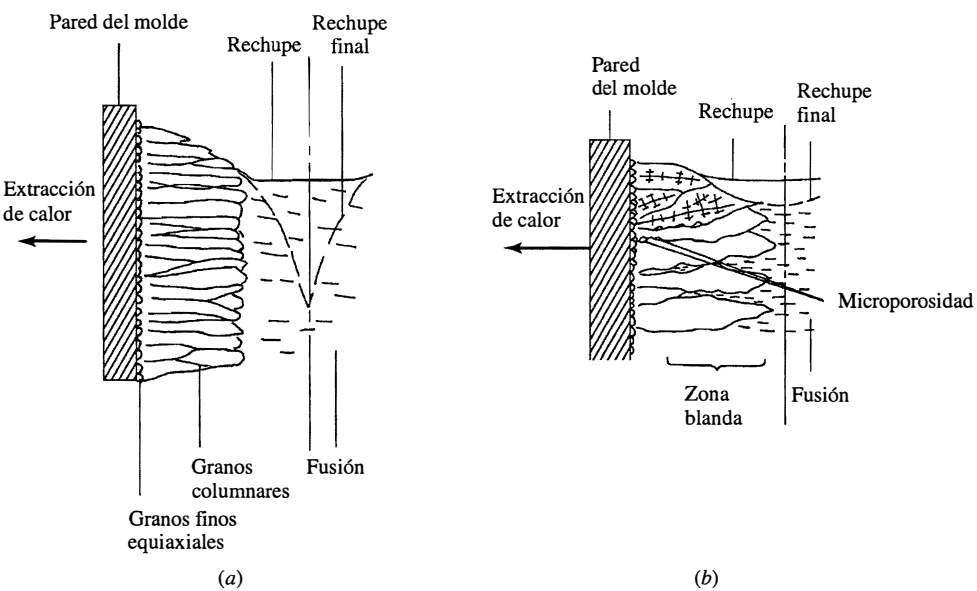


Figura 7-1 La solidificación procede (*a*) con el crecimiento de granos columnares en los metales puros, pero (*b*) con el crecimiento de dendritas en las soluciones sólidas.

Eutécticos Los eutécticos, igual que los metales puros, solidifican a una temperatura constante (invariante) (Fig. 6-5), y el frente de solidificación es más o menos plano (Fig. 7-1*a*). Dentro de cada grano hay varios grupos, *celdas* o *colonias autécticas*. Las propiedades de las fundiciones pueden estar influidas de varias formas.

1. El enfriamiento rápido reduce el tamaño de la celda y, en los eutécticos laminares, también el espaciamiento interlaminar; de esta forma, se incrementa la resistencia de la fundición.

2. Los agentes de nucleación promueven la formación de granos eutécticos equiaxiales finos con propiedades mecánicas superiores.

3. La estructura laminar es sólo una de las formas posibles de los eutécticos. En algunos casos, la morfología "natural" del eutéctico se puede cambiar por medio de la *modificación*, con cambios marcados en las propiedades. Por ejemplo, las laminillas de un eutéctico laminar se pueden transformar en esferas (estructura esferoidal) o en partículas espiculares. Tales estructuras tienen propiedades marcadamente diferentes; por lo general, un esferoide eutéctico tiene mayor ductilidad que uno laminar (véase Fig. 6-15).

Soluciones sólidas Solidifican en el rango de congelamiento $T_L - T_S$ (Fig. 6-4), y esto tiene efectos significativos en la estructura. Los cristales también crecen en dirección de la extracción del calor, pero en forma de dendritas (Fig. 7-1*b*). Cuando la fusión finalmente solidifica, cada grano contiene una o más dendritas completas (*estructura dendrítica celular*). En principio, los brazos de las dendritas son muy débiles y se pueden romper fácilmente por agitación térmica y/o mecánica para dar, a supercalor bajo, muchos núcleos, y un tamaño fino del grano.

La red intricada de los brazos de las dendritas dificulta el movimiento libre de líquido remanente, y los espacios formados entre los brazos se pueden privar del fluido necesario para compensar la contracción por solidificación. En consecuencia, la *microporosidad*, caracterizada por la presencia de agujeros con bordes rasgados (Fig. 7-2), es típica en las soluciones sólidas. Esos agujeros representan inclusiones de resistencia cero y, debido al efecto de muesca, son dañinos para la resistencia y la ductilidad. En las aleaciones (Fig. 7-3), la contracción total es similar a la de los metales constituyentes y una gran proporción de la contracción total se encuentra en forma *distribuida* (Fig. 7-3*b*), pero el rechupe es mucho menor.

Otros sistemas Las propiedades y la porosidad en un sistema de aleación binario se pueden predecir con exactitud por medio del diagrama de fase. Por ejemplo, en el sistema eutéctico de la figura 7-3, la microporosidad se incrementa de A a B hasta que se alcanza el límite de solubilidad de la solución sólida α, luego declina hacia la composición eutéctica, para elevarse de nuevo hasta la solución sólida β. La resistencia (caracterizada aquí por el esfuerzo de cedencia) se eleva por medio de la aleación de solución sólida y cambia muy poco con la aparición de la eutéctica. La ductilidad puede elevarse o disminuir con la aleación de solución sólida; el efecto de la eutéctica depende enormemente de su morfología (Fig. 7-3*c*).

En ocasiones un elemento de aleación no se puede disolver incluso en el metal líquido, en vez de eso, existe como una fase líquida separada (*solubilidad líquida limitada* o *inmiscibilidad total*). Un ejemplo típico es el plomo, el cual es prácticamente insoluble en muchos metales. Su efecto en las propiedades depende de su distribución.

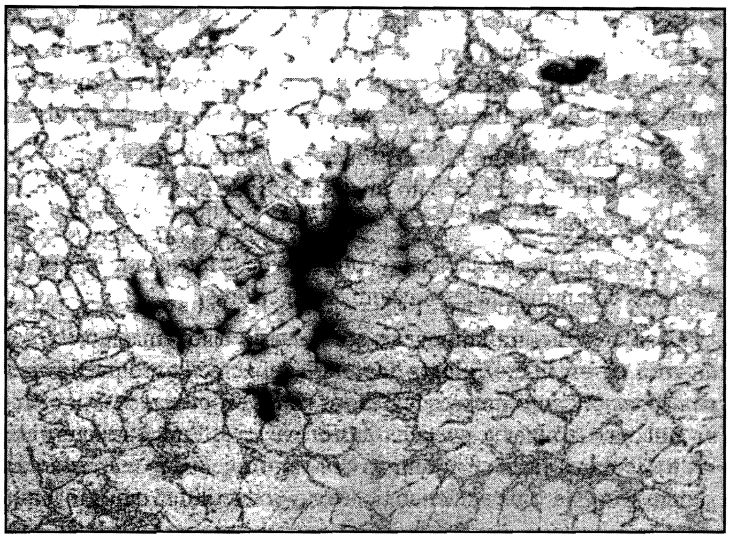


Figura 7-2 Microporosidad en una aleación de aluminio 356.0 debida a una combinación de contracción interdendrítica y la separación de gas hidrógeno. (*Cortesía del Dr. J.E. Gruzleski, McGill University, Montreal, Quebec.*)

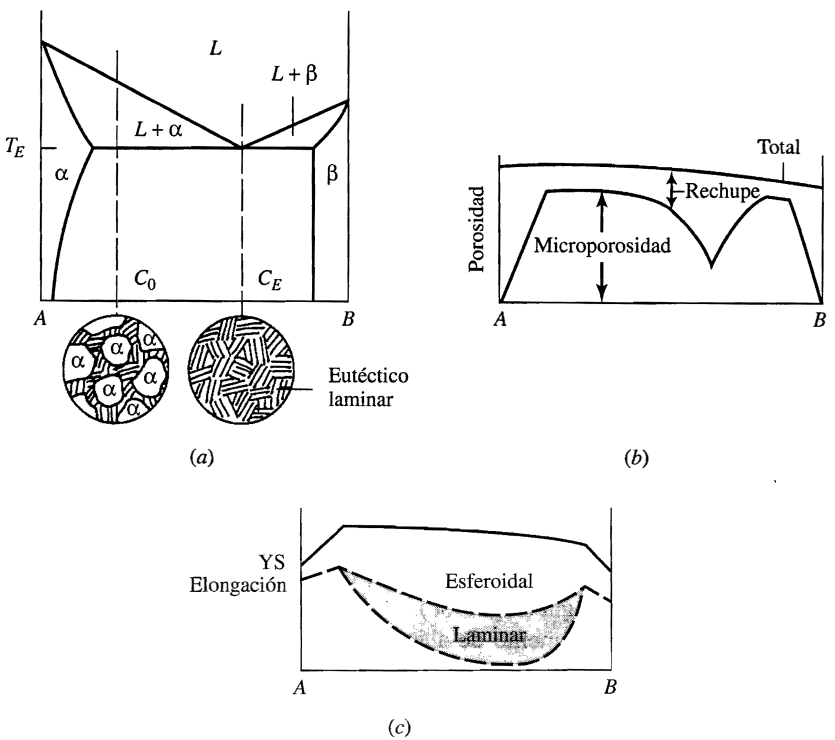


Figura 7-3 En un sistema eutéctico (*a*), la microporosidad domina cuando la estructura consiste principalmente en una solución sólida (*b*), y las propiedades mecánicas reflejan los efectos de la estructura (*c*).

Puesto que es suave, puede actuar como un lubricante útil si se encuentra atrapado en los espacios interdendríticos dentro de los granos o en forma globular en las fronteras de grano; también mejora la maquinabilidad (Secc. 16-2). Sin embargo, debido a su punto de fusión bajo, causa fragilidad en caliente cuando se segrega en las fronteras de los granos.

7-1-2 Macrosegregación

Ya se analizó (Secc. 6-1-6) que la falta de difusión completa conduce a la microsegregación, es decir, a las variaciones de composición dentro de un grano. El proceso de la solidificación también puede resultar en diferencias de composición que se extienden a grandes distancias dentro de una fundición. Básicamente, hay tres tipos de *macrosegregación*:

1. La llamada *segregación normal* ocurre cuando un frente de solidificación más o menos plano (como en la Fig. 7-1*a*) impulsa al constituyente de menor punto de fusión hacia el centro. Un sector tomado de la sección transversal solidificada mostrará una concentración menor del elemento de aleación en la superficie que en el centro (Fig. 7-4*a*). Si se liberan gases durante la solidificación, éstos sacan al fluido más rico de la zona y contribuyen a la segregación de los elementos de aleación hacia el centro.

2. La *segregación inversa* es común en las aleaciones de solución sólida con un patrón de solidificación dendrítico (Fig. 7-1*b*). Como los brazos de las dendritas se forman primero y tienen una concentración menor de los elementos de aleación, los espacios interdendríticos originados por la contracción por solidificación deben ser rellenados con un líquido de concentración mayor de soluto. Este líquido fluye en dirección opuesta a la del crecimiento de las dendritas; de ahí que la superficie tenga una concentración del elemento de aleación más elevada que el promedio (Fig. 7-4*b*).

3. La *segregación por gravedad* ocurre cuando los compuestos insolubles, las inclusiones o los metales inmiscibles en el líquido tienen una densidad muy diferente a la de la fusión; por lo tanto, se elevan o se hunden (Fig. 7-4*c*). Uno de los atractivos de la manufactura en el espacio es que, en la ausencia de gravedad, las aleaciones inusuales —que consisten de metales con densidades muy distintas— se pueden solidificar sin segregación.

Estas formas de macrosegregación, si no son deseables, se deben evitar durante la solidificación, ya que las distancias de difusión son demasiado grandes para ecualizar la composición por medio del tratamiento térmico de homogeneización.

7-2 PROPIEDADES DE LAS FUNDICIONES

Las características de la solidificación se combinan con las propiedades del fluido con el fin de determinar la compatibilidad de varias aleaciones para su fundición.

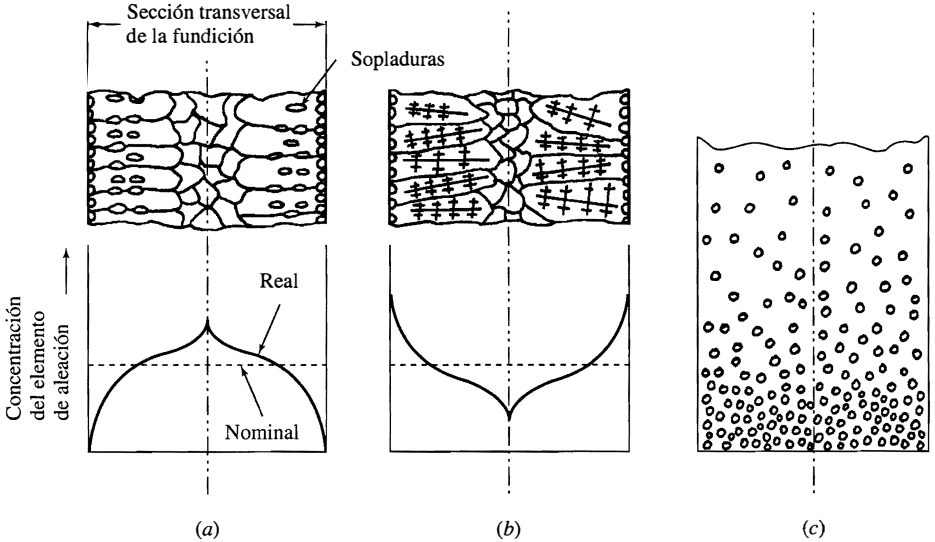


Figura 7-4 La solidificación de metales casi puros conduce a (*a*) macrosegregación "normal", especialmente en la presencia de separación del gas. (*b*) La solidificación dendrítica lleva a la segregación "inversa". (c) Constituyentes de densidad elevada que no se disuelven en la fusión, separados por la segregación por gravedad.

7-2-1 Viscosidad

El vaciado de la fusión en un molde es en esencia un problema de flujo de fluidos y, como tal, resulta enormemente afectado por la resistencia ejercida por el fluido contra el flujo. Esta resistencia se puede medir como un esfuerzo cortante τ. Si una película del fluido de espesor h se corta entre dos placas planas paralelas, una de las cuales se mueve a una velocidad v, el esfuerzo cortante τ es la fuerza por unidad de área que actúa sobre estas placas (Fig. 7-5*a*).

$$\tau = \eta \frac{dv}{dh} = \eta\dot{\gamma} \tag{7-1}$$

donde $\dot{\gamma}$ es la velocidad de deformación unitaria por cortante, y η la viscosidad dinámica (en unidades de $N \cdot s/m^2$).

Las leyes que gobiernan el flujo de sustancias son el tema de la *reología* (del griego *rheos* = corriente, flujo). Muchos fluidos (por ejemplo, los aceites minerales que se usan en las máquinas) presentan *viscosidad newtoniana*, independiente de $\dot{\gamma}$ (Fig. 7-5*b*, línea *A*). Los fluidos que presentan sólidos suspendidos se cortan fácilmente a velocidades bajas de deformación, pero las partículas sólidas obstruyen el flujo a velocidades de deformación elevadas (*fluidos dilatantes*, línea *B*). Las sustancias en que las partículas o moléculas se pueden orientar a sí mismas en dirección del flujo se cortan fácilmente a velocidades elevadas de deformación por cortante (*flujo seudoplástico*, línea *C*). Cuando, a una velocidad de deformación dada, la viscosidad declina con el tiempo de expo-

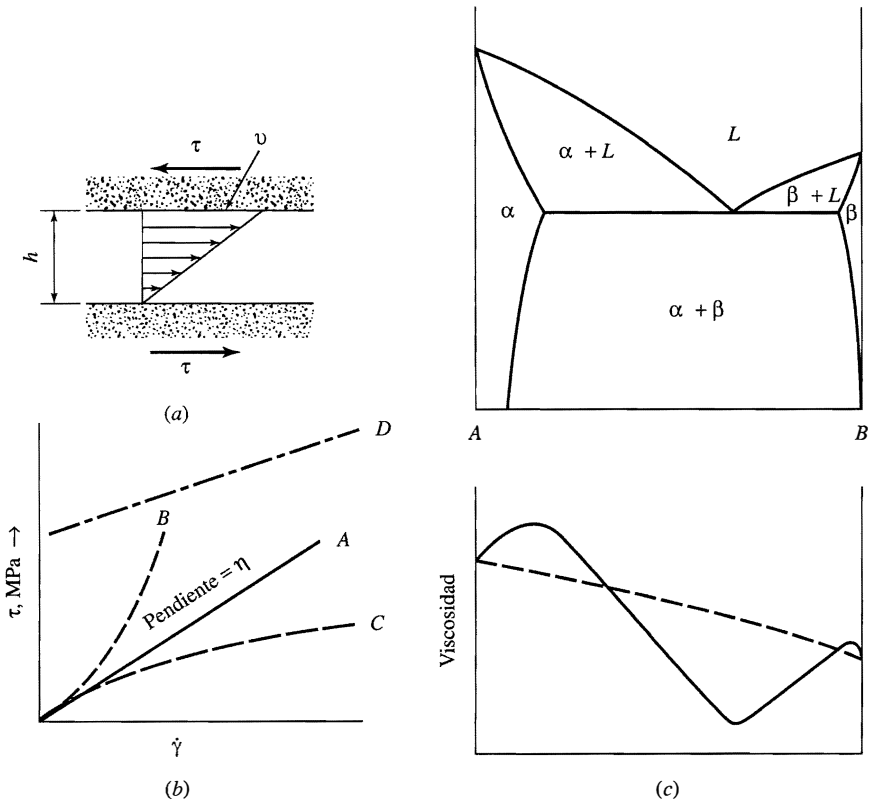


Figura 7-5 El corte de un fluido requiere (*a*) de un esfuerzo cortante que se incrementa con el aumento de la viscosidad del fluido. (*b*) Los fluidos pueden presentar un comportamiento newtoniano (*A*), dilatante (*B*), pseudoplástico (*C*), o de Bingham (*D*). (*c*) En un sistema eutéctico la viscosidad puede variar enormemente.

sición, se dice que el fluido es *tixotrópico*. Un grupo importante de materiales comienza a deformarse sólo después de la aplicación de un esfuerzo cortante mínimo inicial, y luego continúa cortándose de forma viscosa (*sólidos Bingham*, línea *D*).

Por arriba de T_m (o T_L), la mayoría de los metales se comportan como fluidos newtonianos cuya viscosidad es una función del volumen libre y, por lo tanto, disminuye con el supercalor. Aunque la información es incompleta, se puede decir que en general, la viscosidad es una función de la composición y del supercalor expresado en la escala de temperatura homóloga [ecuación (6-5*b*)]. Sin embargo, la naturaleza de las fases presentes también es importante. Por ejemplo, en los sistemas eutécticos se puede encontrar (Fig. 7-5*c*) que la viscosidad cambia linealmente con la composición de la aleación (línea discontinua), pero también podría mostrar marcadas variaciones con las fronteras de la fase (línea continua: viscosidad máxima en el límite de solubilidad sólida, mínima en la composición eutéctica).

Entre T_L y T_S, la presencia de la fase sólida induce efectos no newtonianos. Una *viscosidad aparente*, la cual es una función de la cantidad y la estructura de la fase

sólida, se puede definir por una constante $\dot{\gamma}$. Los cristales equiaxiales afectan escasamente la viscosidad hasta cerca de una concentración del 60% en volumen. Las dendritas incrementan enormemente la viscosidad aparente, excepto cuando las velocidades de corte son suficientemente grandes para romper las dendritas; entonces, la viscosidad es baja, similar a la que se encuentra en los cristales equiaxiales.

7-2-2 Efectos superficiales

Cuando la fusión debe fluir a través de canales pequeños (por lo general menores que 5 mm), la tensión superficial [ecuación (6-6)] se vuelve significante. Una tensión superficial elevada hace imposible llenar esquinas agudas.

Al exponerse a la atmósfera, la superficie de muchas fusiones se recubre rápidamente con una película de óxido, cuya naturaleza influye en gran medida en el comportamiento de la fundición. De esta forma, el óxido de aluminio (Al_2O_3), extremadamente denso y tenaz, hace fluir a la fundición como si estuviera dentro de una bolsa muy tiesa, y los elementos de aleación que modifican el óxido afectan enormemente el comportamiento de la fundición de las aleaciones de aluminio. Como un elemento de aleación en otros metales, el aluminio se oxida preferencialmente; se forma una capa de óxido de aluminio, la cual tiene el efecto de incrementar la tensión superficial.

7-2-3 Fluidez

Cuando se llena un molde, se extrae calor y la solidificación comienza mientras tiene lugar el flujo. Por lo tanto, el *llenado del molde* depende de muchos factores, cuyos efectos exactos pueden ser desconocidos. Para caracterizar los materiales bajo condiciones complejas, es usual desarrollar *ensayos tecnológicos* que permitan una comparación cuantitativa de los materiales, *pero sólo si las condiciones del ensayo se especifican cuidadosamente*.

La capacidad de un metal para llenar un molde se describe como *fluidez*. Se trata de una propiedad del sistema que es una función no sólo del metal sino también del molde. Típicamente, se hace una cavidad en forma de una gran espiral o parecida a una placa en el material del molde estudiado (Fig. 7-6), y la fluidez se expresa como un *índice de fluidez* (la longitud de la espiral o de la placa). En forma alterna, se da la longitud de llenado al vacío (Fig. 7-6*c*). La fluidez se ve afectada por una variedad de factores:

1. La fluidez se incrementa con el aumento del sobrecalentamiento, porque éste baja la viscosidad y retrasa la solidificación. Sin embargo, el sobrecalentamiento excesivo puede conducir a un tamaño de grano indeseablemente grande, y también ser impráctico ya que el horno de fusión puede no ser capaz de soportar esas temperaturas elevadas.

2. La fluidez se eleva con el incremento de la temperatura del molde, ya que la solidificación se retrasa. Sin embargo, este beneficio se obtiene a costa de una velocidad de enfriamiento menor, lo cual lleva a un grano más grueso y puede limitar la productividad (Fig. 7-7).

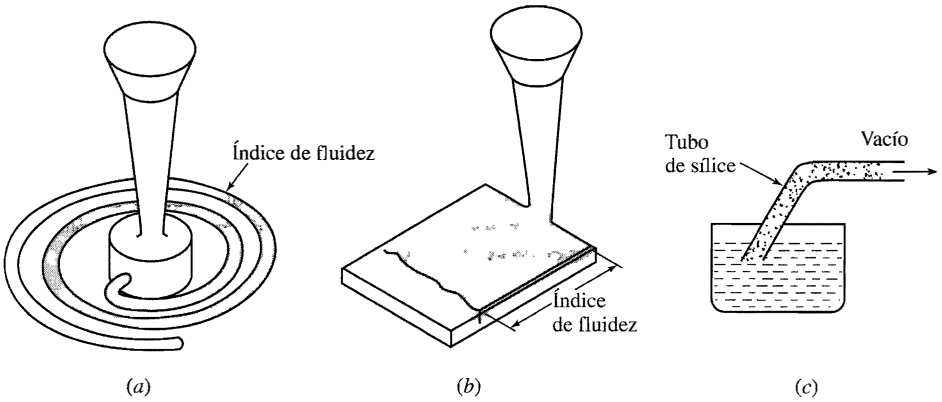


Figura 7-6 La fluidez es una propiedad tecnológica que se determina vaciando en un (*a*) molde espiral, en un (*b*) molde en forma de placa o (*c*) extrayendo vacío.

3. El tipo de solidificación tiene un gran efecto. Un mecanismo de solidificación que permita un congelamiento ordenado, como el que se encuentra en los metales puros y en los eutécticos, es de gran ayuda (Fig. 7-8*a*). Sin embargo, los metales puros, con sus puntos de fusión elevados, tienden a presentar una fluidez menor que los eutécticos. Los brazos de las dendritas, que crecen en la trayectoria del abastecimiento de líquido, aminoran el flujo y pueden cortar por completo el suministro (Fig. 7-8*b*); por lo tanto, la fluidez de las aleaciones con un rango de congelamiento elevado es generalmente baja. No obstante, si el fluido es forzado a fluir (por medio de una gran presión de gravedad o de presión aplicada externamente), las dendritas se arrancan y se rompen, y

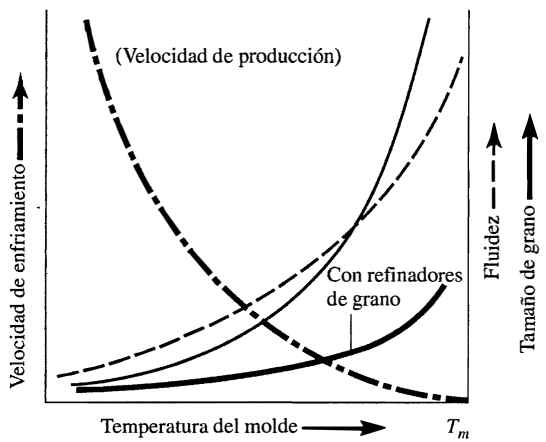


Figura 7-7 La temperatura del molde es un factor poderoso en la determinación de las velocidades de producción, de la complejidad de forma obtenible y de las propiedades mecánicas.



(*a*) (*b*) (*c*)

Figura 7-8 Cuando una fusión solidifica en un canal, la comunicación con el metal caliente se (*a*) mantiene abierta más tiempo con la solidificación frontal de los metales puros y de los eutécticos que con (*b*) la solidificación dendrítica de las soluciones sólidas. (*c*) Los escombros de los cristales obstruyen el flujo.

la fluidez se incrementa en gran medida. El flujo se detiene cuando los cristales rotos se congelan para formar un "tapón" en el menisco (Fig. 7-8*c*).

4. La tensión superficial y la presencia de películas de óxido tienen un efecto.

5. El material del molde y su apresto afectan la fluidez al influir en la extracción del calor y en la humectación de la superficie del molde.

En un sentido vago, también se habla de la *fundibilidad* de un metal. Este término incorpora, además del concepto tecnológico de fluidez, aspectos que definen la facilidad de producir una fundición bajo las condiciones promedio de una planta. De esta manera, una aleación se considera altamente fundible cuando no sólo tiene alta fluidez, sino que también es relativamente insensible a cambios accidentales en las condiciones del proceso; si es más tolerante al diseño del sistema de abastecimiento del fluido y menos sensible a las variaciones del espesor de la pared, por lo que, en general, producirá fundiciones de calidad aceptable con menos habilidad.

7-3 ALEACIONES PARA FUNDICIÓN

Excepto los metales y las aleaciones que se producen directamente por medio de la metalurgia de polvos o por técnicas electrolíticas, todos los metales y las aleaciones primero deben pasar por la etapa de fusión y vaciado (Fig. 5-2). Sin embargo, es común distinguir entre dos amplias clases:

1. Las *aleaciones forjadas* poseen suficiente ductilidad para permitir la deformación plástica en caliente y/o en frío (éstas se analizan en los capítulos 9 y 10). Representan el 85% de las aleaciones producidas, y se funden en formas sencillas adecuadas para el trabajo posterior (fundición de lingotes).

2. Las *aleaciones fundidas* (tales como las eutécticas) se eligen por su buena fundibilidad o son materiales con una estructura que no puede tolerar ninguna deformación (por ejemplo, las aleaciones con fases duras o no dúctiles distribuidas desfavorablemente, o con proporciones elevadas de compuestos intermetálicos y otros constituyentes duros). Éstas se funden directamente en la forma final (fundición de formas). Por supuesto, hay traslapo entre los dos grupos, y el mismo material, debido a sus atractivas propiedades de servicio, se puede producir tanto en formas forjadas como fundidas.

Las cantidades totales fundidas en formas han declinado gradualmente en las naciones industrialmente desarrolladas, pero su valor se ha elevado considerablemente

Tabla 7-1 Embarques de fundiciones (Estados Unidos)*

	Miles de Mg†	
Tipo	**1972**	**1997**
Hierro gris	14 000	6 150
Hierro maleable	860	200
Hierro dúctil	1 830	4 070
Acero	1 450	1 350
Aleaciones de aluminio	850	1 700
Aleaciones de zinc	460	360
Cobre y latón	345	313
Aleaciones de magnesio	21	40

* Datos de 1972 compilados de *Metal Statistics 1974*, American Metal Market, Fairchild Publications Inc., Nueva York, 1974. Datos de 1977 de la American Foundrymen's Society, Des Plaines, Illinois.

† 1 Mg = 1 000 kg = tonelada métrica, 2 200 lb.

debido al incremento de su complejidad y a la calidad altamente mejorada de los productos. Las fundiciones ferrosas aún representan los tonelajes más grandes (tabla 7-1), pero las no ferrosas contribuyen a la mayoría del valor. Se debe notar que la chatarra primaria y secundaria constituyen una gran parte de la cantidad total. En la tabla 7-2 se proporcionan algunas propiedades de las aleaciones más populares; las propiedades generales se analizan a continuación.

7-3-1 Materiales ferrosos

En su forma más familiar, el diagrama del hierro-carburo en realidad muestra las fases de equilibrio en el sistema hierro-carburo (Fe-Fe_3C) (líneas continuas en la Fig. 6-11). Sin embargo, el compuesto Fe_3C es metaestable, y en ciertas condiciones puede revertir a la forma más estable del carbono (*grafito*). Alternativamente, la composición de la fusión y las condiciones de la solidificación se pueden controlar para permitir que el carbono se separe en la forma de grafito durante la solidificación, a una temperatura un poco más elevada que la eutéctica (Fig. 6-11, líneas discontinuas). De esta forma, se pueden derivar varias familias de materiales del sistema hierro-carbono.

Aceros fundidos En los aceros al carbono (hasta 1.7% C), éste siempre está en la forma de Fe_3C. Su punto de fusión elevado y, por encima del 0.15% de C, su amplio rango de congelamiento hacen a los aceros menos adecuados para propósitos de fundición. No obstante, son dúctiles y tienen una resistencia y resistencia a la fatiga elevadas; las que, como se analizó en la sección 6-4-3, se pueden incrementar aún más por medio de un tratamiento térmico y por aleación. Como las inclusiones sulfurosas deterioran las propiedades (Fig. 6-16), el contenido de S se reduce a 0.006-0.010% al adhe-

Tabla 7-2 Propiedades de aleaciones fundidas selectas*

Aleación						Propiedades mecánicas †			
Nombre	**Núm. ASTM**	**Composición típica, %wt**	**Método preferido de fundición**	**Liquidus (solidus), °C**	**Holgura de contracción ‡ %**	**TS, MPa**	**YS, MPa**	**el., 50 mm %**	**Dureza, § HB**
Ferrosas:									
Acero fundido	60-30	≤ 0.25C	Molde desechable		1.5-2	420	210	24	180
	175-145		Molde desechahle		1.5-2	1 200	1 000	6	360
Hierro gris	20	3.5C-2.4Si-0.4P-0.1S	Molde desechable	1 180	1	140	(570)	<1	160
	60	2.7C-2.0Si-01P-0.1S-0.8Mn	Molde desechable	1 290	1	420	(1 300)	<1	300
Hierro maleable	A47	2.5C-1.4Si-0.05P-0.1S-0.4Mn	Molde desechable	1 140	1	350	220	10	150
Hierro dúctil	60-40-18	3.5C-2.4Si-0.1P-0.03S-0.8Mn	Molde desechable		0.8-1	420	280	18	160
Acero inoxidable	CF8	0.08C-19Cr-9Ni	Molde desechable		2.5	500	240	45	
Con base de Cu:									
Bronce de estaño	C90500	10Sn-2Zn	Todos	999 (854)	1.6	320	150	30	80
Roja con plomo	C83600	5Sn-5Pb-5Zn	Todos	1 010 (854)	0.8-1.8	240	110	32	62
Cojinete	C93700	10Sn-10Pb	Todos	926 (760)	1-2	220	110	20	60
Amarilla con plomo	C85400	1Sn-3Pb-29Zn	Todos	940 (925)	0.8-1.5	230	80	37	55
No ferrosas:									
Con base de Al	208.0	3Si-4Cu	Arena	627 (521)	1.5	150	100	2.5	55
	332.0	9.5Si-3Cu-1Mg	Molde permanente	582 (520)	1	250	195	1	105
	380.0	8Si-3.5Cu	Matriz	590 (520)	0.6	330	170	3	
	413.0	12Si	Matriz	577		295	145	2.5	
Con base de Mg	AZ91D	9A1-0.7Zn-0.2Mn	Todos	596 (468)	1.5 (0.6 en matriz)	200	135	3	65
	EZ33A	2.7Zn-0.5Zr-3 tierras raras	Arena y molde permanente	643 (543)	1.2	160	110	3	50
Con base de Ti	Ti-6A1-4V	6A1-4V	Revestimiento			1 000	900	8	
Con base de Ni	Inconel 718	19Cr-3Mo-5Nb-1Ti-0.5A1-18Fe	Revestimiento	1 330 (1 157)		1 200	1 150	16	
Con base de Zn	AC41A	4A1-1Cu-0.04Mg	Matriz	386 (381)	0.3-0.6	330		10	82
	ZA12	11A1-1Cu-0.025Mg	Matriz	432 (377)	1.3	430	320	2	100
Con base de Pb	Babbitt	16Sb-1Sn-1As	Cojinetes	272 (248)	2.6				20
Con base de Sn	B 560	7.5Sb-1Cu	Molde permanente	295 (244)	2				24

* Datos compilados de *ASM Handbook*, 10a. ed., vols.1 y 2, 1990. ASM International, Materials Park, Ohio.
† Propiedades mínimas como sale de la fundición, excepto el hierro fundido maleable y el nodular (recocidos) y el 332.0 y EZ33A (endurecido por precipitación).
‡ Holgura del fabricante de moldes.
§ Carga: 3 000 kg para materiales ferrosos, 500 kg para los no ferrosos.
¶ Resistencia a la compresión.
NOTA: para convertir MPa en 1 000 psi, se divide entre 7.

rir elementos como el Ca. El acero se desoxida con Al, el cual forma inclusiones de Al_2O_3. La mayoría de los aceros se pueden soldar fácilmente para armar componentes de tamaño inusitadamente grande o de gran complejidad. De ahí que tengan aplicaciones importantes, principalmente para equipo ferroviario (ruedas, marcos de los vagones de carga, acopladores), equipo de construcción y minería (orugas, carcasas de flechas, rotores de cable, cucharones y dientes de los cucharones, bolas de molienda), maquinaria para trabajar metales (trenes de laminación y bastidores para martinetes y prensas) y en componentes para campos petroleros y plantas químicas (cuerpos de válvulas, impulsores, partes de plataformas de perforación).

Debido a su escasa fluidez, el espesor de la pared debe ser muy grande, lo mismo que las fundiciones (casi la mitad de las fundiciones se encuentran en el rango de 200-500 kg de masa). Los aceros inoxidables son indispensables en las industrias alimenticia y química, pero su punto de fusión elevado y su alto rango de congelamiento presentan retos tecnológicos importantes.

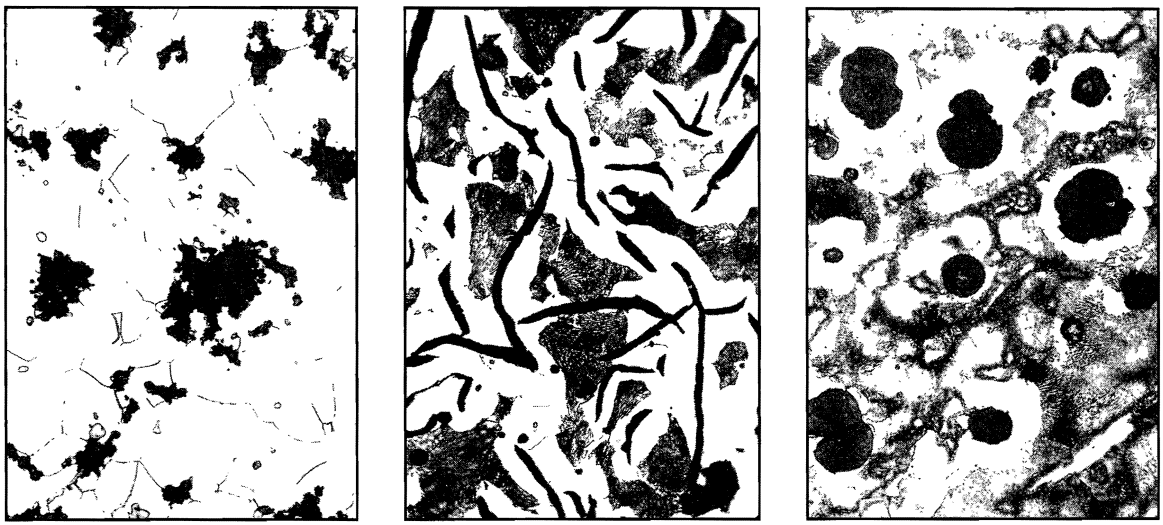
Hierros fundidos blancos Como se analizó en la sección 6-2-1, los hierros fundidos contienen más de 2% de C. La forma en la que el carbono solidifica depende de las velocidades de enfriamiento, así como de la composición. El control se ejerce principalmente por medio del contenido total de C y Si (y también P), y su efecto combinado puede ser expresado por el *equivalente de carbono* (C.E.):

$$\text{C.E. } (\%) = \text{C}\% + \frac{\text{Si}\% + \text{P}\%}{3} \qquad \textbf{(7-2)}$$

En C.E. < 3 y con enfriamiento rápido (espesor pequeño de la sección; digamos, menor de 6 mm en fundición en arena) toda la sección transversal se solidificará con una microestructura blanca, es decir, con todo el carbono en forma de Fe_3C; incluso se debe mantener un C.E. menor para paredes más gruesas. La cementita primaria en eutéctico hace a estos *hierros blancos* duros y frágiles, de aquí que su uso se limite a partes resistentes al desgaste, tales como bolas de molienda, recubrimientos para molinos de trituración de menas, y en algunas partes de maquinaria agrícola. Virtualmente no se pueden maquinar excepto por esmerilado.

Hierro maleable El Fe_3C del hierro blanco se puede convertir en grafito estable mediante un tratamiento de recocido, en el que la cementita se descompone en grafito (*carbono* templado) y ferrita. El carbono aparece en la forma de agregados irregulares (Fig. 7-9*a*) embebidos en una matriz de ferrita; de esta forma, la resistencia y la ductilidad son similares a las del acero, pero con un punto de fusión menor y mayor fluidez, y la fundibilidad es mejor. Puesto que la fundición debe ser blanca al inicio, sólo se pueden fundir productos de pared delgada (máximo 40 mm). El reemplazo por el hierro nodular ha reducido el mercado a componentes eléctricos pequeños y accesorios generales. La presencia de grafito imparte buena maquinabilidad.

Hierro gris Con C.E. relativamente elevado y velocidades de enfriamiento más lentas, hay tiempo para que el hierro solidifique en forma estable, y para que el carbono se separe en forma de *escamas de grafito* (Fig. 7-9*b*), haciendo la fractura de superficie de color gris opaco; de ahí el nombre de *hierro gris*. La formación del grafito equilibra



(*a*) (*b*) (*c*)

Figura 7-9 El carbono se presenta en formas diferentes de grafito en (*a*) hierro maleable (ferrítico), (*b*) hierro gris (50% ferrita, 50% perlita) y (*c*) hierro nodular (50% ferrita, 50% perlita). (*De Metals Handbook Desk Edition, ASM International, 1985, p. 27.26. Con permiso.*)

gran parte de la contracción por solidificación, asegurando la solidez y la libertad relativa de la porosidad en este proceso.

Las escamas de grafito reducen la ductilidad hasta hacerla prácticamente nula, y el módulo de Young es menor que el del hierro puro (varía de 70-150 GPa). El tamaño, la forma y la distribución de las escamas se puede controlar para dar una resistencia de baja a media (tabla 7-2); las propiedades siempre son mejores en compresión, porque las escamas de grafito actúan como sitios incipientes de grietas en tensión. El enfriamiento demasiado rápido resulta en una *estructura moteada* en la cual también está presente el carburo primario; las capas superficiales enfriadas rápidamente pueden ser completamente blancas, creando problemas en el maquinado de un material que de otra forma sería de excelente maquinabilidad.

Su bajo costo hace del hierro gris la elección preferida en todos los campos donde la ductilidad y la resistencia elevadas no son necesarias (pesos, marcos, armazones para motores, engranes y bombas; aditamentos de tuberías). Su capacidad de amortiguamiento elevada es una ventaja para las bases de las máquinas herramienta. Una fluidez alta y sus buenas propiedades tribológicas lo han hecho el material tradicional de los bloques de motor para automóviles. Algunos mercados se han perdido a favor del aluminio e incluso de los plásticos.

Hierro nodular Un hierro fundido dúctil se obtiene cuando el grafito se pasa a una forma globular menos perjudicial en la solidificación. Esto se logra agregando a la fusión, poco antes de la fundición o durante el vaciado, una cantidad pequeña de magnesio o cerio (introducido en la forma de una ferroaleación) el cual, a través de un

mecanismo que sólo se entiende parcialmente, causa que el grafito se separe en partículas bien definidas, casi esféricas (o alargadas, *nodulares*), distribuidas en la matriz de hierro α o perlítica (Fig. 7-9*c*). Como el Mg promueve la formación de cementita, entonces el hierro se inocula con silicio. El azufre interfiere con el desarrollo de las partículas esferoides y se remueve por desulfuración; al igual que en los aceros, la fusión se desoxida. El *hierro nodular* (*dúctil* o *esferoidal*) combina la buena fundibilidad y maquinabilidad del hierro gris con un poco de la ductilidad del acero. Usualmente, las fundiciones son tratadas térmicamente, y el hierro austemplado algunas veces puede reemplazar al acero. El *hierro fundido de grafito compacto* (*grafito vermiculado*) se produce por inoculación con menos Mg, y tiene una estructura y propiedades intermedias entre los hierros fundidos nodular y gris.

El hierro nodular tiene una gama de aplicabilidad extremadamente amplio, desde cigüeñales automotores y engranes hipoides hasta carcasas de bombas, rodillos de trenes de laminación y, en general, se usa en partes sometidas a cargas de impacto o que requieren un módulo elástico elevado (E = 150-175 GPa). Su uso está creciendo.

La matriz de los hierros fundidos se puede producir con niveles variantes del contenido de carbono; por lo tanto, los hierros fundidos se pueden tratar térmicamente igual que los aceros. También, se pueden alear para mejorar sus propiedades mecánicas o químicas (resistentes a la corrosión). El refinamiento de los granos es posible con el siliciuro de calcio y otros agentes de nucleación.

7-3-2 Materiales no ferrosos

Aquí se analizan los grupos de aleaciones más importantes ordenadas con respecto a su punto de fusión, lo cual también significa un aumento en el costo y en la dificultad de fundirlos y sobrecalentarlos hasta la temperatura adecuada. En la tabla 7-2 se proporcionan las propiedades de algunas aleaciones selectas.

Aleaciones con base de estaño De los metales ampliamente usados, el estaño tiene el punto de fusión más bajo (232°C). Es altamente resistente a la corrosión y no tóxico, pero su baja resistencia excluye su uso como material de construcción.

Una de sus aplicaciones más importantes es en cojinetes, donde su baja resistencia al cortante y su baja adhesión a otros metales asegura baja fricción aun si la lubricación falla. Debe ser reforzado por un material más resistente o, si la capa del cojinete va a ser gruesa, debe crearse una estructura compuesta en la cual se dispersa un compuesto duro en la matriz suave del estaño. Esto se logra añadiendo Sb para formar el compuesto intermetálico SbSn, en forma de cristales cúbicos pequeños y duros (*cuboides*). Éstos tienden a elevarse a la superficie de la fusión; se agrega un poco de cobre para formar un intermetálico cobre-estaño, el cual solidifica como una red espacial de agujas y atrapa los cuboides.

El antiguo peltre contenía plomo, pero el moderno no (tabla 7-2), por lo que es adecuado para artículos decorativos y tarros de cerveza.

Aleaciones con base de plomo El plomo también tiene un punto de fusión bajo (327°C) y buena resistencia a la corrosión, pero es tóxico y su uso está limitado a apli-

caciones donde se evita el contacto humano. Se usan fundiciones grandes en arena o de molde permanente como escudos contra rayos x y rayos γ.

La baja resistencia y solubilidad en otros metales del plomo lo convierten en un material para cojinetes, aunque de una calidad un poco menor que el estaño. Una vez más el refuerzo se obtiene por aleación, usualmente de estaño y antimonio, de manera que los cuboides de SbSn se dispersan en una matriz de un eutéctico terniario Sn-Pb-Sb. Estas aleaciones ternarias no sólo son duras, sino también poseen una fluidez elevada impartida por la presencia del estaño; por lo tanto, también se usaron como metal para tipos, cuyas letras son claras y limpias.

El plomo al antimonio o al calcio se usa extensamente para las rejillas fundidas de las baterías de plomo-ácido. Reciclar una mayor parte de las baterías usadas (una gran parte de todo el plomo en la forma metálica se recicla), asegura una economía mucho mejor.

Aleaciones con base de zinc El zinc es el único metal de baja fusión (419°C) ampliamente usado como material estructural de fundición. Su mayor debilidad es la baja resistencia a la termofluencia. También su resistencia a la corrosión es baja en la presencia de contaminantes como el Cd, Sn y Pb, los cuales provocan la corrosión intergranular. Sin embargo, su fluidez elevada y su punto de fusión bajo lo hacen sumamente adecuado para fundición en matrices de acero. El refuerzo se realiza por medio de una aleación de solución sólida con aproximadamente 4% de Al y 1-2% de Cu (el eutéctico se encuentra a 5% de Al en el sistema Zn-Al). Al emplear zinc 99.99% puro y con un control cuidadoso de los contaminantes se asegura una buena resistencia a la corrosión, por lo que estas aleaciones se hacen altamente competitivas (incluso con los plásticos) para partes de pared delgada de forma intrincada, tales como las cajas para instrumentos y los componentes y acabados automotores; para la última aplicación, la excelente respuesta al chapado con cromo es una ventaja. Las aleaciones con un 11% de Al ofrecen resistencia elevada combinada con buena fluidez.

Aleaciones con base de magnesio El punto de fusión del magnesio es sustancialmente más elevado (649°C), pero suficientemente bajo para permitir fundiciones por medio de todas las técnicas. Su baja densidad (1.74 g/cm^3) y resistencia razonable, acoplada con resistencia a la corrosión (excepto en entornos marinos), lo hacen muy atractivo para aplicaciones estructurales, incluyendo bloques de automotores enfriados por aire, carcasas de transmisiones y rines. La mayor barrera es el costo. Las aleaciones fundidas son soluciones sólidas reforzadas con hasta un 10% de Al (la composición eutéctica con 32% de Al es demasiado frágil para ser práctica), y se puede obtener un poco de endurecimiento por precipitación añadiendo Mn, Zr o Zn. La fluidez es muy adecuada porque el óxido no es denso ni entorpece el flujo. Las aleaciones de Mg-Zn-Zr-tierras raras son adecuadas para el servicio hasta 260°C. Los granos se refinan agregando Zr.

Aleaciones con base de aluminio Con una fusión a una temperatura ligeramente más elevada (660°C), casi tan ligero y considerablemente más barato que el magnesio, el aluminio y sus aleaciones representan (además del hierro nodular) el segmento de crecimiento más rápido de la industria de la fundición. La resistencia del aluminio a la

corrosión es excelente (excepto para los álcalis) y su resistencia en general se mejora fácilmente a través de mecanismos de solución sólida y de endurecimiento por precipitación. El incremento del reciclaje de la chatarra secundaria (Secc. 5-4-1) ha reducido la energía total consumida al fabricar piezas de aluminio.

El aluminio puro se usa para utensilios domésticos. El aluminio 99.6% puro de alta conductividad se funde en matriz a presión para rotores del tipo de jaula de ardilla, para motores fraccionarios, y también se usa como una fundición de molde permanente para motores grandes.

La película de óxido en la fusión es densa y tenaz y, como ya se mencionó, reduce la fluidez. La facilidad de la fundición es afectada en gran medida por la influencia de los elementos de aleación en esta película de óxido. El silicio es más benéfico, y sus aleaciones son las aleaciones de aluminio más fundibles. La composición eutéctica (alrededor del 12% de Si, con un punto de fusión de 577°C) es, por supuesto, la más favorable. Sus propiedades se mejoran enormemente refinando (*modificando*) la estructura eutéctica a través del enfriamiento rápido o, más frecuentemente, por la adición de una cantidad pequeña de sodio (o, más recientemente, estroncio) a la fusión poco antes del vaciado, después de lo cual el silicio eutéctico se modifica y se separa en forma de varillas finas o fibras en vez de escamas gruesas. Las aleaciones hipereutécticas contienen silicio muy duro y frágil en forma proeutéctica y son extremadamente resistentes al desgaste. La estructura se refina al añadir 0.01% de P para formar núcleos de fosfuro de aluminio. El duro y frágil silicio del eutéctico limita la ductilidad de la aleación. Por lo tanto, en las aleaciones fundidas más populares un poco de Si se reemplaza con Cu, el cual incrementa la resistencia por medio del reforzamiento por solución sólida y abre la puerta para el endurecimiento por precipitación (Secc. 6-4-2). La fundibilidad es alta, especialmente en la fundición en matrices, donde las dendritas se rompen por la presión que se aplica. El magnesio es un elemento útil de refuerzo de solución sólida, pero crea los problemas comunes de un amplio rango de congelación.

El hidrógeno causaría a la porosidad (ejemplos 6-11 y 6-12), por lo que se practica la depuración con argón o cloro justo antes del vaciado. El refinamiento de los granos se logra sumando agentes de nucleación de una aleación de Ti-B.

El uso de las fundiciones de aleación de aluminio varía ampliamente y siempre vale la pena considerarlo, especialmente cuando se deseen una razón elevada de resistencia al peso y resistencia a la corrosión. Las aplicaciones típicas incluyen cajas de transmisión para automóviles, émbolos, bloques de motor y algunos componentes de aeronaves.

Aleaciones con base de cobre El punto de fusión del cobre (1 083°C) es demasiado elevado para las matrices de acero (a menos que se protejan con recubrimientos pesados), pero se practican otros métodos de fundición porque el metal tiene un color atractivo, buena resistencia a la corrosión y una conductividad eléctrica alta.

Gran parte de las fundiciones se hace de aleaciones que combinan buena fluidez con una resistencia razonablemente elevada. Como las aleaciones de cobre han existido desde hace mucho tiempo, a muchas de ellas se les han dado nombres propios y algunas veces designaciones confusas (comúnmente a algunos latones se les denominó bronces). El uso extenso de las aleaciones de cobre en el pasado permite ahora que una parte sustancial (hasta del 35%) del consumo total se cubra con chatarra secundaria. Las

características tecnológicas importantes de las aleaciones se pueden deducir por su composición y por los diagramas de fase.

Existen pocos sistemas de aleación de cobre con eutécticos útiles; por lo tanto, la mayoría de las aleaciones fundidas se endurecen agregando elementos de solución sólida hasta el límite de solubilidad, para obtener una resistencia máxima sin fragilidad indebida por un contenido excesivo de partículas intermetálicas. Cada vez que el rango de solidificación es amplio, la fluidez se ve afectada.

Los *bronces de estaño* (aleaciones de Cu-Sn) tienen un rango de congelamiento muy grande, y la fluidez se incrementa agregando fósforo, el cual forma un eutéctico ternario de fusión baja (*bronce fosforado*) y también desoxida la fusión. La porosidad por el hidrógeno se evita purgando con N_2. La adición de zinc, con su baja presión de vapor, también incrementa la fluidez. Una aleación de 88Cu-10Sn-2Zn aún tiene una resistencia elevada, haciéndola adecuada para engranes, cojinetes y piezas para bombas. Con frecuencia se agrega plomo, principalmente para mejorar la maquinabilidad, pero también beneficia la fluidez. La aleación de 85Cu-5Sn-5Pb-5Zn es la más fundible de todas y se usa extensamente en accesorios, cuerpos de bomba y fundiciones en general. El contenido elevado de plomo en la aleación de 80Cu-10Sn-10Pb reduce su resistencia, pero la convierte en adecuada para aplicaciones de cojinetes.

Los *bronces de aluminio* tienen un rango corto de congelamiento, pero el óxido reduce la fluidez. Sin embargo, proporcionan resistencia elevada, especialmente en la condición tratada térmicamente (con hierro y otras adiciones de endurecimiento por precipitación). Su excelente resistencia a la corrosión las hace favoritas para aplicaciones marinas, engranes sinfín, válvulas y herramientas sin formación de chispas.

Los *latones* son aleaciones de Cu-Zn. Tienen un rango corto de congelamiento (Fig. 6-7) y son especialmente adecuados para adaptadores, accesorios de plomería y otras partes pequeñas. Muchas aleaciones fundidas también contienen plomo, el cual mejora la fluidez.

Aleaciones con base de berilio Ligeramente más denso (1.85 g/mm^3) que el Mg, pero de un punto de fusión mucho más elevado (1 277°C), el Be ofrece una rigidez muy alta (E = 280 GPa). Las aleaciones recién desarrolladas (30Al-3Ag con adiciones de Co, Ge y Si) permiten la fundición por cáscara de partes de pared delgada para aplicaciones aeroespaciales.

Aleaciones con base de níquel y cobalto Los puntos de fusión elevados del níquel (1 435°C) y del cobalto (1 495°C) y su resistencia a la corrosión los vuelven sumamente adecuados para muchas aplicaciones críticas. Su resistencia y, particularmente, su resistencia en caliente se puede incrementar en gran medida con elementos de aleación de solución sólida y de endurecimiento por precipitación (ejemplo 6-9). Algunas de estas superaleaciones tienen un alto contenido de segunda fase, por lo que no son deformables, y las fundiciones de superaleaciones pueden superar a otros materiales en aplicaciones a temperatura elevada, particularmente como partes de turbinas de gas (motor de reacción).

Materiales para altas temperaturas Algunas de las aleaciones con punto de fusión más alto sólo se usan en casos específicos para producir piezas fundidas.

El *titanio* (punto de fusión de 1 670°C) se puede alear para producir una resistencia a temperaturas elevadas combinada con peso bajo (razón resistencia al peso elevada) y resistencia a la corrosión. Así, estas aleaciones se usan en plantas químicas y en la construcción de aeronaves subsónicas y, especialmente, en las supersónicas. La gran afinidad del Ti con el oxígeno, el punto de fusión elevado, y la fluidez baja establecen grandes exigencias en las habilidades del tecnólogo de la fundición. Las propiedades de las fundiciones se pueden mejorar enormemente por medio del prensado isostático a temperatura elevada (HIP) (Secc. 7-6-2).

Los *metales refractarios* son, por definición, resistentes al calor y difíciles de fundir. Los más importantes son: el molibdeno, Mo (punto de fusión: 2 610°C); el niobio, Nb (también llamado columbio, Cb, 2 470°C), y el tungsteno, W (3 410°C). Se oxidan extremadamente rápido; por lo tanto, se necesitan técnicas especiales (arco al vacío o haz de electrones) para su fusión y vaciado. Son indispensables en algunas aplicaciones, como las toberas de los motores de los cohetes.

7-4 FUSIÓN Y VACIADO

Hasta este punto se han establecido los principios básicos relacionados con la fundición; ahora podemos proceder a analizar las técnicas reales.

7-4-1 Fusión

El primer paso es preparar una fusión con la composición correcta. En la figura 7-10*a* se muestra un esquema de los principales elementos del sistema.

1. Una *carga* se prepara para producir, mediante la fusión, la aleación de una composición específica. Rara vez es necesario, práctico o incluso deseable preparar una carga completamente de metales obtenidos de menas (metales primarios o vírgenes). Los elementos de aleación con un punto de fusión mucho más elevado que el del metal base se disolverían lentamente y requerirían un sobrecalentamiento excesivo, por lo tanto, se añaden en la forma de un *metal maestro* (*aleación de templado, endurecedor*), el cual contiene una concentración más elevada del elemento de aleación en el metal base. Por economía de operación, es muy importante que se agregue tanta *chatarra* como sea posible. El objetivo es producir una fusión de la composición especificada por normas relevantes, mientras que se mantiene los contaminantes por debajo de los niveles máximos permitidos, y lograr todo esto al mínimo costo posible. Los programas de computadora están disponibles para facilitar esta tarea. A menudo las plantas pequeñas encuentran que es más económico usar material prealeado y vaciado en lingotes que se compran a compañías especializadas (*práctica de fusión de lingotes*).

2. La carga se coloca en un *horno* que contiene la fusión y proporciona una fuente de calor. Aunque el arreglo físico puede variar sustancialmente, existen algunos elementos en común:

a. La fusión es contenida con un material de punto de fusión considerablemente mayor que el del metal, mientras que se minimiza la contaminación de la fusión a través

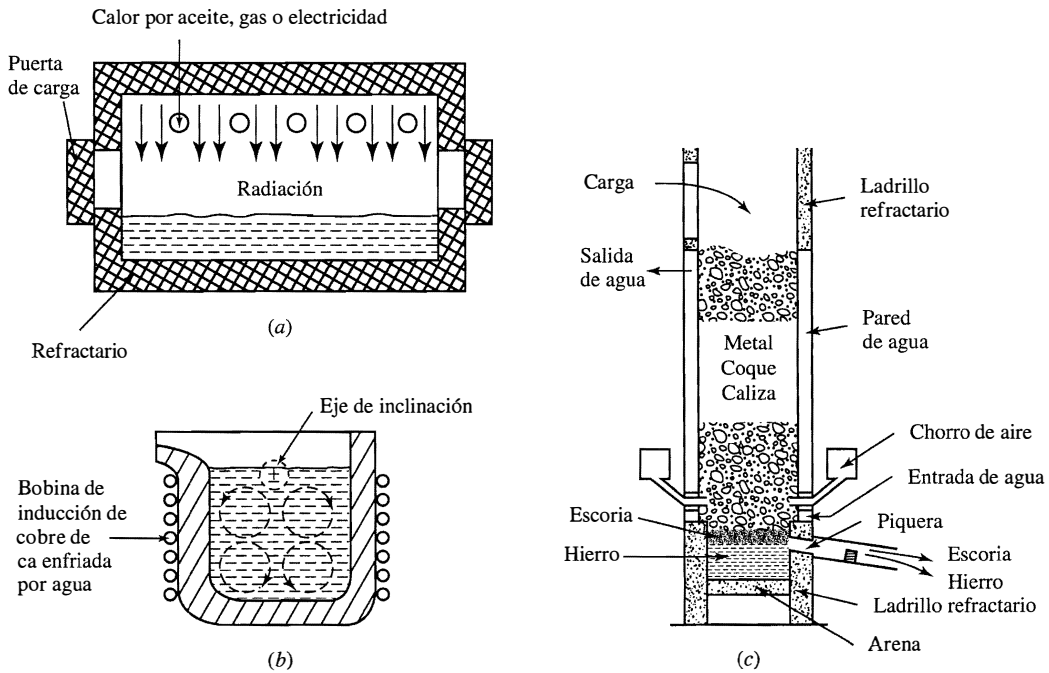


Figura 7-10 Algunos ejemplos de sistemas de fusión: (*a*) el calor se suministra externamente, a través de radiación desde las paredes del horno, en un horno de reverbero. (*b*) Las corrientes inducidas en la carga de un horno de inducción aseguran un mezclado completo. (*c*) Los hierros fundidos usualmente se fusionan en cubilotes, los cuales con frecuencia tienen paredes enfriadas por agua.

de inclusiones o elementos disueltos. El material se elige de manera que su óxido no sea reducido por el metal; de otra forma sería rápidamente atacado (por ejemplo, el Al nunca se funde en acero). El material puede variar de hierro (para el plomo) a estructuras de hornos revestidas con un refractario (un *refractario* es un cerámico de resistencia elevada a la temperatura). La carga también se puede contener en un *crisol* (cazo) de grafito o material refractario colocado en el horno. Alternativamente, la fusión se puede contener manteniendo una zona exterior fría que forma su propio recipiente.

b. El *calor* se proporciona externamente (por ejemplo, por radiación de las paredes de un *horno de reverbero* calentado por gas, quemadores de aceite o elementos de calentamiento eléctrico, Fig. 7-10*a*) o internamente (como en un *horno eléctrico de inducción*, Fig. 7-10*b*). El hierro fundido se fusiona semicontinuamente en un horno de tiro vertical (*cubilote*, Fig. 7-10*c*); el recubrimiento del cubilote con un refractario está desapareciendo a favor de camisas de acero enfriadas por agua. La carga se mezcla con coque y algunos minerales (principalmente caliza, $CaCo_3$), y se sopla aire caliente a través de la columna. El coque se quema para dar calor y también es una fuente de carbono para el hierro fundido. El metal líquido se sangra (vacía) en el fondo, separado de la escoria, la cual se forma por la caliza con contaminantes no metálicos y óxidos

metálicos. En el *proceso dúplex*, el metal líquido se vacía en un horno eléctrico de contención, donde también se realizan la aleación y el supercalentamiento.

3. Un factor inevitable es la presencia de una atmósfera. Ésta puede ser aire que, con su humedad y contaminantes varios, es una fuente de absorción de gases como el N, H y O; una *atmósfera protectora* (como el gas argón), o incluso el *vacío*, producidas a un costo determinado. Los productos de combustión, incluidos H_2O y H, también están presentes en los hornos calentados con petróleo y gas. Cuando la carga se mezcla con combustible (como el coque en el cubilote), las reacciones de éste y de sus productos de combustión con la fusión son inevitables. Así, las interacciones con la atmósfera varían de una simple disolución de gases en la fusión hasta reacciones como la oxidación o, en la presencia de agentes reductores, reducción e incluso enriquecimiento con carbono.

4. La carga se cubre o mezcla con *fundentes*, que son compuestos varios (usualmente inorgánicos) que se pueden extender sobre la superficie o mezclar en el metal para reaccionar con la fusión. A menudo tienen formulaciones sofisticadas para realizar funciones específicas: reaccionar con los contaminantes y elementos no metálicos, agrupar inclusiones, aislar la fusión de la atmósfera, y reducir las pérdidas de vapor de los metales de baja presión de vapor. La *escoria* resultante flota hacia la superficie de la fusión. La pérdida de metal en la escoria y las pérdidas debidas a la oxidación o evaporización representan una merma financiera y el objetivo es minimizarla, excepto cuando se desea la pérdida selectiva de los contaminantes.

Muchas operaciones de fundición generan humos, gases y polvo. Existen técnicas disponibles para minimizar e incluso eliminar la *contaminación ambiental*, y algunos de los trabajos más desagradables actualmente son realizados por robots y otros dispositivos mecánicos.

Ejemplo 7-1

Las latas de aluminio para bebida son productos demasiado complejos. El cuerpo de la lata está muy deformado y está hecho de una aleación 3004 excesivamente maleable (nominalmente 1.2Mn-1Mg), con T_L = 654°C y T_S = 629°C. La tapa debe ser más dura para soportar la presión interna y facilitar el desprendimiento de la cejilla de apertura. Está hecha de una aleación 5182 (nominalmente 4.5Mg), con T_L = 638°C y T_S = 577°C. Para su reciclaje, las latas se fragmentan, se calientan para quemar el esmalte, luego se vuelven a calentar a 600°C y de nuevo se trituran. La aleación 5182 comienza a fundirse en las fronteras de grano y se descompone en trozos pequeños, los cuales se pueden cribar para separar los fragmentos más grandes, de la aleación 3004. Alternativamente, las latas se funden completamente y se usa cloro para remover el Mg; entonces la fusión se alea para alcanzar la especificación 3004.

7-4-2 Vaciado

Cuando la fusión alcanza la temperatura y composición deseadas, se *sangra*. Un horno estacionario se sangra abriendo paso a través de un tapón refractario colocado en un agujero cerca del fondo del horno. Como su nombre lo implica, los hornos de volteo se sangran girándolos. Los metales con puntos de fusión más bajos se pueden bombear o succionar fuera del horno.

La fusión se puede transferir directamente al molde o se sangra a un *cucharón* (un recipiente recubierto de material refractario); de allí se lleva al molde. El metal se suministra a través de un orificio en el fondo o volteando la cuchara. En algunos casos la fusión se distribuye desde la instalación central de fusión hasta las diferentes plantas, localizadas a cierta distancia.

Puede haber un desequilibrio entre las velocidades de fusión y de uso del material; entonces se emplean *hornos de contención*, en los cuales puede ocurrir un tratamiento o aleación.

Es en la etapa de *vaciado* en la que las temperaturas finalmente se ajustan. Los elementos de aleación altamente volátiles que, debido a su elevada presión de vapor, se perderían durante la fusión pueden ser introducidos (por ejemplo, Mg en las fusiones de Al). También es factible añadir los elementos para la desoxidación. En general, el objetivo es mantener el metal fluyendo libre de la turbulencia que causaría el atrapamiento de óxidos y escoria. Las velocidades de vaciado y la cantidad vertida también deben controlarse. El vaciado automatizado, donde es económicamente posible, proporciona los resultados más reproducibles.

7-4-3 Aseguramiento de la calidad

Se han hecho grandes esfuerzos para mejorar la calidad de las fundiciones, y muchas de estas mejoras están relacionadas con la etapa de fundición y vaciado.

Composición Usualmente, la composición de la aleación se controlaba completamente por medio de la cuidadosa preparación de la carga. Actualmente los métodos analíticos rápidos, incluida la espectrografía de alta velocidad, proporcionan análisis de los elementos más importantes en sólo minutos, de manera que los ajustes se pueden hacer, para cada carga, antes del vaciado.

Inclusiones En la sección 6-3-4 se vio que las inclusiones pueden afectar en gran medida las propiedades mecánicas, en particular las de impacto (Secc. 4-2) y la resistencia a la fatiga (Secc. 4-5). Así, es posible incrementar la confiabilidad de las fundiciones y ampliar el rango de aplicación si se introducen técnicas enfocadas a reducir el número de inclusiones o, si esto no es práctico, a cambiar la morfología de las inclusiones y su distribución, con el fin de minimizar los efectos dañinos (por supuesto, estas técnicas también se usan para las aleaciones forjadas). Existen muchas posibilidades:

1. *Mantener* el metal a temperatura constante permite separar las inclusiones ligeras. Un fundente activo ayuda a reunir las inclusiones. En forma alterna, la fusión se pasa a través de *filtros* (especialmente para las aleaciones de aluminio). La *refinación por electroescoria* (relacionada con la soldadura con electroescoria, Secc. 18-6-2) se aplica a los aceros y a las superaleaciones, e incluye el refundido de un electrodo, previamente vaciado con la composición específica al arrastrar un arco sumergido en la escoria.

2. La *purga* (expulsión) de la fusión con gas (Secc. 6-3-5) reduce el contenido de gases. También pueden ocurrir reacciones con la fusión, como cuando se usa gas cloro

para remover el hidrógeno de las fusiones de magnesio o de aluminio. Algunas veces estos efectos son un derivado de otra operación; por ejemplo, en el soplado del acero con oxígeno el objetivo es remover el carbono, pero también se reducen las concentraciones de nitrógeno e hidrógeno. Esto se aplica también para el soplado de acero inoxidable con argón y oxígeno. Este último es reducido posteriormente por medio de la desoxidación.

3. Muchas inclusiones son productos de *reacciones no deseadas* (usualmente oxidación) con un gas. La limpieza se mejora reduciendo la presión parcial de vapor (ecuación 6-7) mediante la aplicación de vacío durante la fusión (fusión por inducción al vacío, refundido con electrodo desechable), después que la fusión se completa (desgasificación al vacío en el horno o en la cuchara), o mientras ocurre el vaciado.

Gases Las burbujas de gas forman inclusiones de resistencia cero (Secc. 6-3-5) y son, en la mayoría de los casos, no deseadas. Además de purgar y de la aplicación de vacío, existe la opción de combinar los gases en un producto sólido de reacción. De esta forma, las aleaciones de cobre se *desoxidan* con fósforo; los aceros se desoxidan con aluminio, silicio, manganeso o calcio. Los productos de la reacción permanecen en la fundición, por lo que los procesos de control tienen como objetivo distribuirlos en la forma menos dañina. Debido a su importancia para los aceros forjados, regresaremos a la desoxidación en la sección 8-3-1.

Las aleaciones (especialmente de acero) de una composición dada se producen comercialmente con varios niveles de impurezas e inclusiones; se usa la versión más limpia y costosa en las aplicaciones más críticas.

Ejemplo 7-2

El beneficio de las medidas anteriores se puede estimar a través de los avances en la fundición de superaleaciones usadas en los motores de reacción. La resistencia a la ruptura (expresada como la temperatura para una vida de 100 h a 140 MPa) se ha incrementado a una tasa promedio de 10°C/año desde alrededor de 1940 hasta 1980, y en la actualidad algunas aleaciones operan únicamente 50°C por debajo de su temperatura solidus. Gran parte de las mejoras provienen de la reducción de las impurezas de bajo punto de fusión (5 ppm de Pb pueden reducir la ductilidad en 75%) y de la eliminación de inclusiones por medio de técnicas de fusión especiales (fundición al vacío, diseño cuidadoso del sistema de vaciado y alimentación, y el uso de filtros cerámicos). Como resultado, ha disminuido a la mitad el consumo de combustible y se ha incrementado diez veces la razón empuje a peso. [Fuente: W.J. Molloy, *Adv. Mater. Proc.*, 1990 (10): 23-30.]

7-5 PROCESOS DE VACIADO

El número de procesos de fundición es muy grande, y aquí sólo se pueden cubrir los más importantes.

7-5-1 Clasificación

Desde el punto de vista tecnológico, los procesos de fundición se pueden agrupar en dos categorías amplias: fundición en moldes desechables y en permanentes. El *molde*

desechable sólo se usa una vez y se debe romper para liberar la fundición solidificada, en tanto que se espera que un molde *permanente* dure varios cientos o miles de fundiciones y que su construcción sea adecuada para liberar la fundición solidificada.

Una clasificación alterna se basa en el propósito de la fundición:

1. *Fundición de lingotes, planchas y palanquillas.* El metal es una aleación forjada; en preparación para el laminado, la extrusión o el forjado, se funde en una forma sencilla, adecuada para el trabajo posterior. Como ya se mencionó, 85% de los metales se procesa de esta forma en plantas especializadas. Es esencialmente una actividad de manufactura primaria, y aquí sólo se analiza con el fin de preparar la discusión de los capítulos 9 y 10.

2. *Lingotes refundidos.* Son formas sencillas, vaciadas a partir de fusiones de composición muy controlada y analizada, para facilitar el transporte y la carga en los hornos de los fabricantes secundarios.

3. *Fundición de formas.* La fusión se vacía en la forma final, la cual sólo necesita limpieza y/o maquinado para producir una pieza terminada. Éste es un proceso típico de la manufactura secundaria y será el centro de nuestro análisis.

7-5-2 Fundición de lingotes

Los cuerpos fundidos de sección transversal circular, octagonal, o cuadrada con esquinas redondeadas, se llaman *lingotes* cuando su diámetro o dimensión lateral es de cerca de 200 mm o mayor, y se denominan *palanquillas* cuando son menores. Generalmente, a los cuerpos de secciones transversales rectangulares se les llama *planchas.* Casi universalmente, se vacían en moldes permanentes por medio de varias técnicas:

1. *Los moldes para lingotes o lingoteras*, comúnmente de hierro o acero, se emplean para el vaciado estático de todas las aleaciones (Fig. 7-11*a*). La solidificación comienza desde las paredes del molde y continúa hacia el centro, dando los patrones de solidificación que se muestran en la figura 7-1. Con frecuencia se obtiene mejor calidad (mejor superficie, menos escoria y menor atrapamiento de gases) por medio del vaciado desde el fondo (líneas discontinuas en la Fig. 7-11*a*). El rechupe se evita suministrando metal fundido, ya sea del cucharón o de una reserva de metal caliente contenida en una extensión del molde recubierta con refractario. El metal se puede mantener caliente más tiempo y la profundidad del rechupe se reduce colocando un collar aislante o un compuesto exotérmico (el cual se enciende en contacto con el metal caliente y produce calor) arriba de la fusión (*parte superior caliente*). Esto permite una mayor producción de metal útil.

2. Los *moldes enfriados por agua* construidos con pared doble se emplean sobre todo en el vaciado de aleaciones con base de cobre.

Los lingotes más pequeños vaciados por medio de las dos primeras técnicas pueden ser de 25-50 mm de espesor en metales no ferrosos, y de 150-200 mm en aceros; sus masas tienen un rango de hasta 20 Mg y de 300 Mg, respectivamente.

3. Los procesos de *colada continua* se usan para la vasta mayoría de las planchas y palanquillas.

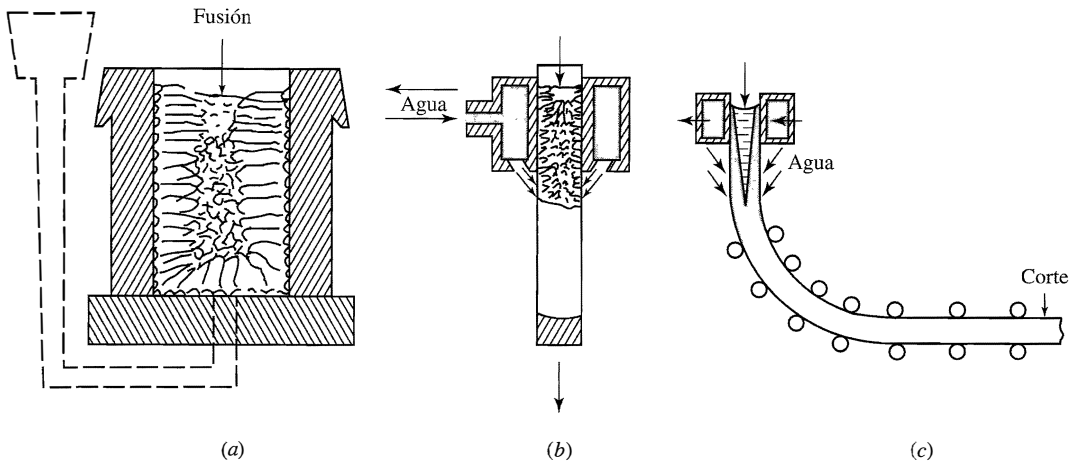


Figura 7-11 Los metales destinados para trabajado posterior por deformación plástica se funden en formas simples en moldes permanentes (*a*) o se someten a fundición semicontinua en longitudes cortas (*b*), o hay una fundición continua en longitudes largas (*c*).

a. La *colada semicontinua* (o de *enfriamiento directo*, Fig. 7-11*b*) se usa para metales no ferrosos. La solidificación se realiza casi por completo en el molde de cobre enfriado por agua. La colada se retira gradualmente a medida que progresa la solidificación, y se enfría adicionalmente con aspersores de agua. El proceso se interrumpe periódicamente para permitir la remoción de un lingote. Para evitar la adhesión al molde, se aplica un lubricante. El contacto con el molde se elimina y la calidad de la superficie se mejora mucho en el vaciado de aluminio que contiene la zona fundida con aire bajo presión (parte superior presurizada con gas) o con un campo electromagnético. Este campo electromagnético también se usa en el *vaciado por levitación* hacia arriba del cobre y sus aleaciones.

b. La *colada continua*, también llamada *colada en hilo* (Fig. 7-11*c*), se usa mayormente en aceros, y puede continuar por cientos de cargas. La plancha o barra debe cortarse con una sierra volante o un soplete mientras se mueve. De nuevo se usa un lubricante; se obtiene una protección posterior oscilando el molde. La solidificación se extiende grandes distancias más allá del molde, y el acero caliente se puede doblar y desdoblar para reducir la altura de la construcción. También se vacían formas simples como las preformas para la laminación de vigas de patín ancho.

c. En la *colada en tiras* se emplean rodillos gemelos o bandas flexibles para producir planchas delgadas o tiras, evitando así las primeras etapas del laminado en caliente.

d. En los procesos *Properzi* y *Southwire* el metal se solidifica en el espacio definido por medio de un rodillo surcado y una banda flexible; la palanquilla se alimenta directamente a un tren de laminación, creando un proceso continuo.

7-5-3 Fundición de formas

Cuando el proceso de la fundición tiene como objetivo producir un componente de forma compleja, se prepara un molde con una cavidad que define la forma de dicho componente, con su debida holgura para la contracción después de la solidificación. En todos los procesos de vaciado empleados (Fig. 7-12) se aplican algunos principios básicos. El primero es que una buena fundición sólo se obtiene si la fusión se lleva a la cavidad en forma ordenada y si se solidifica en una manera planeada.

Flujo del fluido El sistema de abastecimiento de fluido de un molde se diseña de acuerdo con los principios de su flujo. Idealmente, éste debe ser laminar (uniforme) pero, en la práctica, la turbulencia no se puede evitar completamente. Sin embargo, la turbulencia debe mantenerse al mínimo para evitar la erosión del molde, y el atrapamiento de escoria, del material del molde y de gases. El sistema del molde se debe llenar con metal bajo presión positiva, de manera que no se aspire gas en ninguna parte.

Los sistemas de abastecimiento del fluido tienen algunas características comunes para todos los procesos de fundición de formas (Fig. 7-13):

1. El *vertedero* es un receptáculo suficientemente grande para acomodar la corriente de metal, y a menudo su forma asegura el flujo uniforme de la fusión. En la superficie (nivel 1, Fig. 7-13), la presión hidrostática es nula y la energía potencial es máxima. La

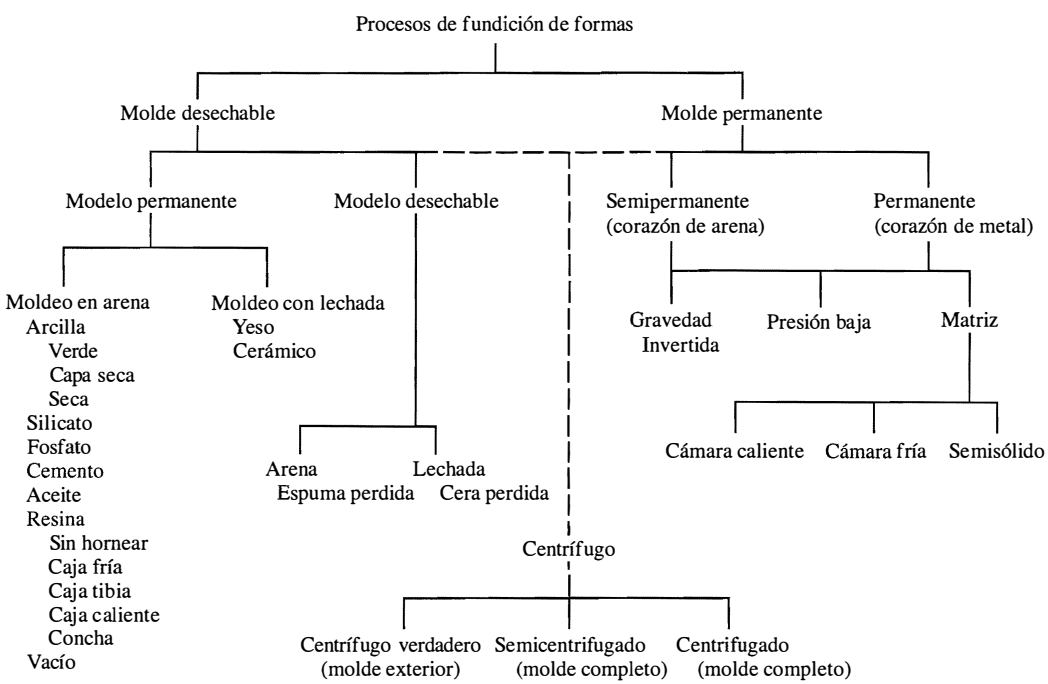


Figura 7-12 Clasificación de los procesos de fundición de formas.

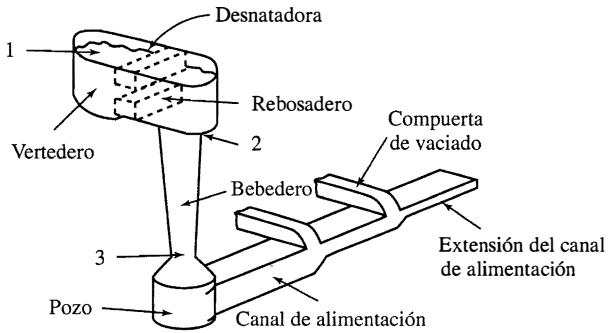


Figura 7-13 La distribución ordenada de la fusión hacia cavidad del molde requiere un alimentador bien diseñado (alimentación y vaciado).

escoria (óxidos y otras inclusiones que se elevan a la superficie) puede ser retenida con una *desnatadora*, y las inclusiones más pesadas con un *rebosadero*.

2. El fluido se transporta hacia dentro del molde a través del *bebedero*. Así, la energía potencial se convierte en cinética y la velocidad se incrementa. Como el flujo de la masa es constante, a medida que la velocidad aumenta, la corriente se aleja de las paredes del bebedero, y esto succionará aire no deseado hacia el molde. Para evitar la aspiración de aire, se debe mantener una diferencial positivo de presión; para este fin, el bebedero tiene una forma ahusada hacia abajo (del nivel 2 al 3, Fig. 7-13). En la base del bebedero se localiza un *pozo* con una amplia sección transversal; la disminución repentina del flujo disipa energía cinética y ayuda a desaparecer las inclusiones que pudieran haberse arrastrado con la corriente del flujo. En la base del bebedero se pueden colocar *filtros de cerámico* o de *malla de alambre* para filtrar la escoria y otras inclusiones grandes.

3. La fusión se distribuye a través de *canales de alimentación*, los cuales son de secciones transversales grandes y con frecuencia hidrodinámicos (Fig. 7-13), con el propósito de aminorar y uniformizar el flujo. Se diseñan para proporcionar velocidades de flujo casi uniformes a varias partes de la cavidad.

4. Los canales de alimentación se conectan a la cavidad del molde por medio de *compuertas*. En la unión con la cavidad se reduce ampliamente el espesor de estas compuertas (*compuertas de entrada*), no sólo para permitir la separación fácil de la fundición solidificada, sino también para obstruir el flujo de metal y asegurar una entrada tranquila a la cavidad. A menudo el canal de alimentación se extiende más allá de la última compuerta para servir como trampa para las inclusiones conducidas por el primer metal.

Usualmente, las fundiciones tienen las compuertas en los costados, como se muestra en las figuras 7-13 y 7-15. Algunas partes son adecuadas para el vaciado por arriba, donde el bebedero sirve de mazarota. La alimentación desde el fondo proporciona un flujo más tranquilo, aunque entonces la parte superior del vaciado se llena con el metal más frío. Existe una situación particularmente favorable cuando el metal es succionado

hacia arriba en un molde calentado al vacío (*fundición por succión*), porque dicho molde se llena sin salpicaduras y hay pocos, si es que existen, gases que disipar en el molde.

Las dimensiones de las distintas partes del sistema de distribución del fluido (algunas veces llamadas *aparejos*) se pueden calcular en forma aproximada considerando que las fusiones son incompresibles. Por lo tanto, la *velocidad del flujo* (el volumen que pasa a través de una sección transversal dada en una unidad de tiempo) en cualquier parte del sistema obedece la *ecuación de la continuidad*:

$$A_0 v_0 = A_1 v_1 \quad \text{etc.} \tag{7-3}$$

donde A es el área de la sección transversal de una sección y v es la velocidad en ese punto. Si $A_1 > A_0$, el flujo es más lento y viceversa.

Se puede obtener una aproximación de la velocidad por medio del *teorema de Bernoulli*, en el cual se enuncia que, en condiciones de flujo uniformes y estables, la energía total de una unidad de volumen del material debe ser constante en cualquier parte del sistema. Existen cuatro componentes de la energía: la energía de presión, originada por la presión p, la cual es la suma de las presiones externa e hidrostática (debida al peso de la fusión); la energía cinética, causada por la velocidad v; la energía potencial, debida a la altura h por encima de un plano de referencia; y las pérdidas de energía f originadas por la fricción en la fusión (este término se debe tomar para incluir la merma de energía en la turbulencia, cambio direccional y fricción contra las paredes del molde). De esta forma, la energía total por unidad de volumen es

$$p_0 + \frac{\rho v_0^2}{2} + \rho g h_0 = p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 + f \tag{7-4}$$

donde ρ es la densidad.

Si las velocidades son demasiado bajas, el congelamiento ocurre antes de que el molde se llene completamente; y si son demasiado altas, el molde se erosionará y se arrastrarán inclusiones hacia su cavidad.

La posición y las dimensiones del sistema del canal de alimentación influyen vitalmente en la solidez de la fundición, porque determinan las velocidades de abastecimiento de la fusión a las distintas partes de la cavidad, y de esa manera también actúan sobre el patrón de solidificación. El tema se ha desarrollado principalmente en años recientes, tanto en el campo teórico como en el experimental. Los programas comerciales de computadora usualmente se basan en una mezcla de teoría básica y experiencia, y proporcionan ayuda interactiva en el cálculo de las compuertas.

Ejemplo 7-3

Suponiendo pérdidas despreciables por fricción, use las ecuaciones (7-3) y (7-4) para demostrar que la parte superior e inferior del bebedero deben obedecer la siguiente razón para evitar aspiración

$$\frac{A_2}{A_3} = \sqrt{\frac{h_3}{h_2}}$$

Sea p_2 la presión en la parte superior del bebedero (Fig. 7-13, nivel 2); en el fondo (nivel 3) p_3. Para evitar aspiración, $p_3 > p_2$. Para propósitos de este ejemplo, $p_3 = p_2$. De la ecuación (7-4)

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 \qquad \textbf{(7-4')}$$

El área de la sección transversal del vertedero es muy grande, de aquí que

$$v_1 = 0 \text{ en } h_1 = 0 \text{ y } v_2 = \sqrt{2gh_2} \qquad \textbf{(a)}$$

en forma similar.

$$v_3 = \sqrt{2gh_3} \qquad \textbf{(b)}$$

De la ecuación (7-3),

$$v_2 = \frac{A_3 / A_2}{v_3} \qquad \textbf{(c)}$$

Sustituyendo la ecuación (*c*) en la (*a*) e igualando a la (*b*) se obtiene la relación:

$$\frac{A_2}{A_3} = \frac{v_3}{v_2} = \sqrt{\frac{h_3}{h_2}}$$

Extracción de calor y solidificación Una vez que la fusión entra en el molde, se extrae calor a través de las paredes del molde y comienza la solidificación. Si no se toman medidas especiales, el calor se extrae de todo el perímetro, de manera que la solidificación ocurre *progresivamente* desde todas las superficies hacia adentro.

El tiempo de solidificación t_s es, como se podría esperar, directamente proporcional al volumen V (el cual gobierna el contenido de calor), e inversamente proporcional al área de la superficie A (sobre la cual ocurre la extracción del calor). Se puede demostrar que, para una gran variedad de formas y tamaños, la relación es cuadrática (*regla de Chvorinov*)[1]

$$t_s \propto (V/A)^2 \qquad \textbf{(7-5)}$$

donde a la razón V/A se conoce como el módulo de la fundición. Las porciones gruesas de la fundición se congelan al final; por lo tanto, la solidificación progresiva puede llevar a un congelamiento prematuro de las secciones delgadas, negando el acceso del líquido a las partes más gruesas y conduciendo a la porosidad y a la formación de las cavidades de contracción (Fig. 7-14*a*). Las soluciones pueden tomar formas diferentes:

1. Las *mazarotas* (*cabezas de alimentación*) proporcionan una reserva de material fundido. Se fabrican con una razón V/A alta (Fig. 7-14*b*), solidifican al final y alimentan líquido suficiente a las secciones pesadas de las fundiciones para compensar la contracción antes y durante la solidificación. En la figura 7-15 se muestra un ejemplo real; se

[1] N. Chvorinov, *Proc. Inst. Br. Foundryman*, **32**:229 (1938-39).

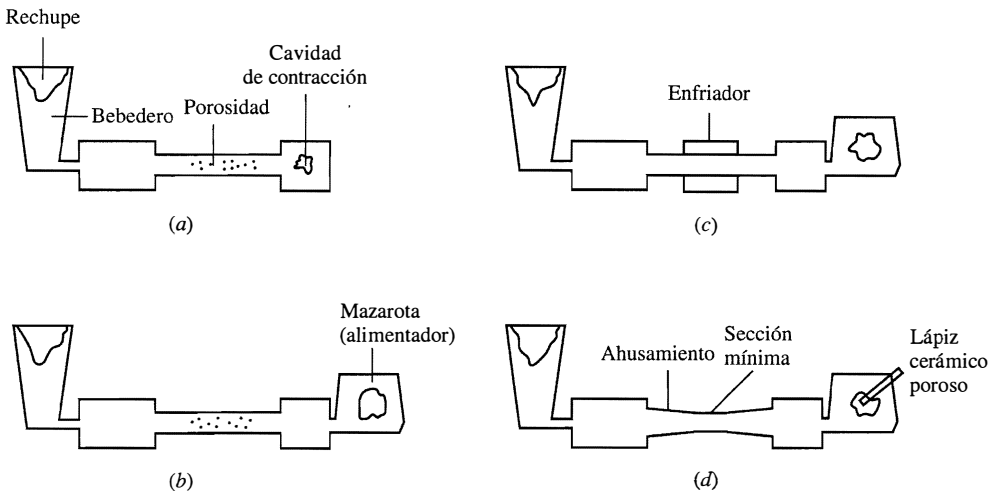


Figura 7-14 Una fundición puede presentar cavidades de contracción y microporosidad (*a*). Las cabezas de alimentación o mazarotas que se retiran después de la solidificación proporcionan metal caliente (*b*). La microporosidad se puede eliminar con la solidificación direccional al incorporar un enfriador de metal en el molde (*c*) o ahusando la sección más delgada (*d*).

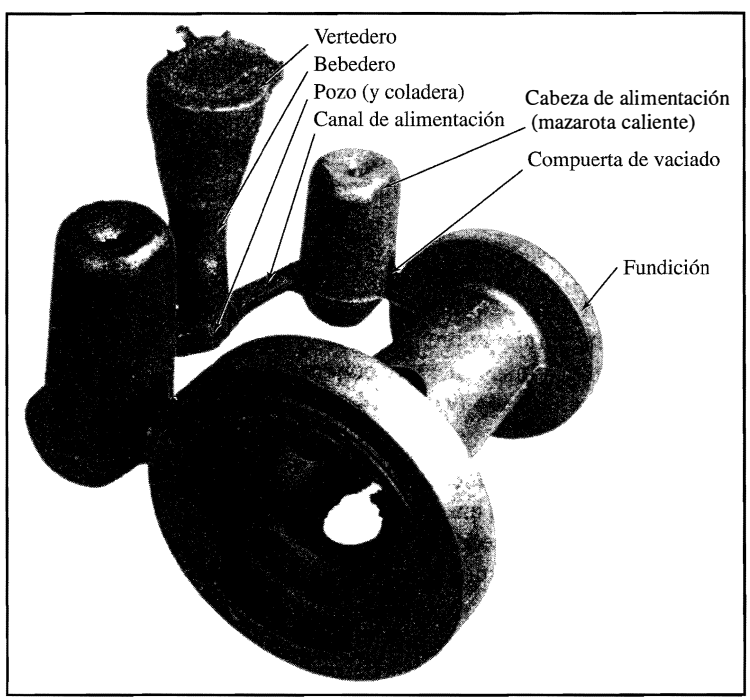


Figura 7-15 Un ejemplo de una fundición de hierro gris con corazón, mostrando el bebedero, los canales de alimentación, el sistema de vaciado y las mazarotas. Note la configuración de la coladera en la base del bebedero. (*Cortesía de Massey-Ferguson Brantford Foundry, Brantford, Ontario.*)

notará que las mazarotas se colocan entre los canales de alimentación y la fundición, de manera que se llenan al final y contienen el metal más caliente (*mazarotas vivas* o *calientes*). En otras ocasiones, como se muestra en la figura 7-14, se debe colocar una mazarota al término de la fundición (*mazarota sumergida* o *fría*). Para asegurar la alimentación ininterrumpida, la unión entre la mazarota y la fundición puede alcanzar, en el caso del acero de 70 a 90% de la sección transversal que se va a alimentar.

Las mazarotas pueden estar *abiertas* a la atmósfera para luego colocar compuestos exotérmicos en ellas; la *mazarota sumergida* que se muestra en la figura 7-14 pierde calor, por lo que se debe insertar un *núcleo de lápiz* cerámico para ecualizar la presión en la cavidad de la contracción. Aunque con frecuencia son indispensables, las mazarotas reducen la producción e incrementan la cantidad de chatarra por reciclar.

2. En una sección delgada, la porosidad se puede evitar iniciando el congelamiento de esa área y moviendo el frente de la solidificación hacia las secciones más gruesas, es decir, cambiando la solidificación progresiva por la *solidificación direccional*. En los moldes desechables, esto se puede propiciar colocando insertos de metal (*enfriadores*) en el molde refractario en los puntos donde se desee un enfriamiento máximo (Fig. 7-14*c*). En los moldes permanentes, el enfriamiento localizado se logra poniendo aletas o pernos de enfriamiento sobre las superficies externas, o incluso a través de pasajes de enfriamiento en el molde, enfriados por aire o agua. Además, es necesario el abastecimiento de líquido para compensar la contracción por solidificación. Se requiere un gradiente mínimo de temperatura de 1.5°C/cm para asegurar una buena alimentación y evitar la microporosidad.[2] La porosidad también se puede eliminar mediante el ahusamiento (Fig. 7-14*d*), aunque esto requiere material extra (*relleno*).

Control de la estructura La extracción de calor y el modo de solidificación no sólo afectan la solidez de la fundición, sino también la estructura y el tamaño del grano del metal solidificado. Efectivamente, una de las mejores formas para mejorar las propiedades de una fundición es controlar el tamaño de grano. En la sección 6-3-5 se analizó que lo anterior se logra por medio de un tamaño pequeño de grano; para este propósito se emplean agentes de nucleación junto con velocidades de enfriamiento controladas (Secc. 7-1-1). Sin embargo, hay excepciones: en aplicaciones de temperatura elevada y resistencia a la termofluencia es preferible un grano grueso si la estructura es equiaxial (Fig. 6-18). Se obtienen mejores propiedades si se eliminan las fronteras de grano transversales a la dirección de la carga. Así, las propiedades de los álabes de las turbinas mejoran cuando la estructura policristalina (Fig. 7-16*a*) es reemplazada por granos orientados axialmente (Fig. 7-16*b*); para ello, el molde se coloca en una base enfriada por agua y se retira lentamente de un recinto caliente. Un grano único es aún más resistente, y en la ausencia de fronteras de granos, más resistente a la corrosión (Fig. 7-16*c*). Si un canal helicoidal ("cola de cerdo") se coloca entre el enfriador y el molde (Fig. 7-16*e*), sólo el grano orientado más favorablemente (en las superaleaciones con base de Ni, el ⟨001⟩) puede crecer a través de la hélice y hacia el molde. Si es necesario una orientación diferente para una resistencia elevada, entonces se coloca la semilla de un cristal en el fondo del molde (Fig. 7-16*f*). La resistencia elevada en caliente se puede desarrollar en álabes monocristalinos, ya que la ausencia de fases frontera de grano de bajo punto de

[2] M.C. Flemings: *Solidification Processing*, McGraw-Hill, 1974.

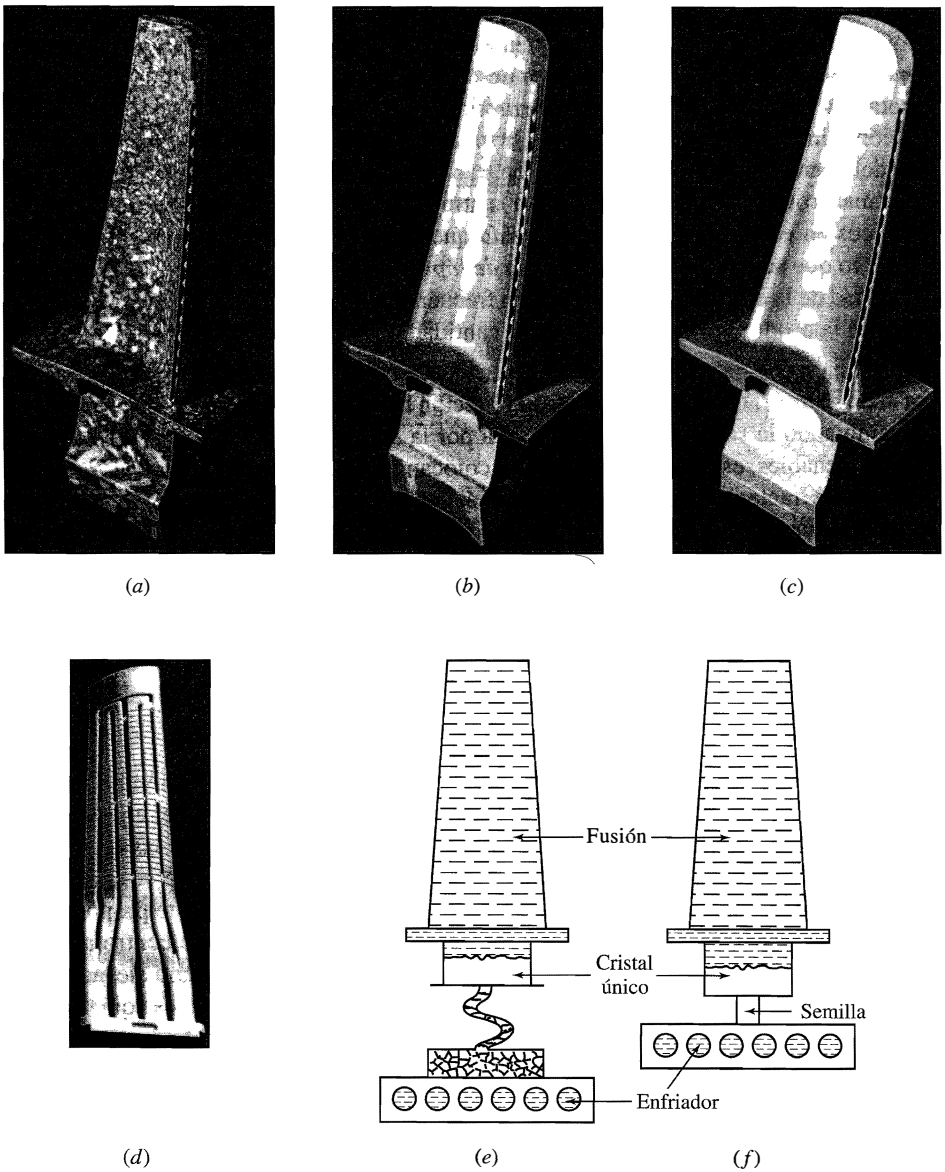


Figura 7-16 Los motores a reacción se pueden operar a temperaturas elevadas cambiando la estructura de la superaleación con base de Ni de los álabes de la turbina de (*a*) una estructura policristalina equiaxial producida por fundición convencional a (*b*) una de granos columnares producida por solidificación direccional y (*c*) a cristales únicos. Los pasajes internos complejos se producen con (*d*) corazones cerámicos en estas fundiciones de cera perdida. (*Cortesía de Howmet Corporation, Greenwich, Connecticut.*) Los álabes de cristal único se producen (*e*) permitiendo únicamente el crecimiento de la orientación más favorable o (*f*) colocando un cristal semilla en el molde.

fusión permite la solucionación a temperaturas elevadas. Aun es factible realizar mejoras posteriores por medio de la solidificación direccional de las estructuras eutécticas, de modo que las fibras de una fase dura y resistente (como la de un compuesto intermetálico) se orienten en la dirección de la carga y proporcionen un reforzamiento integral.

Diseño del molde Con los principios anteriores en mente, el diseño del molde sigue los siguientes pasos:

1. Se determinan el volumen y el peso de la fundición.

2. Con base en el volumen y en la configuración geométrica (larga y angosta, en bloques, de secciones trasversales no uniformes, etc.) se precisa el tamaño y número de las mazarotas.

3. Por medio de la teoría y de las relaciones empíricas se establece el tiempo óptimo de vaciado.

4. Se diseña el sistema de alimentación que permita el llenado del molde, en el tiempo permitido, de la manera más uniforme posible.

Los programas de computadora son útiles en muchas formas. Los más simples conducen al diseñador de moldes a través de los pasos indicados anteriormente, usando teoría sencilla y un buen número de datos empíricos. Los modelos matemáticos, basados en métodos analíticos o numéricos, han avanzado hasta el punto en que el llenado del molde se puede observar en una pantalla, el sistema de vaciado y de las mazarotas pueden ser diseñados, y hasta cierto punto es factible predecir los tiempos de congelación, e incluso la microestructura y las propiedades. La influencia de los cambios en las condiciones de la fundición se puede evaluar sin requerir coladas experimentales extensas.

La solidificación de las fusiones también puede ser estudiada en el laboratorio usando materiales de simulación (por ejemplo, soluciones orgánicas cuya cristalización se observa en un molde transparente de plástico).

Ejemplo 7-4

El modelado por computadora del flujo de un fluido revela problemas en la fundición de un volante de tres rayos en posición vertical. Con un sistema superior de vaciado, el metal baja en cascada libre (*a*), posiblemente erosionando la arena, y se desarrollan juntas frías en la masa (*b*). El sistema de vaciado en el fondo proporciona un llenado más tranquilo (*d*), aunque pueden existir juntas frías en el aro (*e*) y (*f*). El modelado se confirmó con fotografías a alta velocidad del llenado en un molde de arena, reemplazando una pared por vidrio. (Según W.S. Hwang y R.A. Stoehr, *ASM Handbook*, vol. 15, *Casting*, ASM International, 1988, págs. 874-875. Con permiso.)

7-5-4 Vaciado en molde desechable, modelo permanente

Los moldes desechables se preparan consolidando un material refractario (*arena*) alrededor del *modelo* que define la forma de la cavidad e incorpora, en muchos casos, las compuertas, el bebedero y las mazarotas que se requieren para llenar el molde (Fig.7-17).

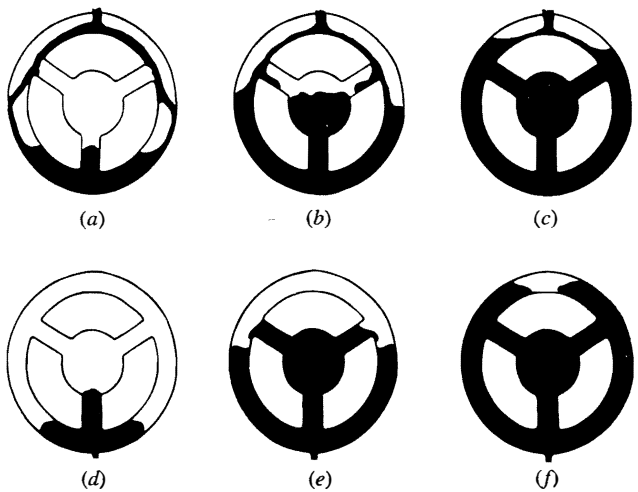


Figura ejemplo 7-4

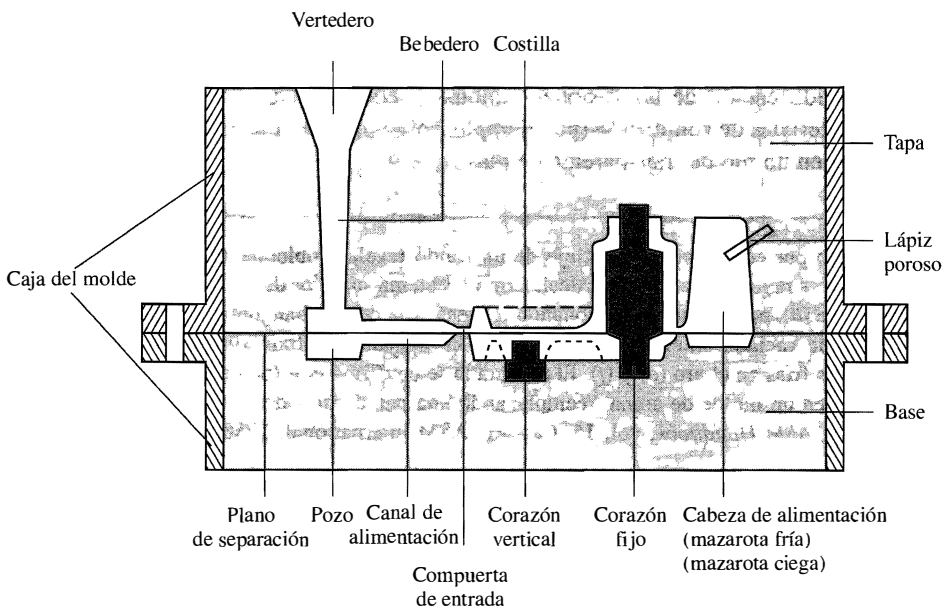


Figura 7-17 Algunos elementos característicos de un molde de arena de base y tapa. Para evitar la cabeza de alimentación "muerta" (mazarota), el molde se podría alimentar por la derecha, haciendo que el material en la mazarota "viva" sea el más caliente.

Modelos Los modelos difieren de la parte terminada en algunos aspectos importantes. Todas las dimensiones se incrementan para tomar en cuenta la contracción (contracción sólida) de la pieza desde la temperatura solidus a la ambiente (no confundirse con la contracción por solidificación). Existen reglas para fabricantes de modelos que incluyen en su longitud la *holgura por contracción* (tabla 7-2); en CAD/CAM la holgura se preprograma. Si la pieza se va a maquinar, se agrega un espesor apropiado (*holgura de maquinado*).

Como los modelos permanentes se usan repetidamente, se fabrican de madera o, para mayor durabilidad y estabilidad dimensional, de un metal o de un plástico fuerte. El modelo se debe remover fácilmente del molde consolidado; para esto, los moldes deben fabricarse en dos partes. En consecuencia, se selecciona un *plano de separación* que divide convenientemente la forma en dos partes (Fig. 7-18*a*). A las superficies paralelas a la dirección del retiro se les da una salida (Fig. 7-18*a*) para permitir la remoción del modelo sin dañar el molde.

Las cavidades, los cortes sesgados y los huecos en la forma fundida deben ser formados por medio de la inserción de *corazones* (Figs. 7-16*d* y 7-17). Así, se puede obtener una mayor complejidad de la forma, pero a un costo mayor. El modelo proporciona agujeros de empalme (*asientos para corazón*) para la localización exacta de los corazones.

El modelo más simple para producir la forma que se muestra en la figura 7-18 sería de *una pieza* (pero usualmente se divide a lo largo del plano de separación); las compuertas, los canales de alimentación y las mazarotas se añadirían durante el moldeo

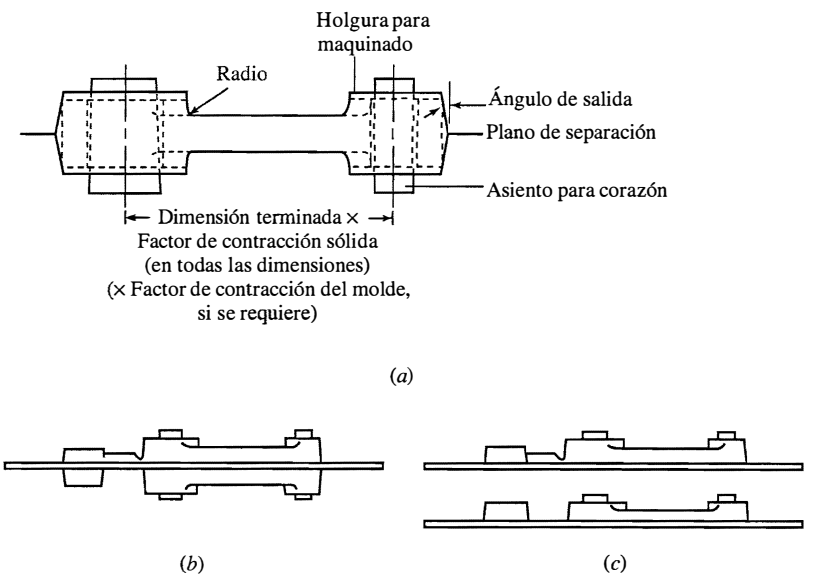


Figura 7-18 Un modelo debe permitir tener en cuenta (*a*) la contracción sólida y la fácil remoción del molde. Para una producción rápida, se sujeta a (*b*) una placa de acoplo o (*c*) a semiplacas superior e inferior.

(*moldeo de patrón suelto*). Esto ocasiona que el moldeo sea lento y que requiera mucha mano de obra. Para una mayor productividad, los elementos del sistema de alimentación se incorporan al modelo, divididos a lo largo del plano de separación, de preferencia con el canal de alimentación en la base (semimolde inferior) y las compuertas internas en la tapa (semimolde superior). De esta forma, el canal de alimentación se llena antes de admitir metal en la cavidad. Las mitades se montan ya sea en las dos superficies de la misma placa (*placa de moldeo*, Fig 7-18*b*) o en placas separadas (*mitad de la tapa superior* y *mitad de la base*, Fig. 7-18*c*). Las velocidades de producción se incrementan aún más si se moldean y funden varias piezas simultáneamente en el mismo molde; para ello se preparan *placas de modelos de piezas múltiples*.

Las partes grandes de configuración relativamente sencilla a menudo se moldean a mano, usando modelos de esqueletos o, si la parte es de simetría rotacional, girando una tabla con la sección transversal (un *modelo de barrido*) en la arena.

El refractario debe ser contenido alrededor del modelo, y tradicionalmente al recipiente se le llama *caja de moldeo*. Cuando se realiza una división en dos partes para acomodar las mitades superior e inferior del modelo, se habla de *base* y *tapa*, respectivamente. Los moldes muy grandes se pueden formar en un pozo en el suelo.

Los corazones, al igual que el molde, se fabrican de materiales refractarios. Sin embargo, su resistencia de enlace debe ser mayor para permitir su manejo, pero también deben ser removibles después de la solidificación. Se moldean en *cajas de corazones* hechas de madera o metal. Los corazones se pueden fabricar en mitades (o en varias partes) y luego pegarse. Como con frecuencia los corazones están casi completamente rodeados por la fusión, se deben ventilar al exterior.

Arenas De todos los materiales refractarios, la arena sílica (SiO_2) es la de menor costo y, si su calidad (composición y contaminantes) se controla cuidadosamente, es adecuada para temperaturas de fundición muy elevadas, incluida la del acero. Otros refractarios como el zirconio ($ZrSiO_4$), el silicato de aluminio (Al_2SiO_5), la cromita ($FeCr_2O_4$) o la olivina ($(MgFe)_2SiO_4$) se usan para propósitos especiales. La arena en sí misma fluye libremente, por lo que es preciso aglutinarla temporalmente. El *aglutinante* debe ser lo suficientemente fuerte como para soportar la presión y la erosión originadas por la fusión, aunque debe ser debilitado por el calor de ésta para permitir la contracción del material y, finalmente, la remoción de la arena sin causar daño a la pieza sólida. Sin embargo, el aglutinante no debe destruir la permeabilidad de la arena, de manera que los gases —presentes en la fusión o producidos por el calor de la fusión en el aglutinante mismo— puedan escapar. La calidad de la arena se ensaya rutinariamente en el laboratorio para determinar sus propiedades tales como el tamaño del grano, la resistencia a la compresión, al cortante y a la tensión; la dureza, la permeabilidad y la compactabilidad (la disminución de la altura de una columna bajo una carga específica). El costo se reduce y se minimizan los desperdicios al recuperar la arena usada por medio del lavado, del refregado en seco, o —para aglutinantes orgánicos— del calentamiento. Un caso especial es el *grafito*, el cual se emplea para metales (Ti, Zr, metales refractarios) que reaccionan con el sílice.

Aglutinantes Los procesos a menudo se describen de acuerdo con el tipo de agente adhesivo (*aglutinante*):

1. Los *moldes de arena verde* son los más baratos porque se aglutinan con arcilla. Ésta es un aluminosilicato hidratado con una estructura en capas (Secc. 12-3-1). Es muy fuerte, pero frágil en el estado seco. Se hace fácilmente deformable cuando se le añade agua, la cual se adsorbe sobre las laminillas de la arcilla y permite el movimiento relativo de una con otra. Algunas arenas contienen el poco porcentaje de arcilla requerido, pero se obtienen calidades superiores cuando se añade una arcilla de calidad (por ejemplo entre 6 y 8% de bentonita) a la arena pura de cuarzo. Con 2 o 3% de agua y buen mezclado (*amasado*), se logra una mezcla de arena fácilmente transportable y moldeable. Cuando permanece en estado húmedo se habla de un molde de arena verde. Una gran ventaja es que la arena usada se recupera fácilmente.

2. La arena aglutinada con arcilla puede estar parcialmente seca alrededor de la cavidad para mejorar la calidad superficial de la fundición y reducir los defectos de agujeros de alfiler que se pueden desarrollar como resultado de la generación de vapor (*molde de arena de capa seca*). También se puede secar todo el molde, pero esos *moldes de arena seca* han sido reemplazados en gran parte por moldes que no requieren horneado (véase más adelante).

3. Los *aglutinantes de silicatos* se producen por medio de varias técnicas. El *proceso del* CO_2 la arena se mezcla con entre 3 y 5% de vidrio soluble ($Na_2O \cdot xSiO_2 + nH_2O$), un líquido. Al completar el moldeo, se hace burbujear el CO_2 para formar los productos de la reacción Na_2CO_3 y una gel de una composición de $xSiO_2 \cdot nH_2O$. Esto resulta en un molde de arena más firme con menor movimiento de sus paredes y, por lo tanto, se pueden realizar fundiciones más grandes y exactas. En otro proceso se utilizan silicatos etílicos hidrolizados.

4. En el *aglutinante de fosfato* se emplea un fosfato soluble en agua con un endurecedor de óxido metálico pulverizado para producir un aglutinante ambientalmente favorable.

5. El *moldeo en cemento* depende de la hidratación del cemento para formar un gel de gran resistencia. Se usa entre 10 y 15% de cemento como aglutinante, particularmente para grandes fundiciones de acero moldeadas en un pozo. Es difícil separar la arena de la fundición terminada.

6. Las *arenas aceitosas* consisten en arena mezclada con un aceite vegetal de tipo secante (como el aceite de linaza) y un poco de harina de cereal. Estos aceites son hidrocarbonos insaturados (con enlaces dobles y/o triples en la cadena del carbono) y forman un polímero al calentarse a temperaturas alrededor de 230°C. El proceso es rápido y proporciona alta resistencia, por lo que también es adecuado para los corazones.

7. Las *arenas aglutinadas con resina* se forman con resinas termofijas (polímeros, Secc. 13-3). Los *aglutinantes que no requieren horneado* son resinas termofijas, que curan al combinarse dos o más componentes y un catalizador. En los *procesos de caja fría* se emplea la catálisis por elementos portados por el aire. Las resinas líquidas con catalizador se utilizan en los procesos de *caja tibia* (más de 150°C) y de *caja caliente* (más de 230°C). Las resinas originalmente desarrolladas para los corazones fuertes de una sola pieza se usan cada vez más para el moldeo.

8. El *moldeo al vacío* depende de la observación de que la arena se incrusta firmemente al remover el aire. Los modelos tienen pequeños agujeros, de manera que una lámina delgada y caliente, de polímero termoplástico, puede ser ajustada sobre su superficie por medio del vacío. Entonces se aplica arena limpia sin aglutinar en una caja de moldeo; se sella la superficie y el vacío se succiona en la arena. Ahora el vacío se libera en el modelo, éste se retira, el molde se ensambla y el metal se vacía. La lámina de polímero se quema y, una vez que la fundición solidifica, el vacío se libera y la arena suelta cae.

Compactación La arena aglutinada se compacta por medio de varias técnicas, elegidas de acuerdo con las velocidades de producción y el número de partes producidas.

1. Para algunas partes, la arena se puede depositar con una pala en la caja de moldeo, alrededor de un modelo de una sola pieza, y es apisonada a mano. Se requiere de gran habilidad para producir un molde de compactación uniforme.

2. Para la producción en masa, la arena se transporta a la estación de moldeo y se deja caer o se sopla en los modelos rodeados por cajas de moldeo, donde se compacta por medios mecánicos, como sacudidas o presión. Una secuencia típica de las operaciones de moldeo se da en la figura 7-19.

3. Se pueden obtener densidades altas por medio de la compactación dinámica. La arena es arrojada por un propulsor de rotación rápida, o la caja de moldeo se evacua y entonces se abre una gran válvula a través de la cual la arena es introducida. También se obtienen buenos resultados con la onda de presión que causa la detonación de gas natural arriba de la caja de moldeo.

4. Cuando las presiones son suficientemente altas (alrededor de 7 MPa), una arena apropiadamente aglutinada adquiere la resistencia suficiente para mantener la integridad del molde sin una caja de moldeo de soporte (*moldeo sin caja*). Los moldes con los planos de separación orientados verticalmente se apilan extremo con extremo; la producción puede alcanzar de 250 a 750 moldes/h en una sola línea de producción. La alta resistencia de los moldes también minimiza el movimiento de las paredes durante el vaciado y la solidificación, y da fundiciones de mayor exactitud.

En todas ellas, excepto en el moldeo sin caja, se deben colocar pesos en la tapa superior; de otra forma, la presión hidrostática ejercida por la fusión levantaría la tapa y se presentarían fugas.

Se acostumbra usar arena más fina en la cercanía de la superficie del molde. Se pueden añadir materiales de recubrimiento (carbón o grafito) para generar gases en contacto con el metal caliente, reduciendo la penetración del metal y la adhesión con la arena (quemado de la arena); así se obtiene un mejor acabado superficial, libre de defectos. Alternativamente, se pueden suspender varios materiales refractarios en un líquido y aplicarlos como recubrimiento para las superficies del molde y del corazón.

Los corazones incrementan en gran medida la variedad de las formas que se pueden fundir. Si su peso no se puede soportar, los corazones se colocan en *sujetadores* (pequeños soportes de metal, a menudo perforados, que se derriten dentro de la aleación de fundición).

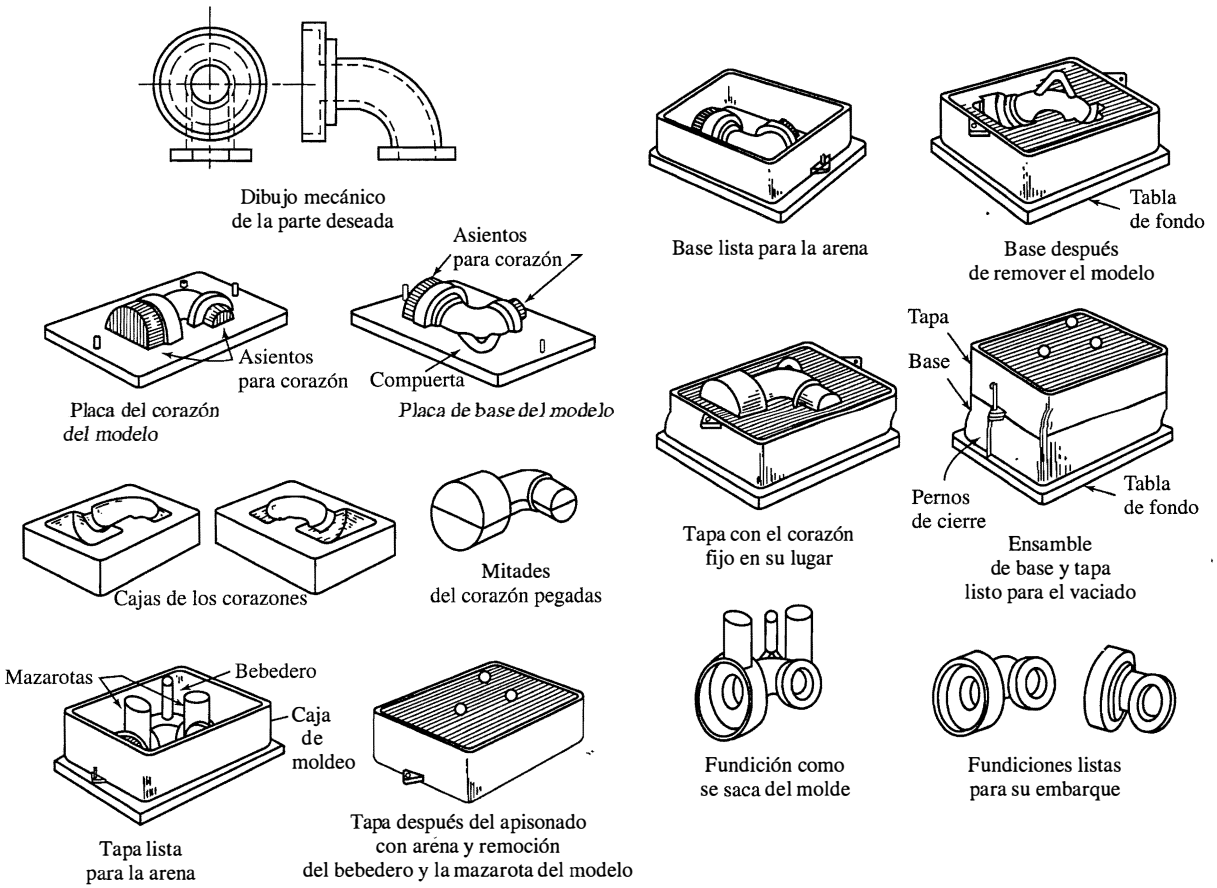


Figura 7-19 Una secuencia común de moldeo en arena. (*De Steel Castings Handbook, 5a. ed., Steel Founder's Society of America, Des Plaines, Illinois, 1980. Con permiso.*)

Moldeo en cáscara Ésta es una variante de la técnica de arena aglutinada con resina. La arena se recubre con una resina termofija sólida (etapa B, Secc. 13-3). Después de recubrirlo con un agente de separación, el molde, calentado de 200 a 260°C, se coloca en la parte superior de una caja que contiene la arena (Fig. 7-20). Al invertir la caja, la arena se deposita en el modelo y una cáscara delgada se cura en el sitio, reproduciendo con exactitud los detalles del modelo. Una vez que la cáscara es lo suficiente gruesa, la caja se voltea de nuevo, después de lo cual la arena en exceso, sin aglutinar, cae de nuevo a la caja. La cáscara se remueve, se combina con la otra mitad —colocada en una caja de moldeo—, y se apoya con algún material inerte, como los gránulos fríos del acero, para proporcionar soporte. La mayor resistencia del molde con frecuencia permite la formación integral de corazones con el molde. Los corazones separados se fabrican soplando arena hacia los moldes calientes; como los corazones son huecos, proporcionan una buena ventilación. Comparado con el fundido en arena verde, el acabado

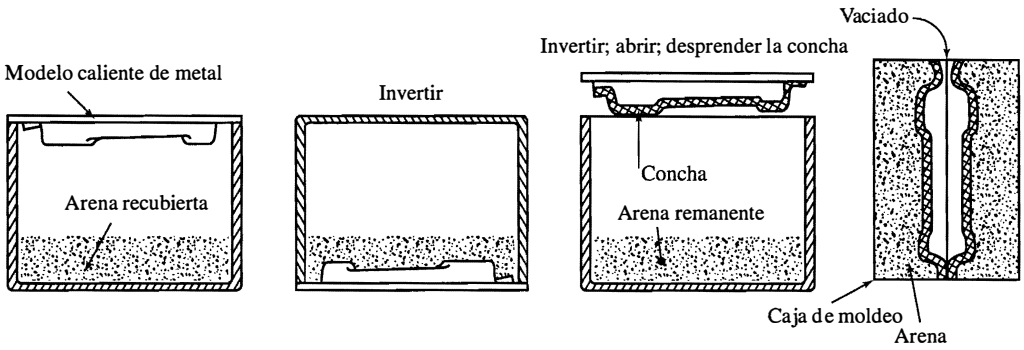


Figura 7-20 Secuencia típica del moldeo en concha.

superficial y las tolerancias de las partes son mejores, se reducen el espacio del piso y la cantidad de arena en circulación, pero el reciclado de la arena es más costoso.

Se pueden lograr paredes más delgadas sumergiendo parcialmente el molde aglutinado con resina en una aleación fundida mantenida en un horno separado, y llenando la cavidad mediante la extracción al vacío (*fundición al vacío*, Fig. 7-21*a*). La producción es casi del 100% porque el llenado se lleva a cabo a través de una "compuerta de alfiler", la cual a menudo alimenta a una mazarota. Se pueden fabricar partes de alta integridad estructural de cualquier metal para las industrias aeroespacial, automotriz y química. En forma alterna, el molde se alimenta desde el fondo por medio de una fusión presurizada (Fig. 7-21*b*).

Moldeo con lechada En vez de compactar la arena con fuerza, se puede hacer un refractario de granos más finos en una *lechada* con agua, el cual se vacía alrededor del modelo. Se obtiene una superficie más lisa y, si así se elige, el refractario puede ser más resistente al calor que la variedad de arena aglutinada. Puesto que la contracción del molde y de la fundición se pueden controlar estrechamente, a menudo se denomina fundición de precisión.

El *moldeo en yeso* depende de la bien conocida capacidad de una pasta de yeso para fluir alrededor de todos los detalles de un modelo. Se añaden varios rellenos inorgánicos para mejorar la resistencia y la permeabilidad. Después de una secuencia compleja de horneado, el molde se ensambla y se vacía el metal. En las versiones patentadas se usan el tratamiento por presión del vapor o por agentes espumantes para crear una porosidad subsuperficial controlada, y así incrementar la permeabilidad. Puesto que el yeso se destruye a 1 200°C, el moldeo en yeso no es adecuado para fundiciones ferrosas. Para otros metales, el moldeo en yeso produce partes de forma casi perfecta con muy buen acabado superficial y buenas tolerancias.

La *fundición en molde cerámico* es adecuada para todos los materiales, puesto que ahora la lechada se prepara con polvos refractarios selectos, como el zirconio ($ZrSiO_4$), la alúmina (Al_2O_3), o la sílice fundida (SiO_2), con varios agentes aglutinantes patentados. La lechada cerámica de grano fino se aplica como un recubrimiento delgado al molde y se complementa con arcilla para horneado de bajo costo (*proceso Shaw*) o con

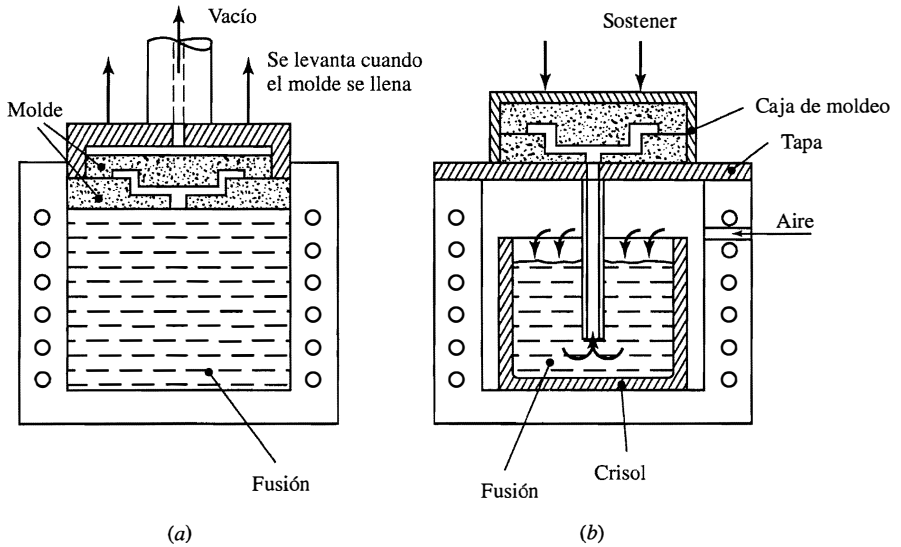


Figura 7-21 El llenado excelente del molde se asegura por (*a*) fundición al vacío y (*b*) fundición a presión.

un agregado de arena gruesa (proceso *Unicast*). El molde se hornea a 1 000°C y la fusión se vacía mientras que éste aún está caliente. La precisión se asegura tomando en cuenta los cambios dimensionales en cada etapa de la fabricación del molde y de la fundición, con frecuencia con CAD/CAM. El costo elevado está bien justificado por la calidad de las fundiciones en metales altamente aleados de puntos de fusión elevados. Las partes de construcción grandes, así como las matrices de forja y fundición, se funden con la forma y las dimensiones finales, frecuentemente sin la necesidad de acabados superficiales subsecuentes.

7-5-5 Fundición en molde desechable, modelo desechable

Un *modelo desechable* se debe fabricar en un material que se pueda derretir antes del vaciado o que se pueda quemar durante la fundición. De esta forma, el modelo se puede dejar en el molde sin necesidad de planos de separación, de ángulos de retiro o incluso de corazones. Las limitaciones de forma son pocas, y el único criterio es que el refractario se pueda sacar sacudiéndolo, o removido de otra forma de todas las cavidades y detalles intrincados de la fundición terminada (algunas veces el refractario se deja en las cavidades de las esculturas).

Los modelos desechables se fabrican inyectando el material para el modelo en la cavidad de un molde patrón. Es un requisito que el modelo sea extraído del molde patrón; sin embargo, las formas más complejas se producen fácilmente ensamblando el modelo a partir de varias formas más sencillas. Los pasajes internos, complejos y pequeños, se pueden formar colocando corazones cerámicos (usualmente de sílice fundi-

da) en el modelo. En algunos casos, un molde de caucho (comúnmente caucho de silicio) permite el desmantelamiento del molde de formas entrantes. Se debe tomar en cuenta la contracción del material del modelo, y proporcionar un retiro si la cavidad en el molde del modelo es profunda.

Fundición por revestimiento También llamada *proceso por cera perdida*, ya se usaba en el Antiguo Egipto y en China (tabla 1-1), pero la gran difusión en su aplicación industrial fue a partir de la Segunda Guerra Mundial, con la necesidad para producir partes de precisión para motores de reacción con materiales a temperatura elevada. Con este proceso se producen las formas más complejas, porque el modelo se fabrica con una mezcla cuidadosa de cera (o, para secciones delgadas, un plástico como el poliestireno) incluyendo el sistema de alimentación, y la pasta refractaria se vacía alrededor de ella.

Los modelos de cera se producen fácilmente en grandes cantidades mediante el moldeo por inyección en matrices metálicas, hechas comúnmente de aleaciones de aluminio altamente maquinables. Los corazones cerámicos se pueden incorporar, como para hacer pasajes internos complejos en álabes de turbinas (Fig. 7-16*d*). Los modelos individuales se ensamblan con los bebederos de cera, los canales de alimentación y las compuertas, lo que se denomina árbol, simplemente mediante la fusión local de la cera, usando un cuchillo u hoja caliente entre las dos superficies de acoplamiento. Entonces, dos aproximaciones resultan prácticas:

1. En el *revestimiento sólido*, el árbol se recubre con anterioridad a través de la inmersión en una lechada refractaria, se espolvorea con arena refractaria, y se coloca en una caja de moldeo, donde se vacía una lechada más espesa alrededor de él. Cuando la lechada se convierte en gel retirando el exceso de agua, el molde se seca en un horno en posición invertida para permitir que la cera escurra. Antes de la fundición, el molde se hornea a entre 700 y 1 000°C, lo cual lo provee de resistencia, elimina el peligro de la formación de gas por el agua durante la fundición, incrementa la fluidez de la fusión que se va a vaciar, y asegura un buen acabado superficial así como buenas tolerancias dimensionales.

2. El costo del molde se puede reducir y la velocidad de producción incrementar prescindiendo del molde sólido. En el *proceso cerámico de moldeo en concha* (Fig. 7-22) el árbol se prepara como antes, pero luego se cubre con un refractario en un *lecho fluidizado*. (Cuando se sopla aire desde el fondo de un recipiente parcialmente lleno con polvo, éste se suspende en el aire y fluye como un fluido.) Se aplican varias capas de recubrimientos, los cuales gradualmente se hacen más gruesos para alcanzar el espesor suficiente. Esta operación repetitiva se le puede confiar a un robot. El molde de concha se seca y hornea, si es necesario es soportado por un material granular, y el metal se vacía.

Ejemplo 7-5

La fundición por revestimiento ofrece una libertad excepcional en la complejidad de las formas, aun para los materiales de temperatura elevada en componentes críticos de gran tamaño. Un adaptador de la transmisión para la aeronave Bell-Boeing V-11 Osprey, de despegue y aterrizaje vertical y en distancias cortas (VSTOL), consistía de 43 piezas forjadas y de lámina metálica, y

de 536 sujetadores. Fue reemplazado por tres piezas de fundición por revestimiento de una aleación de Ti-6Al-4V, sometidas a prensado isostático a temperatura elevada (Secc. 7-6-2) y tratadas térmicamente, y por 32 sujetadores. Las fundiciones se desarrollaron con la ayuda del modelado por computadora, de la ingeniería concurrente y de prototipos rápidos. Los costos del maquinado se redujeron en 60%, y el costo total de las piezas a la mitad. [Datos tomados de B.C. Goodley y otros, *Adv. Mater. Proc.* 1997(6): 43-46.]

Se obtienen mejoras importantes con el vaciado al vacío. El molde se coloca sobre la fusión (con una boquilla entrando en ella); entonces se hace vacío en el molde, de manera que la fusión se eleva suavemente para llenar la cavidad (similar a la Fig. 7-21*a*). El bebedero y el canal de alimentación se hacen suficientemente grandes para prevenir la solidificación en ellos, y se permite que el líquido fluya de regreso a la fusión. El rendimiento se eleva entre 85 y 95%.

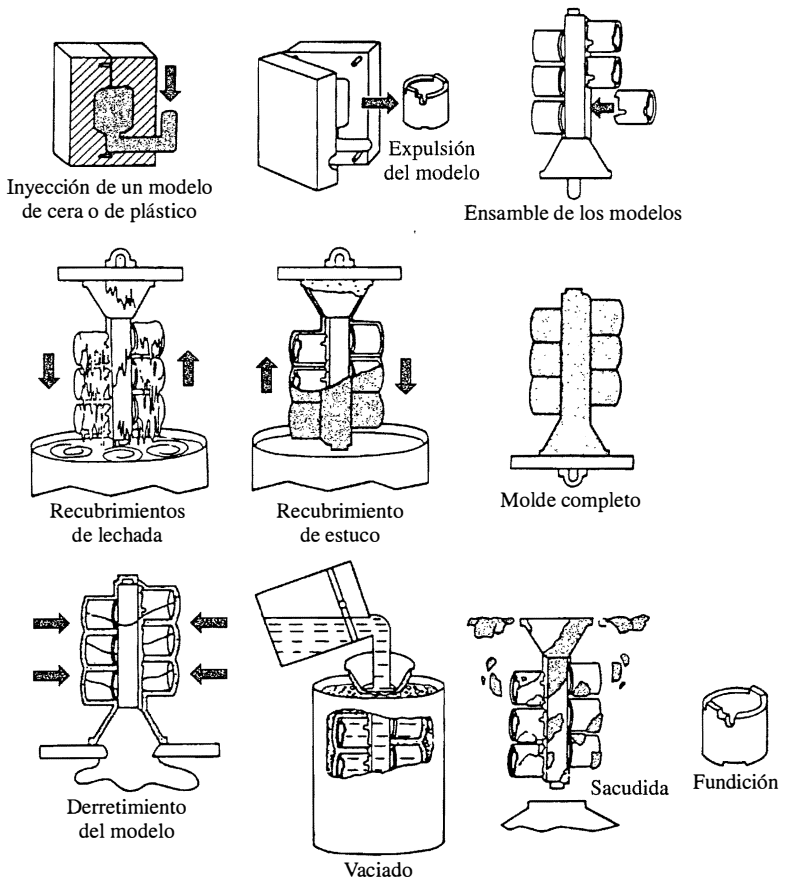


Figura 7-22 Secuencia típica del moldeo cerámico en concha (*Cortesía de Investment Shell Casting Institute, Dallas, Texas.*)

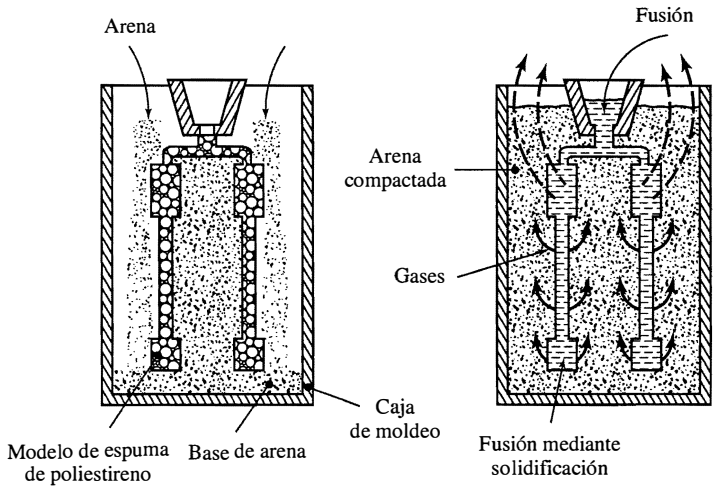


Figura 7-23 Las partes de forma compleja se pueden hacer mediante el proceso de la espuma perdida.

Fundición por espuma perdida En una variante interesante de la fundición en arena, se utiliza un molde desechable con un modelo desechable hecho de espuma de poliestireno expandido, similar a la empleada en los vasos para bebidas calientes, pero de densidad y calidad superficial cuidadosamente controladas. Se pueden construir formas muy complejas, y es factible colocar los bebederos y demás sistemas con resinas de fusión o cemento de caucho. El proceso, llamado *fundición evaporativa*, también permite una gran libertad en las formas, sin ángulo de retiro, porque el modelo se deja en el molde para que se evapore y queme durante la fundición (Fig. 7-23). La espuma plástica primero se recubre con una lechada de refractario permeable. La espuma es firme pero se dañaría por presiones de compactación elevadas; por lo tanto, se respalda con arena seca compactada por vibración y apisonada durante el vaciado. Alternativamente, pueden emplearse postas de acero sujetas por un campo magnético (*moldeo magnético*).

Ejemplo 7-6

La Saturn Corporation vacía sus bloques de motor de aluminio en sus instalaciones. El moldeo por espuma perdida permite fundir formas más complejas, así que las partes como las monturas del alternador y del filtro de aceite se pueden integrar al bloque del motor, ahorrando material y tiempo de maquinado. [*Fuente*: *Manufacturing Engineering*, 1993(5): 53.]

7-5-6 Fundición en molde permanente

Mientras que en los procesos descritos arriba el molde se destruía después de la solidificación de la fundición, en los procesos con molde permanente éste se reutiliza repetidamente.

Materiales para el molde El material del molde debe tener un punto de fusión suficientemente elevado como para soportar la erosión por el metal líquido a las temperaturas de vaciado, la fuerza necesaria para no deformarse por el uso repetido, y una resistencia elevada a la fatiga térmica para evitar el cuarteamiento prematuro (la formación de grietas por fatiga térmica) que dejaría marcas inaceptables en la fundición terminada. Finalmente, y de manera ideal, también tendría una baja adhesión (Secc. 4-9-2) con la fusión, para prevenir la soldadura de la pieza con el molde.

El material del molde puede ser hierro fundido, aunque los aceros aleados son los más ampliamente usados. Para la fundición de aleaciones de alto punto de fusión (latones y materiales ferrosos), el acero del molde debe contener grandes proporciones de carburos estables, de manera que se retenga la resistencia a temperaturas elevadas. Las aleaciones de metal refractario, particularmente la aleación de molibdeno endurecible por precipitación TZM (0.015C-0.5Ti-0.08Zr), tienen cada vez más aplicaciones. Los moldes de grafito se pueden usar para el acero aunque sólo en formas relativamente sencillas.

Los *recubrimientos* o aprestos se eligen de acuerdo con la temperatura de fundición. El grafito, el MoS_2, el silicón y otras películas (*compuestos de separación*) reducen la adhesión y facilitan la expulsión. Algunas veces los recubrimientos refractarios se acumulan hasta formar capas gruesas que reducen las fluctuaciones de temperatura en la superficie del molde. La aplicación uniforme es muy importante, y los robots programables son muy adecuados para esta tarea repetitiva.

Diseño de la matriz Todos los moldes permanentes (matrices) tienen algunas características comunes:

1. Un requisito esencial es que la fundición solidificada se pueda retirar fácilmente de la cavidad de la matriz. Por lo tanto, las formas que se pueden producir son más limitadas que en la fundición en molde desechable, aunque se logra una gran complejidad cuando el molde se fabrica en varias partes (por ejemplo, las carcasas de las máquinas de oficina, máquinas de coser, motosierras, etc.).

2. Las cavidades internas se forman con la ayuda de *corazones metálicos* fijos o móviles. Las formas sesgadas requieren que los corazones se fabriquen en varias partes entrelazadas, las cuales se retiran en una secuencia fija. En la fundición con alimentación por gravedad o con baja presión, se pueden insertar corazones de arena, yeso o grafito en el molde permanente (*moldes semipermanentes*).

Ejemplo 7-7

La fundición en moldes semipermanentes tiene un amplio rango de aplicaciones. Una sola fundición de una aleación de aluminio 357.0 (Si-0.5Mg-0.2Ti) reemplazó a un ensamble metálico de 17 piezas de polímero/lámina en el marco de soporte de un depósito de almacenamiento de la aeronave Boeing 777. El espesor de la pared es únicamente de 2.5 mm. [*Fuente*: *Adv. Mater. Proc.*, 1994(3): 8.]

3. Nichos en la matriz permiten la localización exacta de *insertos* (insertos roscados, elementos de calentamiento, etc.).

4. Los *pernos de expulsión* son necesarios para retirar la fundición solidificada, particularmente si el proceso es mecanizado. El número y la localización de los pernos de expulsión se deben elegir para evitar marcas superficiales inaceptables o la distorsión de la fundición. La expulsión temprana es importante si la fundición puede contraerse sobre protuberancias, pero se debe permitir el tiempo suficiente para la solidificación.

5. El material del molde no es permeable; por lo tanto, hay que proporcionar *respiraderos* para evitar atrapar gases. Las holguras a lo largo de los planos de separación y alrededor de los pernos de expulsión también pueden servir como respiraderos.

Solidificación El molde permanente funciona como un intercambiador de calor. Al inicio de la corrida de producción, el molde se debe precalentar a la temperatura deseada (comúnmente entre 150 y 200°C para el Zn, de 250 a 275°C para el Mg, entre 225 y 300°C para el Al, y de 300 a 700°C para las aleaciones de cobre). Durante la producción de estado estable, el calor liberado por la solidificación se elimina por medio de aletas o pernos de radiación, o por canales internos de enfriamiento por agua. La evaporación de agua de los recubrimientos del molde, antes de cerrarlo, también enfría su cara.

Un control preciso de las temperaturas de la matriz y la composición y aplicación del apresto del molde permiten la fundición de paredes más delgadas, aunque con una solidificación más lenta y un ciclo de fundición prolongado (Fig. 7-7). No obstante, las velocidades de solidificación son mucho más altas que en los moldes refractarios; por lo tanto, las velocidades de producción son altas y el tamaño de grano, pequeño. Sin embargo, el abastecimiento de la fusión a las secciones más gruesas de la fundición se puede cortar prematuramente. De esta forma, es imperativo que se proporcione una alimentación adecuada; incluso así, la porosidad puede ser y es más alta que en fundiciones similares hechas en moldes desechables. El molde permanente siempre es más resistente que la fundición solidificante, por lo tanto, se evitan las aleaciones fundidas propensas a la fragilidad en caliente (aquellas con un amplio rango de congelación o que contienen una matriz de fusión baja). Existe un número de variantes de la fundición en molde permanente, que se distinguen por el método y la presión de alimentación.

Fundición en molde permanente alimentada por gravedad Usualmente, a este proceso se le denomina simplemente *fundición en molde permanente* o *fundición en matriz por gravedad.* Se basa en el mismo principio que la fundición en molde desechable, excepto que el molde se fabrica con un material permanente adecuado. La máquina de fundición es básicamente una cama que soporta las mitades estacionaria y móvil del molde, las cuales pueden ser abatibles como las páginas de un libro (*molde de libro*). Las máquinas operadas manualmente están equipadas con un mango largo y mordazas; las máquinas mecanizadas tienen servomotores hidráulicos (Fig. 7-24). En conjunto con corazones metálicos divididos o de corazones colapsables de arena, el proceso es muy versátil.

El proceso se usa ampliamente en las aleaciones de aluminio (por ejemplo, decenas de millones de émbolos para motores de combustión interna se funden en moldes con corazones móviles de cinco piezas), así como en las aleaciones de magnesio y cobre. También se pueden hacer fundiciones más pequeñas de hierro fundido y acero. El molde se protege con un recubrimiento de tipo lubricante para las aleaciones de magnesio y

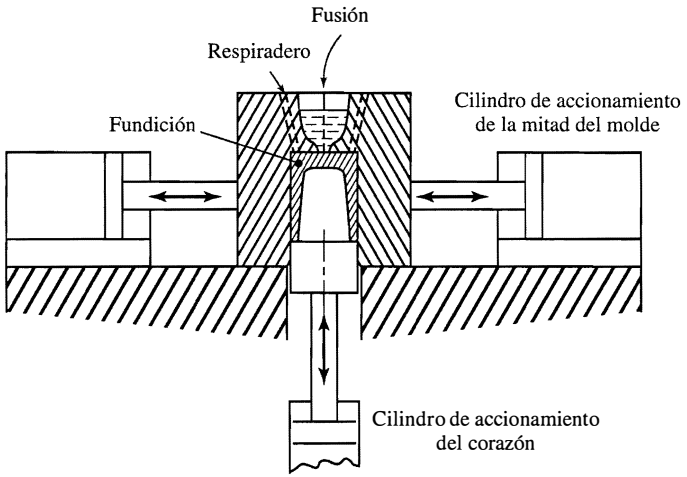


Figura 7-24 Esquema de un molde permanente llenado por gravedad (no se muestra el marco de la prensa).

aluminio, y con recubrimientos cerámicos de hasta 1 mm de espesor para las aleaciones con base de cobre y de hierro gris.

La *fundición hueca* es una variante de la de molde permanente, usada principalmente para productos decorativos no estructurales, como las bases huecas de las lámparas, candeleros y estatuillas. El molde se llena con la fusión y, después de un tiempo corto, se invierte para drenar la mayor parte de la fusión, dejando atrás una pieza hueca con una buena superficie exterior, pero rugosa en el interior.

Fundición en molde permanente a baja presión El molde se coloca exactamente arriba del horno de fusión o de contención, y el metal se alimenta por aire bajo presión a través de la compuerta inferior de vaciado hacia la cavidad del molde (como en la Fig. 7-21*b*), asegurando un llenado suave. La solidificación se dirige desde arriba hacia abajo. La presión del aire se libera tan pronto como la cavidad se llena con metal líquido; de esta forma se minimizan las pérdidas de material. Los recubrimientos delgados aseguran una calidad superficial aceptable. Las mitades de la matriz se deben mantener unidas con suficiente fuerza para resistir la generada por la presión del fluido en la cavidad. En una variante del proceso, se asegura un llenado aún más uniforme haciendo vacío en el molde. La aplicación más amplia es en las aleaciones de aluminio, pero una variante con moldes de grafito es adecuada para fundir partes de acero más grandes, como las ruedas de los vagones del ferrocarril.

Fundición en matrices El término se refiere a los procesos en los cuales la cavidad del molde se llena bajo presiones desde moderadas hasta elevadas, forzando el metal hacia los detalles intricados de la cavidad. Las mitades de la matriz se mantienen unidas por medio de una fuerza proporcionalmente elevada; por lo tanto, las máquinas de fundición en matrices se parecen a las prensas hidráulicas con construcción de dos, tres o

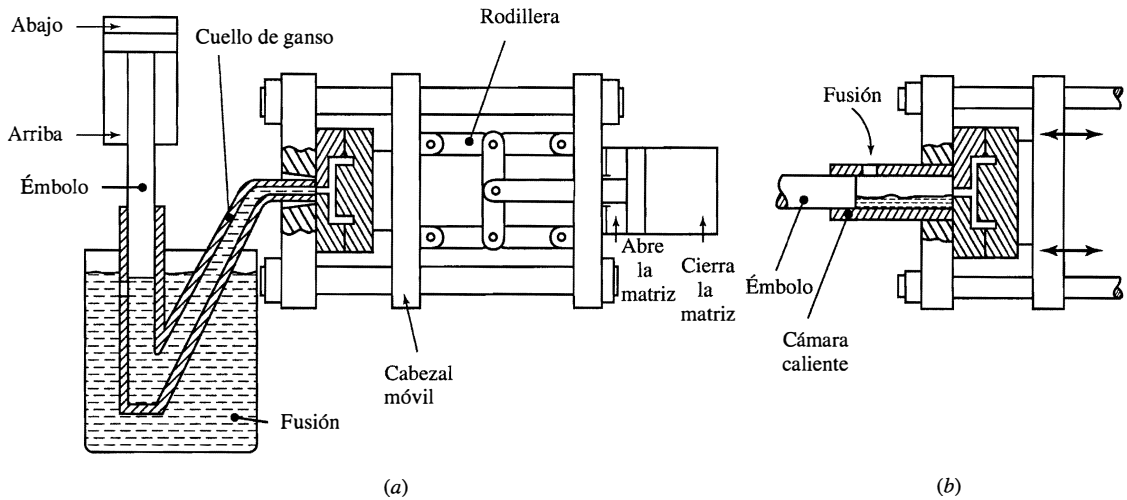


Figura 7-25 Se aplican presiones elevadas a la fundición en matriz por: (*a*) cámara caliente y (*b*) cámara fría. La matriz se abre y se cierra por medio de un mecanismo de rodillera. Los respiraderos y los expulsores no se muestran.

cuatro columnas, clasificadas por la fuerza de cerrado de la matriz (de hasta 40 MN o 4 000 ton fuerza de capacidad). Para una mayor rigidez, comúnmente se cierran las matrices con mordazas acodadas mientras que la fusión se fuerza hacia la matriz —lentamente al principio y luego a velocidades cada vez mayores— por medio de un émbolo separado. Los tamaños de las coladas varían desde pocos gramos hasta decenas de kilogramos, y velocidades de producción de hasta 1 000 coladas/h pueden alcanzarse en los tamaños pequeños. Existen dos variantes básicas del proceso:

1. En el *proceso de cámara caliente* el metal líquido se transfiere al molde directamente del caldero de contención, por medio de una bomba sumergida (de émbolo y cilindro, Fig. 7-25*a*) a presiones de hasta 40 MPa. La turbulencia es mínima, se evita la oxidación y no se pierde calor. De esta forma se pueden hacer fundiciones de complejidad considerable, como las cajas de instrumentos y componentes automotrices. Sin embargo, la bomba es expuesta a condiciones severas. Para las aleaciones de zinc y magnesio, las bombas se construyen de acero, pero aún existen problemas con la durabilidad de las bombas cerámicas necesarias para las aleaciones de aluminio.

En una variante del proceso, la *inyección directa* de aleaciones Zn se realiza a través de un múltiple caliente y de miniboquillas (como en el moldeo por inyección de plásticos, Secc. 14-3-3), de manera que se eliminan los sistemas de vaciado y de alimentación y se incrementa el rendimiento.

2. En el *proceso de la cámara fría* se usan instalaciones separadas de fusión. La fusión de una cantidad suficiente para una colada se transfiere de manera individual, con frecuencia automáticamente, al cilindro (*cámara de colado*), del cual el émbolo la inyecta hacia la cavidad de la matriz (Fig. 7-25*b*) a presiones de hasta 150 MPa. El émbolo sólo se somete brevemente a temperaturas altas; por lo tanto, se pueden tratar

metales con temperatura de fusión más elevada. El proceso fue establecido desde hace mucho tiempo para aleaciones de zinc, magnesio y aluminio (por ejemplo, para carcasas de transmisiones y de bombas, y para rotores del tipo jaula de ardilla), y ahora se emplea también para el latón. Ocasionalmente, el acero se funde en matrices hechas de aleación TZM.

Es esencial aplicar un lubricante de matriz a las superficies del molde entre cada colada. Comúnmente, el lubricante es grafito o MoS_2 con una base aceitosa, el cual luego se dispersa en agua. La evaporación del agua ayuda al enfriamiento.

Las tareas repetitivas de abrir y cerrar la matriz, retiro y enfriamiento de la fundición e inserción en una prensa de recorte pueden ser realizadas por robots. Algunas máquinas de fundición por matriz usan una torreta de posicionamiento para mover la pieza durante los pasos de recorte de rebaba y del maquinado menor.

El *control del proceso* es vital para el éxito. En el pasado, ésta era la tarea del operador de la máquina de fundición en matriz. Más recientemente, una mejor comprensión de la función de las variables del proceso ha conducido a una instrumentación extensa, de manera que las variables medidas se pueden alimentar a un microprocesador, el cual toma control posteriormente. Muchas variables tienen importancia: la temperatura de la fusión, el contenido disuelto de gas, la temperatura de la matriz y su distribución, la velocidad del émbolo y su variación durante la carrera, la presión de la cámara, la presión de la cavidad y la composición del gas. En una máquina con una capacidad dada, la presión ejercida baja a medida que se incrementa la velocidad de suministro del metal (velocidad de bombeo). Actualmente se sabe mucho acerca de las velocidades óptimas de bombeo y de las presiones necesarias para realizar buenas fundiciones de pared delgada. Los programas de computadora están disponibles para diseñar el sistema de vaciado para una velocidad óptima: la velocidad excesiva resultaría en la erosión del molde y en el atrapamiento de gas debido a turbulencia; el llenado demasiado lento, en partes incompletas (*llenado incompleto*) y *juntas frías*. (Las velocidades en las compuertas pueden alcanzar 40 m/s en la fundición de aleaciones de zinc.)

La mayoría de las aleaciones son soluciones sólidas, y aunque el patrón de solidificación (Fig. 7-8*b*) podría obstruir el flujo, las presiones son suficientemente elevadas para desgarrar las dendritas, y se pueden llenar cavidades intrincadas. Con un control adecuado, el espesor de la pared se puede reducir hasta el punto en que toda la sección transversal presente la estructura fina común de las superficies fundidas, incrementando de esta manera la resistencia del producto. Con la disminución del espesor de la pared, las deflexiones elásticas de la matriz y de la prensa se hacen importantes, y las fuerzas en cada columna de la prensa se miden y se equilibran.

La *porosidad* es un problema muy importante en las aleaciones de solución sólida, porque la solidificación es muy rápida para la alimentación adecuada de las secciones más pesadas, y regularmente el control tiene como objetivo la generación de una microporosidad distribuida. La otra fuente de porosidad es el gas atrapado durante la fundición. La dificultad yace en la necesidad de la expulsión rápida del aire desde la cavidad de la matriz, y en la presencia del aire mismo. Una solución se basa en la evacuación de la cavidad, la otra en la observación de que en algunas aleaciones los poros del gas sólo contienen nitrógeno. Si la cavidad se purga antes de la fundición con oxígeno puro, el gas reacciona con la fusión para formar partículas finamente dispersas de Al_2O_3. Este

proceso, llamado *fundición en matriz libre de poros*, origina mejores fundiciones, aunque aún es posible la porosidad de la solidificación o del atrapamiento del hidrógeno. En la *fundición a presión elevada* las presiones de inyección se mantienen en un nivel medio hasta que la fundición está casi solidificada; en este punto las presiones se incrementan hasta 150 MPa para consolidar el material todavía blando.

Procesamiento semisólido La microporosidad debida a la solidificación dendrítica se puede minimizar o eliminar, y refinar el tamaño del grano por medio de varios métodos:

1. *Fundición a presión o fundición forjado.* Una cantidad de fusión medida con anterioridad se carga en una matriz; se permite que se enfríe por debajo de la temperatura liquidus, y luego la matriz se cierra mientras se completa la solidificación. Usando matrices de forja comunes (como en la Fig. 9-19*b*), el proceso representa una transición entre la fundición en matriz y el forjado en caliente, y proporciona estructuras de grano altamente refinado y formas exactas o casi exactas de las piezas.

Ejemplo 7-8

La fundición a presión es altamente competitiva con otras fundiciones y procesos de forjado. La rótula de un volante hecha de una aleación de aluminio fundido a presión reemplazó a una fundición de hierro dúctil en los automóviles Ford Taurus y Mercury Sable, reduciendo el peso en 50%, y también los costos de maquinado. [Fuente: *Adv. Mater. Proc.*, 1997(6): 14.]

2. *Reofundición.* La fusión se somete a un esfuerzo cortante (por ejemplo, un rotor sumergido en la fusión o un campo electromagnético) durante la solidificación. En consecuencia, la estructura se modifica en gran medida por la disgregación de las dendritas, y el semisólido adquiere propiedades tixotrópicas. La masa parcialmente solidificada pero aún altamente fluida se puede inyectar en la matriz.

3. *Tixoformado.* Las palanquillas que se producen por la reofundición se recalientan en el estado blando y son forjadas (*forjado semisólido*). El espesor de la pared puede ser una fracción del presente en las fundiciones en matriz, de ahí que el proceso se use para rines y componentes para frenos automotrices de aluminio.

4. *Tixomoldeo.* Las bolitas o virutas de la aleación se cargan en un extrusor de tornillo (como en la Fig. 14-3, pero sin la placa rompedora ni malla), se calientan hasta el rango blando, reciben aplicación de un esfuerzo cortante para disgregar las dendritas y se moldean por inyección (principalmente para aleaciones de magnesio).

7-5-7 Fundición centrífuga

Cuando un molde se pone a girar durante el vaciado, la fusión es arrojada hacia afuera por la fuerza centrífuga con la presión suficiente para asegurar un mejor llenado de la

matriz. La solidificación progresa de la superficie exterior hacia adentro; de esta forma, la porosidad se reduce enormemente, y como las inclusiones tienden a una densidad más baja, se segregan hacia el centro (el que se maquina piezas con simetría axial de cualquier forma). El movimiento forzado obtenido al esforzar la fusión al cortante resulta en un refinamiento del grano. La centrifugación se puede aplicar a todos los procesos de fundición si el molde es suficientemente fuerte para soportar la rotación. Se acostumbra distinguir entre los varios procesos de acuerdo con la forma del molde.

1. En la *fundición centrífuga* se emplean moldes de simetría rotacional, esencialmente tubos, hechos de acero (protegidos con un recubrimiento refractario o incluso con un recubrimiento de arena verde o seca) o de grafito. La fusión se vacía mientras el molde gira, resultando en un producto hueco como un tubo o un anillo (Fig. 7-26*a*). Controlando las velocidades del flujo y moviendo el orificio de vaciado a lo largo del eje, se pueden fundir tubos grandes y largos de calidad y con espesor de pared muy uniformes. Si se desea, se puede variar el contorno externo de la fundición, mientras el interior permanece cilíndrico. La calidad superficial es buena en el exterior pero puede ser pobre en el interior.

2. La centrifugación se puede aplicar a todos los moldes desechables y permanentes. Cuando sólo se funde una pieza con simetría casi rotacional (por ejemplo, un volante con rayos y maza central), se aplica el término *fundición semicentrífuga* (Fig. 7-26*b*).

3. Cuando se colocan piezas con forma irregular alrededor de un bebedero central en una manera equilibrada (por ejemplo, por moldeo de revestimiento), es común el término *fundición centrifugada* (Fig. 7-26*c*). Las joyas se *funden por rotación* colocando el molde de revestimiento en el extremo de un brazo giratorio y el crisol, con el metal fundido, próximo a él. La fuerza centrífuga transfiere la fusión y asegura un buen llenado del molde.

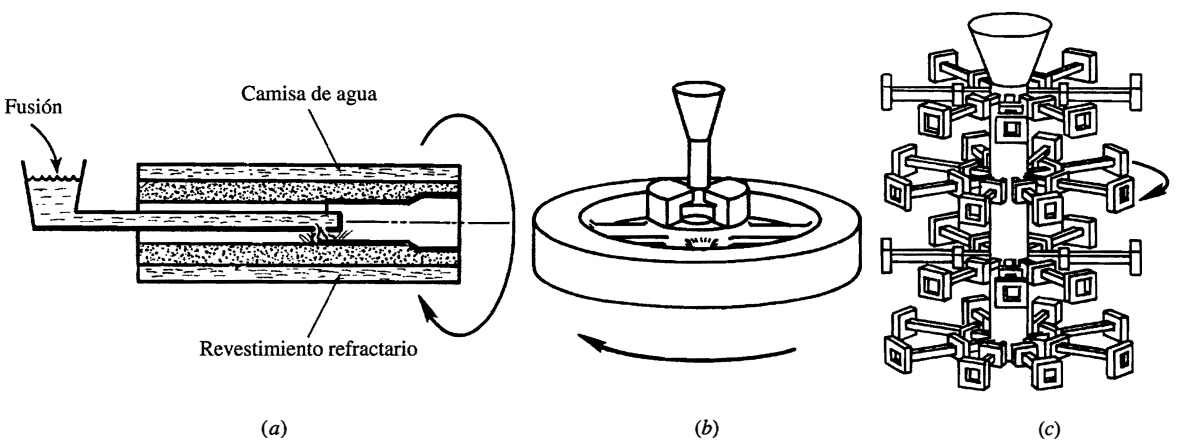


Figura 7-26 Se puede obtener un buen llenado y grano fino girando el molde en una fundición (*a*) centrífuga, (*b*) semicentrífuga, o (c) centrifugada. ((*b*) y (c) *G.E. Schmidt, Jr., Massachusetts Institute of Technology.*)

7-6 PROCESOS DE ACABADO

La fundición solidificada se debe someter a una variedad de operaciones auxiliares antes de que se pueda usar.

7-6-1 Limpieza y acabado

1. Cuando la fundición se realiza en moldes desechables, el primer paso es liberar la fundición del molde. Para arena verde y seca, el procedimiento más efectivo es el *sacudido*; luego la arena aglutinada con arcilla se recicla y, con adiciones adecuadas, se vuelve a usar. Ésta es una de las razones de la sobrevivencia de la fundición en arena como el proceso dominante para fabricar piezas grandes, incluso en producción en masa. Con otros materiales de moldeo, la recuperación del material del molde es un asunto de economía, pues a menudo requiere equipo o procesos especiales.

2. Los corazones aglutinados con resina se remueven (eliminan) por medios mecánicos, como por carga pulsante, vibración de alta frecuencia o agua a presión elevada.

3. La arena residual se remueve por medio de granallado (*granallado sin aire*). Las partículas redondas (*perdigones*) se arrojan contra la superficie de la fundición por medio de una rueda de paletas de rotación rápida. Los perdigones se fabrican de acero, hierro maleable o hierro blanco para fundiciones más duras; y de acero dulce, bronce, cobre o vidrio para los materiales no ferrosos más suaves.

4. Las compuertas, los canales de alimentación, las mazarotas y el bebedero se remueven (antes o después del granallado), junto con cualquier aleta (rebaba) que se forme cuando la fusión fluye hacia afuera en las separaciones entre dos mitades de un molde o en los corazones. En los materiales frágiles, el material en exceso simplemente se rompe; en los materiales más dúctiles, es necesario el aserrado o el esmerilado. Con frecuencia, en estas operaciones se emplean robots, especialmente en la fundición en matrices.

5. Toda la superficie se limpia por medio de varios procesos, incluyendo el granallado, el tomboleado con material refractario o postas de acero, húmedo o en seco o el decapado químico.

6. Si cada pieza tiene el valor suficiente, cualquier defecto detectado se puede reparar eventualmente con soldadura, sin poner en peligro la función de la parte terminada. De otra forma, las piezas defectuosas se rechazan y vuelven a fundir.

7-6-2 Cambio de las propiedades después de la fundición

Muchas fundiciones se someten a un tratamiento térmico (Secc. 6-4), el cual reduce los esfuerzos residuales o cambia las propiedades mecánicas.

Para remediar los defectos existentes, se debe recordar (Secc. 4-1-5) que la presión hidrostática incrementa la ductilidad mientras es aplicada. Si se combina con una tem-

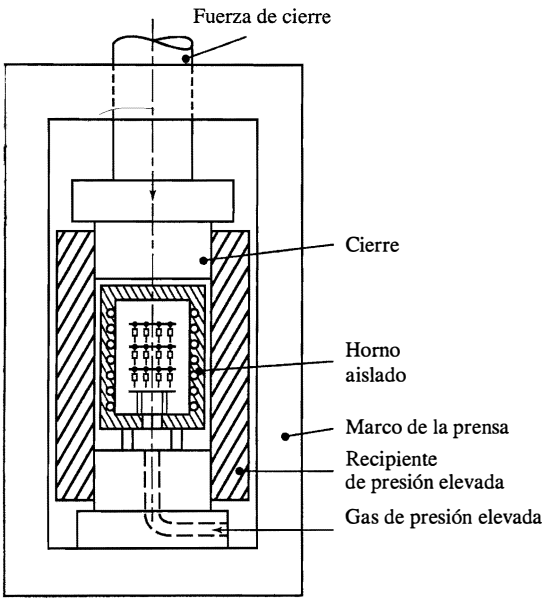


Figura 7-27 La presión isostática en caliente (HIP) impone presión omnidireccional y es un método poderoso para mejorar las propiedades de las fundiciones.

peratura elevada, las propiedades se pueden mejorar permanentemente. Para el *prensado isostático a temperatura elevada* (HIP), la fundición se coloca en un horno bien aislado, el cual luego se carga en un recipiente a presión especialmente construido (Fig. 7-27). El sistema se presuriza con un gas inerte como el argón. Las presiones de hasta 200 MPa y las temperaturas de hasta 2 000°C son posibles, pero 100 MPa y 1 250°C son más comunes en el prensado isostático a temperatura elevada de las fundiciones de superaleaciones y de aleación de titanio usadas en motores de reacción. El metal se hace suficientemente suave como para que la porosidad interna se cierre con la presión impuesta y, si la superficie de los poros está limpia, tienen lugar la adhesión y la soldadura de estado sólido. Como la presión se aplica isostáticamente (desde todas las direcciones), el cambio de la forma es despreciable pero las propiedades de la fundición —especialmente la ductilidad, el esfuerzo de ruptura y las propiedades de fatiga— se mejoran enormemente.

7-7 ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

El control de calidad y la inspección en todas las etapas de la producción son vitales para el éxito de la fundición moderna.

7-7-1 Inspección

Las propiedades mecánicas usualmente se miden en barras de prueba fundidas separadamente. Es esencial que las velocidades de enfriamiento sean las mismas, como en la

fundición, ya que de otra forma los resultados son irrelevantes. Las velocidades de enfriamiento se pueden obtener por mediciones directas en la fundición o por simulación por computadora.

En la inspección para la calidad se emplean todas las técnicas. Siempre se ha practicado la inspección visual, y actualmente se complementa con técnicas de tintes penetrantes y de partículas magnéticas. Los más grandes avances en la calidad de las fundiciones han logrado por el uso extensivo de técnicas de ensayo no destructivo, incluidas la inspección ultrasónica, de corrientes parásitas, rayos x, e inspección por tomografía computarizada para conocer la solidez interna (Secc. 4-8). Aunque estas medidas pueden ser costosas y significar la mitad del costo de una fundición, han hecho las fundiciones competitivas en aplicaciones hasta ahora reservadas para las forjas. Algunos de los ejemplos más importantes son las piezas con calidad aeronáutica y el cigüeñal del motor de combustión interna. Las técnicas no destructivas son particularmente importantes al detectar defectos internos, ya sean debidos a la contracción por solidificación, por desgarramientos internos en caliente, o por porosidad del gas.

7-7-2 Defectos de fundición

El *International Atlas of Casting Defects* ayuda a clasificar e identificar las causas de los defectos de fundición, y la American Foundrymen's Society tiene un programa continuo para desarrollar un sistema experto. Aquí sólo se describen algunos de los defectos más frecuentes de acuerdo con el análisis anterior.

1. Un sistema inadecuado de compuertas y mazarotas o malas prácticas de moldeo pueden causar erosión y empotramiento de la arena (*piel de arena, costras*) en la fundición en molde desechable. En el caso extremo, especialmente con los aceros, la fusión penetra en la arena y provoca que el metal se fusione en una masa. Cuando la arena cae de la superficie, se forma una *costra de expansión*.

2. La compactación de la arena incorrectamente controlada puede causar que los límites dimensionales de la tolerancia se excedan, permitiendo demasiado movimiento de las paredes del molde (*abultamiento*) en la fundición en molde desechable.

3. El *desplazamiento* de las mitades del molde, y particularmente de los corazones, es una causa común del exceso en las tolerancias de especificación.

4. La fusión puede escapar del molde si el molde tiene los pesos inadecuadamente colocados o si la pared de éste es demasiado delgada. Un *escape* incipiente se muestra como una aleta delgada en el plano de separación.

5. El llenado insuficiente de la cavidad (*llenado incompleto, junta fría*) puede ocurrir en cualquier proceso y ser causado por un abastecimiento inadecuado del metal, un sistema de vaciado incorrectamente diseñado, o por temperaturas demasiado bajas en la fusión o en el molde.

6. Una temperatura de fusión demasiado baja también puede conducir a un llenado no uniforme de la matriz y a dobleces visibles (*topes fríos*). Las *juntas frías* se forman cuando dos corrientes de metal se encuentran sin que exista una fusión completa; esto

puede ser particularmente problemático cuando el metal fluye dentro de una cubierta de óxido, como lo hacen las aleaciones que contienen aluminio.

7. Los *agujeros de alfiler* o las *sopladuras* en y por debajo de la superficie son causados por gas liberado de la fusión, o se forman como resultado de reacciones metal-molde.

8. Las cavidades por contracción y la porosidad se pueden exponer cuando se retiran las compuertas y las mazarotas.

9. La contracción debida al enfriamiento desde la temperatura solidus requiere que el molde ceda. Si esto no sucede, la fundición será mayor de lo esperado, tendrá esfuerzos residuales, o se distorsionará (secciones delgadas permanecen más tiempo). En el caso extremo, cuando un material es frágil en caliente, la fractura ocurre en la sección que se solidifica al final.

7-8 CAPACIDADES DEL PROCESO Y ASPECTOS DEL DISEÑO

Con base en el análisis anterior, ahora es posible concentrarse en la elección del proceso y en el diseño de la pieza. Suponemos que a partir de una aproximación por ingeniería concurrente se ha identificado el material y la geometría de la pieza, y que se ha tomado la decisión de producirla mediante fundición.

7-8-1 Capacidades del proceso

Los factores decisivos en la elección del proceso se resumen en la tabla 7-3.

1. Algunos procesos se excluyen inmediatamente si el punto de fusión de la aleación es demasiado elevado.

2. Entre todos los métodos de procesamiento de metales, la fundición permite la complejidad más grande de la forma, excepto cuando se usa una matriz permanente: si se examina la clasificación de la figura 3-1, se deduce que algunas formas no se pueden fabricar, otras necesitan un corazón desechable o uno permanente, de piezas múltiples.

3. El detalle de la superficie depende del proceso y, en ese contexto, del punto de fusión de la aleación, aunque algunos procesos (por ejemplo, la fundición por revestimiento) están influidos en menor medida por él.

4. El acabado superficial y las tolerancias están gobernadas por el proceso y por la aleación (Fig. 3-22). Las tolerancias que se indican están a lo largo de las líneas de separación.

5. Los límites del tamaño (masa) son muy flexibles, y a menudo se definen por consideraciones prácticas. Por ejemplo, el peso máximo de las fundiciones en matriz disminuye con el incremento de la temperatura de vaciado (del zinc al latón), debido a la carga térmica de la matriz. En el extremo inferior, los límites pueden ser fijados por factores físicos como la fluidez.

Tabla 7-3 Características generales de los procesos de fundición de formas

	Proceso de fundición						
	Arena						
Características	**Verde**	**Aglutinada con resina**	**Espuma perdida**	**Yeso**	**Revestimiento**	**Molde permanente**	**Matriz**
Pieza							
Aleación fundida	Todas	Todas	Al a hierro fundido	Zn a Cu	Todas	Zn a hierro fundido	Zn a Cu
Forma*	Todas	Todas	Todas	Todas	Todas	No T3, 5, F5, U1, 5, 7 con corazón sólido	No T3, 5, F5, U1, 5, 7
Detalle superficial†	C	B	C	A	A	B-C	A-B
Masa, kg	0.01-300 000	0.01-100	0.01-100	0.01-100	0.001-100	0.1-100	<0.01-50
Sección mínima, mm	3-6	2-4	2-4	1	0.75	2-4	0.5-1.5
Diámetro mínimo del corazón, mm	4-6	3-6	4-6	10	0.5-1	4-6	3 (Zn: 0.8)
Porosidad†	C-E	D-E	C-E	D-E	E	B-C	A-C
Costo							
Equipo†	C-E	C	B-C	C-E	C-E	B	A
Matriz (o modelo)†	C-E	B-C	B-C	C-E	B-C	B	A
Mano de Obra†	A-C	C	C	A-B	A-B	C	E
Acabado†	A-C	B-D	C-D	C-D	C-D	B-D	C-E
Producción							
Habilidad del operador†	A-C	C	C	A-B	A-B	C	C-D
Tiempo de entrega†	Días	Semanas	Semanas-meses	Días	Horas-semanas	Semanas	Semanas-meses
Velocidades (pieza/h · molde)	1-20	5-50	1-20	1-10	1-1 000	5-50	20-200
Cantidad mínima	~1-100	~100	~500	~10	~10-1 000	~1 000	~10 000

* De la figura 3-1.

† Clasificaciones comparativas, con A indicando el valor más alto de la variable y E el más bajo. Por ejemplo, la fundición por revestimiento produce detalles superficiales excelentes, da porosidad muy baja, involucra de moderado a bajo costo del equipo, de medio a alto costo del modelo, un costo elevado de mano de obra, de medio a bajo en el acabado, y alta eficiencia del operador. Se puede usar para velocidades de producción baja o alta y requiere una cantidad mínima de 10 a 1 000 piezas para justificar el costo del molde del modelo.

6. El espesor mínimo de la sección se dicta por la fluidez y la solidificación y es, de esta forma, una función de la distancia sobre la cual el metal debe fluir (Fig. 7-28).

7. La porosidad está cercanamente relacionada con la solidificación. Sin embargo, se debe recordar que la porosidad (e incluso cavidades más grandes) se puede tolerar en localizaciones de la parte sometidas a un esfuerzo bajo, y que si está distribuida, puede ser permisible en muchos casos.

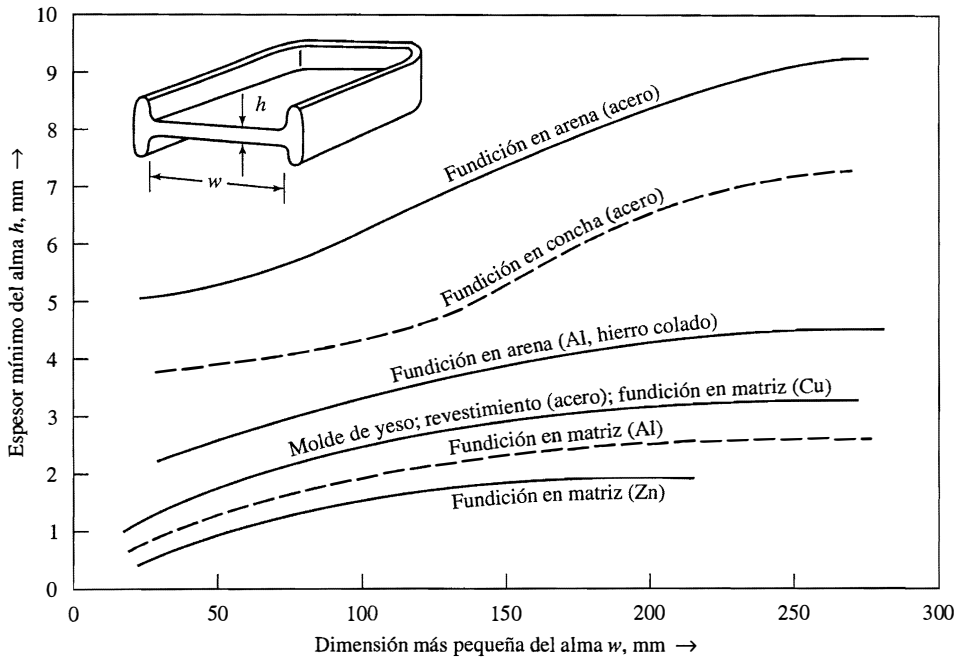


Figura 7-28 Para un cierto proceso, el espesor mínimo del alma se incrementa con la distancia sobre la cual el metal debe moverse.

8. El diámetro mínimo del corazón está limitado por la resistencia de los corazones desechables y por la resistencia y calentamiento de los permanentes.

9. El costo y las características de la producción son factores importantes. Así, al fabricar pocas piezas de un prototipo, los costos bajos de matrices y del equipo pesan más que el precio elevado de la mano de obra y del requisito de la habilidad; lo contrario es válido para la producción en masa.

7-8-2 Diseño de piezas

Una vez que se ha tomado una decisión en el proceso, la configuración de la pieza debe ser optimizada.

Dimensiones A menos que el proceso produzca una pieza con una forma exacta, se deben aplicar holguras de maquinado a todas las superficies de tolerancia rígida. Las holguras comúnmente son de 1.6 mm para una dimensión de 200 mm, y se incrementan 0.8 mm por cada 200 mm adicionales. Algunos procesos, particularmente la fundición en molde cerámico, a la cera perdida y en matriz son adecuados para la producción de formas casi exactas, y las tolerancias se pueden reducir debajo de aquellas que se mues-

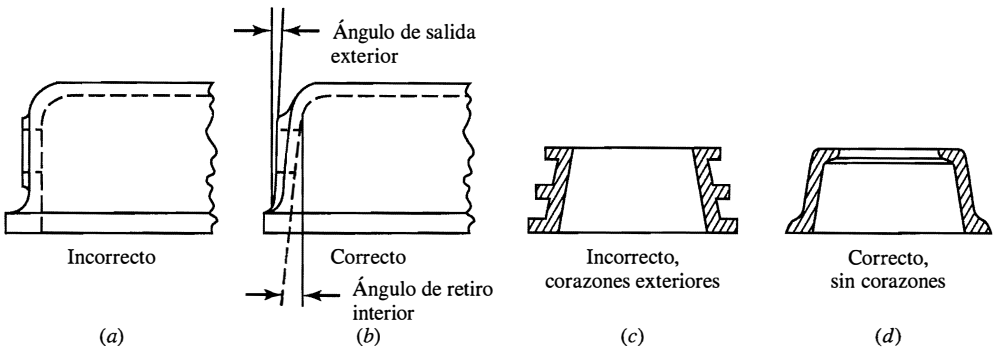


Figura 7-29 El diseño debe tener como objetivo simplificar las fundiciones: los cortes segados requieren (*a*) corazones extra y (*b*) se pueden eliminar. Las costillas en esta parte requieren (*c*) núcleos extra, los cuales (*d*) se hacen superfluos con un rediseño. (*Steel Castings Handbook, 6a. ed., ASM International, 1995, págs. 7-11, Figs. 7-27 y 7-28, con permiso.*)

tran en la figura 3-22. La terminología es difusa, pero a esos productos a menudo se les llama fundiciones de precisión.

Forma La forma debe permitir la liberación de cuerpos sólidos, como el corazón de la caja de corazones y el modelo del molde de arena o cerámico en la fundición en molde desechable; el modelo del molde cuando el primero es desechable, y la fundición del molde cuando éste es permanente.

1. El plano de separación, cuando se requiere, debe ser recto, si es posible del todo. Su localización es crítica porque determina la necesidad de y la localización de los corazones y de los ángulos de salida. Los corazones y el material extra que se requiere para el retiro se suman al costo de producción. Por lo tanto, el retiro se deberá elegir de manera que contribuya al soporte de la carga, y no debe interferir con la sujeción y la localización positivas en el maquinado subsiguiente.

2. Los cortes sesgados, que requieren corazones extra en la fundición en arena y corazones móviles en la fundición por molde permanente, se deberán evitar del todo si es posible (Fig. 7-29).

3. Los ángulos de retiro son mayores en las superficies interiores que en las exteriores (Fig. 7-29*b*), con el fin de asegurar la liberación de la parte del molde o del corazón de la caja de corazones, son más grandes para una altura baja que para una elevada. En la fundición en arena, varían de 6° para paredes bajas a 2° para paredes altas (más de 50 mm). En la fundición en matrices, los ángulos son menores para aleaciones de zinc de bajo punto de fusión. Los ángulos también dependen del método de producción y deben ser acordados con el productor. Los ángulos muy pequeños son posibles con los métodos de modelo perdido.

4. Las localizaciones de los agujeros taladrados se deberán reforzar con protuberancias, preferiblemente formadas para hacer que el taladro entre perpendicular a la superficie fundida. Donde esté justificado, se deberán considerar insertos.

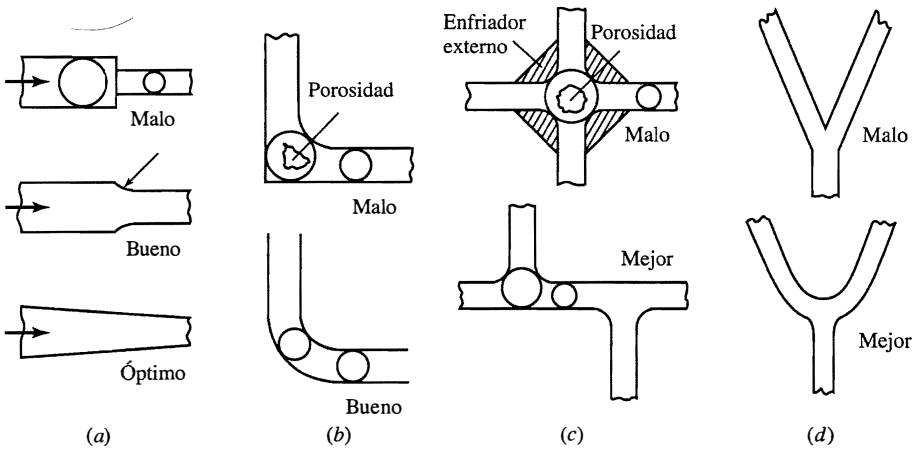


Figura 7-30 Las características del diseño ayudan a aliviar problemas de fundición debidos a (*a*) variación del espesor de la pared, (*b*) punto caliente en esquina, (*c*) punto caliente en costillas cruzadas, y (*d*) punto caliente en una unión en Y.

5. En la fundición en molde permanente, los expulsores deben ser colocados donde no causen distorsión, y donde la impresión dejada por ellos no sea inaceptable.

Solidificación direccional La forma de la fundición deberá promover la solidificación desde las partes más remotas hacia el extremo de alimentación, y no cerrar el acceso de la fusión a las secciones más gruesas. De otra forma, se deben añadir mazarotas para evitar cavidades de contracción y microporosidad.

1. La solidificación direccional se asegura al ahusar la pared en dirección contraria al punto de alimentación (Fig. 7-30*a*).

2. Cuando son inevitables las variaciones del espesor de las paredes, se debe hacer una transición con radios generosos (Fig. 7-30*a*). Los radios pequeños o las esquinas agudas actúan como concentradores de esfuerzos en la fundición terminada, crean turbulencia durante el vaciado y previenen la alimentación adecuada durante la solidificación.

3. Las secciones transversales pesadas localizadas —como las que resultan cuando se aplica un radio sólo a la superficie interior de una esquina o cuando dos costillas se cruzan una con la otra— crean puntos calientes donde se forman cavidades por contracción. Como se podría esperar de acuerdo con la regla de Chvorinov, el problema aumenta con el incremento de la diferencia en el diámetro del círculo inscrito. Aplicar un radio a la superficie exterior (Fig. 7-30*b*) o desplazar las costillas (Fig. 7-30*c*) resulta útil. De otra forma, sería necesario reducir la sección transversal colocando un corazón en la sección más gruesa o acelerando el enfriamiento con enfriadores externos (Fig. 7-30*c*).

4. Las partes delgadas del molde se rompen o se sobrecalientan, creando puntos calientes. Los radios generosos alivian el problema (Fig. 7-30*d*).

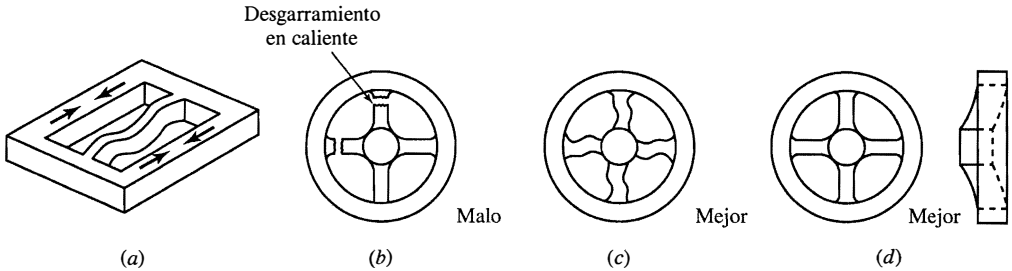


Figura 7-31 La contracción diferencial de secciones desiguales conduce al alabeo (*a*), y la contracción contra un molde sin cedencia resulta en desgarramiento en caliente (*b*), el cual se puede prevenir rediseñando (*c*) y (*d*).

Alabeo La fundición se alabeará si el molde impide la contracción libre o si dos secciones de espesor diferente se enfrían a velocidades distintas. La contracción retrasada de la sección más gruesa induce esfuerzos en la más delgada ya solidificada (Fig. 7-31*a*).

Desgarramientos calientes Los materiales susceptibles a la fragilidad en caliente (Secc. 6-1-6) se pueden desgarrar. Se deben fundir en formas simples que no desarrollen esfuerzos de tensión durante la solidificación, o en materiales del molde que colapsen o cedan libremente y permitan la contracción. La forma debe permitir la deformación sin mover masas grades del molde. Los rayos rectos de una rueda se desgarrarían aun en un molde de arena (Fig. 7-31*b*); los rayos en forma de S se pueden enderezar desplazando relativamente poca arena, y permiten el acortamiento durante y después de la solidificación (Fig. 7-31*c*); un resultado similar se obtiene cuando la maza se coloca en un nivel diferente al del rin (Fig. 7-31*d*).

Para muchas piezas existe una selección amplia de procesos de manufactura. En el enfoque de la ingeniería concurrente, se revisa rápidamente al principio (incluso durante el diseño conceptual, Secc. 2-1-2), para ver qué procesos se pueden usar y cuáles son sus implicaciones para el diseño. Los materiales, el tamaño de la pieza, las razones de las dimensiones y las tolerancias pueden tener efectos significativos, y se deben considerar en la siguiente etapa de deliberaciones. Para ilustrar algunos de estos puntos, se considerarán dos grupos genéricos de partes durante todo el libro.

Ejemplo 7-9

Un grupo de partes tiene simetría rotacional (Fig. 3-1, Grupo S3). Para facilitar los cambios en los enunciados del problema, la geometría se muestra en letras mayúsculas (*a*). De esta forma, por ejemplo, ID = diámetro interior, mm; TID = tolerancia para el diámetro interior, mm; SID = acabado superficial del diámetro interno, μm R_a.

1. En la primera etapa de la evaluación se considera la posibilidad general. Suponga que la forma se va a fundir; todos los procesos de la figura 3-1 y de la tabla 7-3 son adecuados. Sin embargo, si el material es hierro colado esferoidal, sólo las distintas formas de fundición en arena y por revestimiento permanecen como opciones posibles (tabla 7-3).

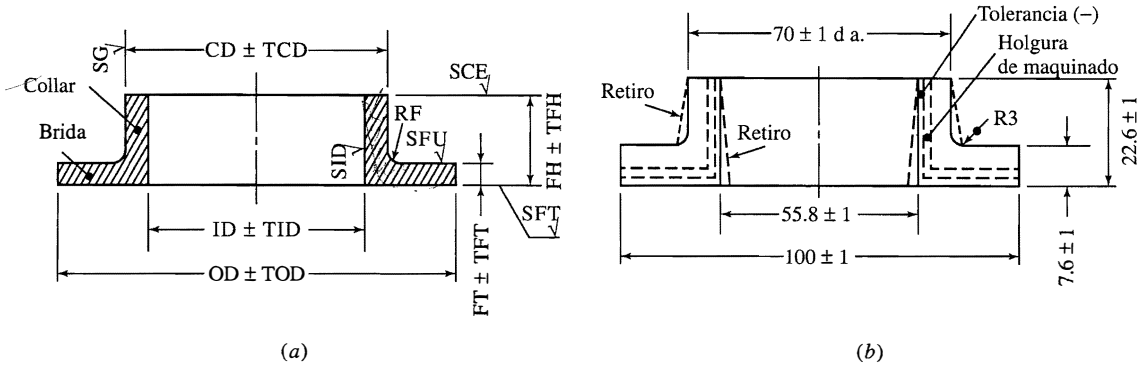


Figura ejemplo 7-9

2. En la segunda etapa de la evaluación se necesitan las dimensiones y las tolerancias. Suponga OD = 100 ± 1 mm; ID = 60 ± 0.05 mm; FH = 20 ± 1 mm; FT = 5 ± 1 mm; CD = 70 ± 1 mm. SFT = SID = 0.8 μm R_a; las otras superficies están indefinidas.

En la figura 3-22, la tolerancia del ID difícilmente se puede cumplir por medio de la fundición por revestimiento. SFT y SID sólo son alcanzables con dicha fundición. Como es probable que de cualquier forma se necesite maquinado en el ID, el costo de la fundición por revestimiento no se puede justificar para una pieza tan sencilla. Para la fundición en arena se aplica la tolerancia de maquinado para ID y FT. Es muy probable que cuatro bridas se fundan al mismo tiempo, arregladas simétricamente alrededor de un bebedero central, con las compuertas al lado o en la superficie de la brida. De esta forma, el metal fluirá en la circunferencia del anillo y no es necesario que el radio del chaflán (RF) ayude al flujo. Sin embargo, sería difícil mantener el borde agudo sin erosión de la arena; elija RF = 3 mm o más. Para un costo menor del molde, la línea de partición estará en la base de la brida, lo que requiere un ángulo de salida en las superficies del collar. Una primera aproximación para la forma fundida se muestra en la figura (*b*). Una evaluación más detallada tomará en cuenta las cantidades de producción, el costo, etcétera.

Ejemplo 7-10

Otro grupo genérico de partes se puede describir como una sección (una viga H, Fig. 3-1, Grupo S0). Una sección recta (*a*) es adecuada para cargas ya sea de compresión o de flexión. Para la rigidez a la torsión se añade una costilla (*b*). Esta configuración (Fig. 3-1, Grupo S6), repetida en la dirección SL, es la base de muchas piezas estructurales sometidas a esfuerzos combinados, y es representativa de muchos retos de manufactura.

En la primera evaluación suponga una fundición en arena. Aun sin asignar dimensiones, se pueden abordar algunos puntos para la sección recta (*a*). La elección más obvia es tener la línea de partición en el centro del alma, de esta forma no se necesitan corazones. Sin embargo, se debe aplicar un ángulo de salida a los patines (*c*), y esto representa material extra que contribuye poco a la resistencia a la flexión. Es muy probable que la cavidad se alimente desde el extremo; si se hace desde el fondo del patín, las corrientes ascendentes de la fusión se encontrarán en medio del alma; si se alimenta desde ese lugar, la fusión correrá hacia el fondo de los patines. La posibilidad de fundir en posición vertical no es inmediatamente obvia. Si se usan corazones externos, el ángulo interno de salida puede ser cercano a cero (*d*). La alimentación desde el fondo proporciona un flujo uniforme de la fusión, y se pueden colocar cabezales de alimentación en las uniones

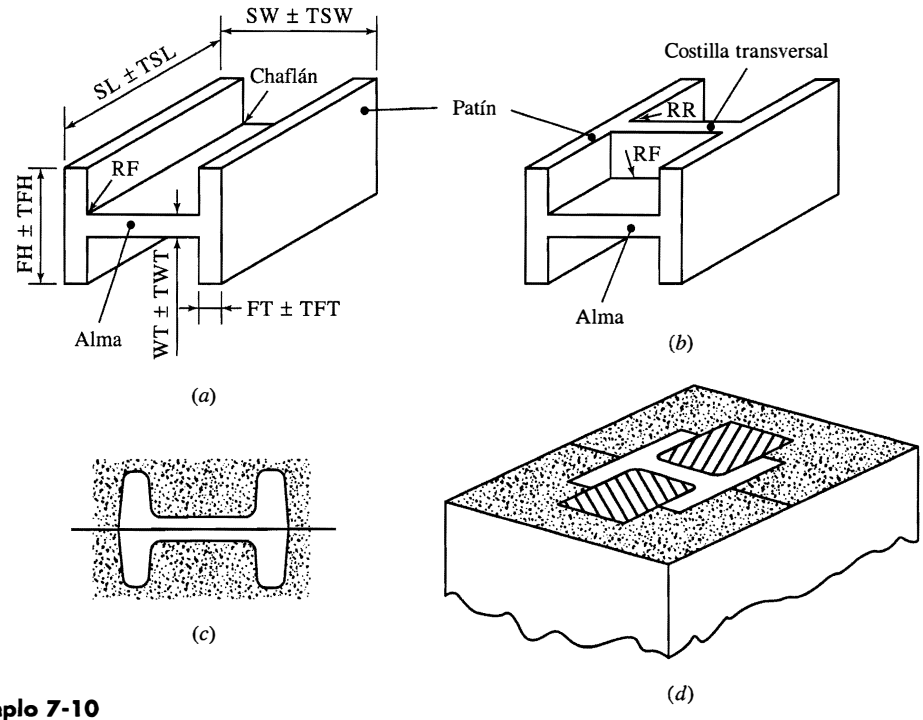


Figura ejemplo 7-10

del alma con el patín. Una consideración posterior debe incluir el material de fundición, las holguras de maquinado, el tamaño y las tolerancias, las cantidades de producción y el costo relativo.

Con una costilla cruzada (*b*), un plano horizontal de separación permite que los cabezales de alimentación se coloquen en las intersecciones del patín y de la propia costilla. La alimentación de la intersección sería difícil en posición vertical, pero RR puede ser muy pequeño y el punto caliente ser minimizado. Es factible reducir el espesor del alma WT en muchas aplicaciones, con poca pérdida de la capacidad carga. Por supuesto, esto se puede hacer en la fundición, a condición de que el espesor no se reduzca por debajo de las capacidades del proceso (Fig. 7-28).

7-9 RESUMEN

Los procesos de solidificación están involucrados en la producción de la gran mayoría de materiales metálicos. Casi todos los materiales forjados se funden antes de deformarlos, y una proporción significativa de metales se funde directamente en una forma. Los componentes fundidos se usan para aplicaciones tan diversas como bases para máquinas herramientas, bloques de motor y cigüeñales automotores, álabes de turbinas, acoplamientos de plomería y artículos decorativos. Con el proceso adecuado de moldeo, se pueden fundir partes con una complejidad no igualada por ningún otro proceso.

Una fundición es excelente sólo si las limitaciones impuestas por el proceso de solidificación son tomadas en cuenta en el diseño de la fundición y del proceso:

1. Para que ocurra la solidificación, el molde debe estar más frío que la T_m del metal. Los problemas del flujo de fluidos y de transferencia de calor limitan el espesor mínimo alcanzable de la pared, especialmente si la aleación solidifica con el crecimiento de dendritas, las cuales entorpecen el flujo del fluido.
2. Las técnicas para calcular mazarotas y compuertas deben asegurar el llenado completo y uniforme de la cavidad de la matriz seguido por una solidificación ordenada, con un abastecimiento suficiente de metal líquido para alimentar los rechupes que de otra manera se formarían.
3. La transferencia de calor se debe controlar localmente para prevenir la deprivación de las porciones de solidificación tardía de la fundición y para minimizar la porosidad.
4. El control del tamaño de grano es el medio más poderoso para mejorar las propiedades mecánicas. Comúnmente se pretende obtener un grano fino, pero excepcionalmente (para resistencia a la termofluencia a temperatura elevada) el objetivo es un grano grueso, en el límite, por medio de la solidificación direccional de una sola dendrita.
5. Las propiedades mecánicas, particularmente la ductilidad, y la resistencia al impacto, y a la fatiga se pueden mejorar en gran medida a través de técnicas de fusión, vaciado y fundición, que reducen el número y tamaño de las inclusiones y las llevan a la forma y localización menos dañina.
6. Las propiedades se pueden mejorar por la aplicación de presión en el rango de temperatura donde el material es todavía blando o por prensado isostático de la fundición solidificada.
7. También se pueden impartir propiedades deseables tratando térmicamente la fundición solidificada para remover los esfuerzos residuales (recocido de alivio de esfuerzos), homogeneizando la estructura (homogeneización), incrementando la resistencia (tratamiento de la solución y envejecimiento de las aleaciones endurecibles por precipitación; templado y revenido en el caso del acero), o desarrollando la estructura óptima (el recocido del hierro blanco para convertirlo en hierro maleable, y el recocido del hierro fundido dúctil).
8. Los peligros del manejo del metal fundido, de la radiación de luz y térmica de las fusiones de temperatura elevada, y de la operación de la maquinaria de fundición, requieren de entrenamiento especial, equipo de protección personal y medidas de seguridad estrictas. Los vapores y gases nocivos se deben contener o tratar para la protección de los trabajadores y del ambiente.

PROBLEMAS 7A

7A-1 (*a*) Haga un boceto mostrando la solidificación planar en un molde cilíndrico. (*b*) Enuncie qué aleaciones solidifican con este patrón. (*c*) Haga un boceto de la solidificación dendrítica. (*d*) Enuncie qué clases de aleaciones solidifican con este patrón.

7A-2 (*a*) Defina supercalor. (*b*) Normalice el supercalor para aleaciones con diferentes puntos de fusión.

7A-3 (*a*) Dibuje un diagrama que muestre la solubilidad de los gases en los metales puros y en las soluciones sólidas como función de la temperatura. (*b*) Proporcione dos métodos adecuados para asegurar un contenido bajo de gas en una fundición solidificada.

7A-4 Dibuje un diagrama que indique el esfuerzo cortante contra la velocidad de deformación para fluidos (*a*) dilatantes, (*b*) newtonianos, (*c*) pseudoplásticos, y para (*d*) una sustancia Bingham.

7A-5 (*a*) Defina tixotropía. (*b*) Dé un ejemplo de un material que presente este comportamiento.

7A-6 Dibuje un diagrama que consigne el efecto de la temperatura del molde en (*a*) la velocidad de enfriamiento, (*b*) el tamaño de grano, (*c*) la productividad.

7A-7 Escriba tres funciones posibles de los fundentes en la fusión.

7A-8 Defina para la fundición en arena: (*a*) modelo; (*b*) corazón; (*c*) caja de corazón; (*d*) asiento de corazón.

7A-9 (*a*) Escriba los componentes de la arena verde. (*b*) Defina qué son un molde de arena verde y uno de arena seca. (*c*) ¿Cuál es más fuerte? (*d*) ¿Cuál es más adecuado para la fundición de materiales frágiles en caliente? ¿Por qué?

7A-10 Haga un boceto de la sección transversal de un molde de arena, mostrando una pieza similar a una biela (con secciones más grandes en cada extremo), y los necesarios: (*a*) vertedero, (*b*) bebedero, (*c*) pozo, (*d*) canal de alimentación, (*e*) compuerta, (*f*) compuerta interna, (*g*) mazarota caliente, (*h*) mazarota fría, (*i*) cabeza de alimentación, (*j*) mazarota sumergida, (*k*) mazarota viva. Identifique con letras cada elemento (uno puede tener varios nombres).

7A-11 Haga un boceto que indique los elementos principales de una máquina para fundición en matriz de cámara fría. (*a*) Identifique los componentes principales de la máquina y las características críticas del molde. (*b*) Explique cuál es la mayor limitación en los materiales que se pueden fundir por medio de esta técnica.

7A-12 Repita el problema 7A-11 para la fundición en matriz de cámara caliente.

7A-13 Haga bocetos sencillos que muestren las características principales distinguibles de los cuatro tipos importantes de los procesos de fundición en molde permanente.

7A-14 Realice bocetos simples que indiquen las características principales reconocibles de (*a*) la fundición centrífuga, (*b*) la fundición semicentrífuga y (*c*) de la centrifugación.

PROBLEMAS 7B

7B-1 Algunas veces es preferible no alterar la estructura de la fundición maquinando su superficie. Sugiera una razón posible para esta preferencia.

7B-2 Un acero AISI 1020 se funde continuamente en palanquillas de 200 × 200 mm. Haga un boceto del proceso de fundición, mostrando claramente la matriz y la forma de la zona de solidificación. Indique en qué parte de la palanquilla se podría esperar microporosidad debida a la contracción por solidificación.

7B-3 Un lingote de 1 000 mm de ancho, 400 mm de espesor y 2 000 mm de longitud se funde en un molde permanente. (*a*) Elabore un boceto de la sección transversal de 400 × 2 000 mm que incluya el tamaño del grano y la distribución que se espera de éste al fundir un metal puro, libre de gases. Muestre la forma y localización del rechupe y de la microporosidad, si hay alguna. (*b*) Dibuje otro boceto respecto al inciso (*a*), pero esta vez para una aleación de solución sólida. Abajo dibuje un diagrama que indique la macrosegregación; explíquelo con la ayuda de una sección relevante de un diagrama de equilibrio.

7B-4 Un anillo de 120 mm OD, 80 mm ID y 20 mm de altura se va a fundir en un molde de arena. Como parte de su diseño preliminar,

realice bocetos para mostrar al menos cuatro opciones para colocar el plano de separación. Indique dónde se puede necesitar un ángulo de salida y/o corazón.

7B-5 Una pieza se hizo por tixoformado. (*a*) ¿Es probable que el material sea un metal puro, una solución sólida o un eutéctico? (*b*) ¿Cuál es la microestructura probable? (*c*) ¿Cuál fue la secuencia probable de producción?

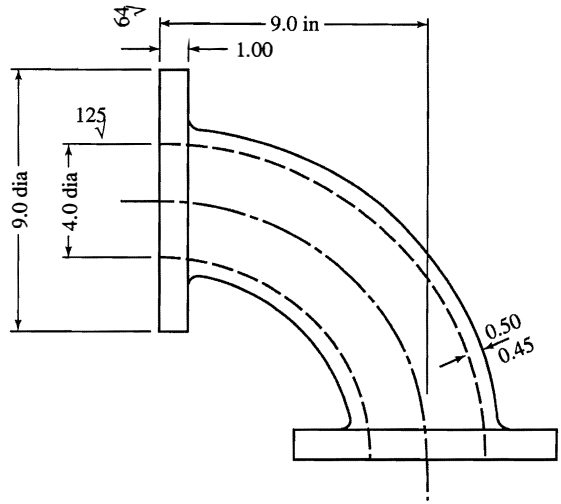
7B-6 A pesar de los mejores esfuerzos, una fundición de una superaleación presenta porosidad. Usted sugiere que se someta a HIP. Para explicar a otras personas: (*a*) Defina HIP. (*b*) Explique qué hace. (*c*) Indique qué propiedades se mejoran más: resistencia, elongación, reducción en área, resistencia a la fatiga, resistencia al impacto o dureza. (*d*) Explique si funcionará siempre.

7B-7 (*a*) Las aleaciones de soluciones sólidas con rango amplio de congelamiento generalmente se consideran como aleaciones impropias para la fundición; ¿por qué? (*b*) Se usan extensivamente en la fundición en matrices. Proporcione una explicación.

7B-8 (*a*) Dibuje un boceto de una pieza que indique el desgarramiento por calor. (*b*) Explique, con la ayuda de bocetos adecuados, los eventos que conducen a este problema. (*c*) Escriba qué tipo de aleación es más propensa a él.

7B-9 Continuando con el problema 7B-8, indique si el desgarramiento por calor es un peligro mayor para un material de dilatación térmica elevada o para uno de baja.

7B-10 El acoplamiento de codo con bridas que se muestra será fundido con acero inoxidable. En un boceto del diseño, (*a*) elija el plano de separación, (*b*) indique la dirección de la alimentación y (*c*) sugiera una modificación del diseño para asegurar la solidificación direccional. (*d*) Considere todos los procesos de fundición (la Fig. 7-12 y la tabla 7-3 serán de ayuda); elimine todos los procesos técnicamente inadecuados (justifique cada decisión con una oración breve). (*e*) Sugiera la orientación de la fundición que dé el mejor llenado.



7B-11 Una base grande para una máquina herramienta se va a fundir con costillas de rigidez intersecándose en ambos lados del plano. Muestre en un boceto el problema que se puede originar y sugiera (en un dibujo) al menos una modificación del diseño para minimizar el problema.

7B-12 Una pieza con apariencia de una biela se funde en arena. Se encuentra porosidad en el cuerpo y en las cavidades de las cabezas. Muestre, con bocetos de diseño apropiados, (*a*) un remedio para las cabezas y (*b*) dos soluciones posibles para el cuerpo. Explique cada uno en una oración.

7B-13 Se va a fundir una pieza de forma sesgada (Fig. 3-1, forma U4). Como parte de su diseño preliminar, determine si se puede fundir (*a*) en un molde de arena y (*b*) en un molde permanente. Para justificar sus respuestas, realice bocetos para mostrar los corazones y las limitaciones de la forma.

7B-14 En una reunión se le pide describir, muy brevemente, las características esenciales de los cuatro procesos principales de fundición en matriz. No hay medios para hacer bocetos. (Asegúrese de clarificar el método de llenado de la cavidad.)

7B-15 En una reunión se le pide describir de manera concreta las características esenciales de los tres procesos principales de la fundición centrífuga. No hay medios para dibujar bocetos.

7B-16 En algunas ocasiones, las parrillas de los automóviles se hacen de aleaciones fundidas en matrices de Al-Si-Cu. Para explicar las razones, (*a*) dibuje un extremo de un diagrama de equilibrio eutéctico binario típico con una solución sólida terminal. (*b*) Elija una composición reforzada puramente por un mecanismo de solución sólida; denomínela C_s. (*c*) Elija una composición reforzada por un mecanismo de solución sólida y por endurecimiento por precipitación, indíquela como C_p. (*d*) Muestre en un boceto el modo de cristalización esperado de C_p como se solidificaría en una sección de pared delgada. (*e*) ¿Permitirá el metal la fundición en matriz a presión en pared delgada? ¿Por qué? (*f*) ¿Esperaría ver microporosidad en esta fundición? ¿Por qué?

7B-17 Se va a realizar una fundición de una forma muy intrincada y buen acabado superficial. Sugiera algunos métodos adecuados si la fundición es (*a*) sólida y si es (*b*) hueca, con una cavidad de forma compleja.

7B-18 Se ha discutido que la evolución del gas durante la solidificación causa segregación inversa. Para resolver el punto, (*a*) defina macrosegregación; (*b*) indique la variación esperada para la segregación inversa, (*c*) explique la causa más frecuente de tal segregación. (*d*) Con esta base, ¿qué variación se debería esperar para la segregación inducida por gas?

7B-19 La pieza que se muestra en la figura 7-29*c* es fundida en arena. Suponiendo simetría rotacional, haga bocetos de diseño para mostrar (*a*) la base y la tapa, (*b*) los corazones que se requieren, si es el caso. (*c*) Repita para la figura 7-29*d*.

7B-20 Repita el problema 7B-19 para la figura 7-29*a* y *b* (suponga una geometría rectangular con sólo dos agujeros).

7B-21 Suponga que la parte que se muestra en la figura 7-29*a* se hace en un molde permanente. Dibuje un boceto de diseño para mostrar las mitades del molde y los núcleos móviles, si hay alguno.

7B-22 Dibuje un diagrama de equilibrio eutéctico típico con solubilidad sólida limitada en cada extremo. (*a*) Identifique todos los campos de las fases. (*b*) Dibuje abajo un diagrama para mostrar las variaciones de la microporosidad y la formación del rechupe. (*c*) Marque en el diagrama de equilibrio la composición correspondiente al metal puro *A* como C_A, una composición dentro del rango de solubilidad sólida limitada como C_R, en el límite de la solubilidad sólida como C_L, la composición eutéctica como C_E. (*d*) Defina fluidez. (*e*) Prepare una tabla como la que se muestra aquí y haga una clasificación; marque la mejor como 1 y la peor como 4. Suponga fundición en arena alimentada por gravedad, y para la fluidez, supercalor igual.

	C_A	C_R	C_L	C_E
1. Fluidez				
2. Peligro de microporosidad				
3. Facilidad de supercalentamiento				
4. Fundibilidad				

7B-23 Sugiera tres métodos de refinación del tamaño del grano en un componente fundido.

7B-24 Explique la diferencia entre moldeo al vacío y fundición al vacío.

PROBLEMAS 7C

7C-1 Una parte fundida de una aleación de aluminio 413.0 se rompe en servicio. Un análisis confirma que la composición es correcta. El examen metalográfico muestra partículas interdendríticas angulares grandes. ¿Cuál es la causa probable del problema?

7C-2 Dibuje un diagrama que indique los cambios en fluidez esperados al moverse en el sistema Cu-Ag desde el extremo Cu hasta el Ag.

7C-3 Demuestre que la ecuación de Bernoulli [ecuación (7-4)] es dimensionalmente homogénea y que efectivamente representa energía por unidad de volumen.

7C-4 Busque el diagrama de equilibrio Al-Si y seleccione composiciones con 2% Si y 12% Si. (*a*) ¿Cuáles son las temperaturas críticas de la aleación de 2% Si y 12% Si? ¿Qué fases esperaría y en qué localización de la estructura a temperatura ambiente para una aleación con 2% Si? (*b*) Repita esto para la aleación de 12% Si. Con esta base, ¿cuál aleación es (*c*) más dúctil en la condición de equilibrio, (*d*) más propensa a la segregación intergranular, (*e*) más susceptible a la fragilidad en caliente, (*f*) de mayor fluidez, (*g*) más fácil de alimentar y (*h*) más propensa a la microporosidad? (*i*) Indique qué aleación es más favorable para fundición.

7C-5 Un acero líquido de 0.2% de C y 0.01 %wt de oxígeno se van a fundir en hilos. Suponga que no hay solubilidad de O en el sólido y que el O se expulsará en la forma de CO. (*a*) Calcule la cantidad de gas liberado en unidades de $cm^3/100$ g de metal. (*b*) Vuelva a calcular como porcentaje del volumen total (gas + metal). (*c*) Si el acero se funde continuamente en un hilo cuadrado de 100×100 mm a 1.5 m/min, deduzca la velocidad de alimentación de un alambre de aluminio de 10 mm de diámetro usado para desoxidar el acero.

7C-6 Una fusión de latón Cu-40Zn se vacía en un molde de arena. En el depósito de vaciado, el metal está a 200 mm por arriba de la línea central del canal de alimentación, el cual se toma como nivel cero. La sección transversal del canal de alimentación es de 10×10 mm. (*a*) Haga un boceto. (*b*) Calcule, mediante el teorema de Bernoulli [ecuación (7-4)], la velocidad y rapidez del flujo en la entrada al molde, ignorando las pérdidas por fricción (el depósito de vaciado es tan grande que la velocidad en él se puede tomar como cero).

7C-7 Una rueda se funde de acero de bajo carbono con rayos rectos (como en la Fig. 7-31*b*). La longitud de cada rayo es de 100 mm. El molde es de un material refractario, sin cedencia, y cambia sus dimensiones insignificantemente durante el calentamiento o enfriamiento. El rayo se enfría de 1 100 a 900°C en 10 min. Para evaluar la factibilidad del diseño, calcule (*a*) la deformación, si el coeficiente de dilatación térmica es 23×10^{-6} por °C; (*b*) la rapidez de deformación por tensión promedio; (*c*) el esfuerzo de cedencia a 1 000°C (de la tabla 8-2). (*d*) Suponiendo que el material se comporta a esta temperatura como un cuerpo elástico ideal, y que el módulo de Young es el 60% de su valor a temperatura ambiente, determine si se acomodará la contracción por el desarrollo de esfuerzos elásticos (residuales) o por deformación plástica. (*e*) Someta el enunciado del problema anterior a una crítica detallada considerando la validez de las suposiciones de simplificación.

7C-8 Con la ayuda de la regla de Chvorinov [ecuación (7-5)], calcule los tiempos de solidificación relativos para fundiciones de volúmenes idénticos y de las siguientes formas: (*a*) esfera de diámetro d; (*b*) cilindro con $h/d = 1$; (*c*) cilindro con $h/d = 10$; (*d*) cubo; (*e*) prisma rectangular recto con $h/a = 10$; (*f*) placa plana de igual longitud que la de (*e*) pero con un tercio del espesor. (*g*) Grafique los resultados para ilustrar el efecto de los cambios de forma.

7C-9 El anillo del problema 7B-4 está hecho de una aleación de Zn por fundición en matriz de cámara fría. Para su diseño, (*a*) elija el plano de separación a la mitad del espesor del anillo. (*b*) Determine el tamaño de la máquina de fundición en matriz que se necesita.

7C-10 Por medio de la regla de Chvorinov, calcule los tiempos de solidificación relativos para mazarotas de volumen unitario de las formas definidas en el problema 7C-8.

7C-11 Una carga de 2 000 kg de "bronce de joyería" (aleación C22600, 87.5Cu-12.5Zn) se va a preparar para una fundición semicontinua. Se

tienen disponibles cobre y zinc puros y chatarra de latón 70/30. Diseñe la preparación de la carga, permitiendo 0.5% Zn para pérdida por oxidación.

7C-12 Una carga de 1 000 kg de latón plomado amarillo (C85400 en la tabla 7-2) se va a preparar para fundirse en un horno de inducción. Los materiales disponibles son: latón 60/40 (suficiente para proporcionar hasta 60% de la carga), latón 70/30, cobre puro, y zinc. Por economía, se adiciona Sn en la forma de bronce para cojinetes (C93700 en la tabla 7-2). Diseñe la composición de la carga utilizando el latón 60/40 tanto como sea posible; la chatarra de latón 70/30 es más cara pero aun así cuesta menos que los metales puros. Permita una pérdida del 1% de Zn.

7C-13 La biela que se muestra en la figura 7-18*a* se funde con un extremo sólido de 80 mm de diámetro y 50 mm de altura. La parte se alimenta desde el extremo grande, y se coloca una mazarota fría en el extremo pequeño. Para asegurar la solidez de su diseño, calcule las dimensiones de una mazarota de una razón $h = 1.2d$ que toma 50% más tiempo para solidificar que el extremo pequeño.

LECTURAS ADICIONALES (véase también el capítulo 6)

ASM Handbook, vol. 15, *Casting*, ASM International, 1988.

Analysis of Castings Defects, American Foundrymen's Society, 1974.

Beeley, P.R.: *Foundry Technology*, Butterworths, 1972.

Campbell, J.: *Castings*, Butterworth-Heinemann, 1991.

Clegg, A.J.: *Precision Casting Processes*, Pergamon, 1991.

Davis, J.R. (ed.): *Cast Irons*, ASM International, 1996.

Davis, J.R. (ed.): *Tool Materials*, ASM International, 1995.

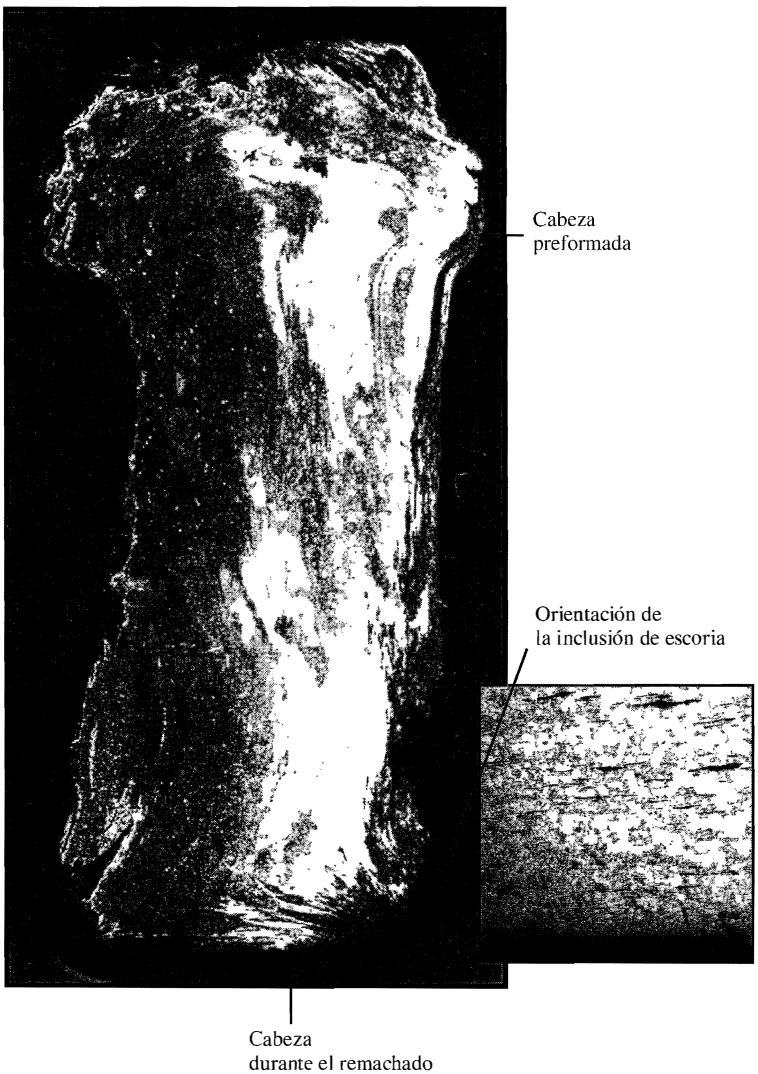
Elliott, R.: *Cast Iron Technology*, Butterworths, 1988.

Johns, R.: *Casting Design*, American Foundrymen's Society, 1987.

Miller, R.K.: *Robots in Industry: Applications for Foundries*, SEAI Institute, Madison, GA, 1982.

Rowley, M.T. (ed.): *International Atlas of Casting Defects*, American Foundrymen's Society, 1974.

Wieser, P.F. (ed.): *Steel Castings Handbook*, 6a. ed., Steel Founders' Society of America and ASM International, 1995.



Cuando el Titanic se impactó con un iceberg, las placas de acero del casco y de los mamparos, unidas por remaches, fueron desgarradas. Una junta forense marítima concluyó que las causas probables del daño catastrófico fueron venillas de escoria en los remaches, orientadas perpendicularmente a la dirección de la carga. (*Cortesía del Dr. Tim Foecke, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.*)

capítulo

8

Deformación plástica de los metales

Como preparación para el análisis de la deformación volumétrica y de los procesos de trabajo de lámina de metal, repasaremos críticamente algunos fundamentos, incluyendo:

Por qué el YS no es el esfuerzo de fluencia

Anomalías en la fluencia plástica: punto de fluencia, fluencia aserrada y texturas

Las consecuencias del trabajo en frío y su remoción por recuperación y recristalización

La explotación de los mecanismos de endurecimiento por deformación y de restauración para el control de la estructura y de las propiedades mecánicas

Los elementos de la mecánica de la deformación plástica: efectos del estado de esfuerzos, fricción y deformación no homogénea

Los conceptos de la trabajabilidad volumétrica y la formabilidad de lámina

En la sección 7-5 se mencionó que alrededor de 85% de todos los metales se funden en lingotes, planchas o palanquillas para su trabajo posterior por deformación plástica (tabla 8-1). Ésta implica que la forma de la pieza de trabajo cambie sin afectar el volumen y sin fundir el material. Obviamente, resulta esencial que el material sea capaz de sufrir deformación plástica sin fractura pero, como toda la deformación ocurre en el estado sólido, el llenado de la matriz no será tan fácil como en la fundición. Por lo tanto, en el diseño de piezas y de los procesos de trabajo de metal no sólo será necesario considerar las leyes que gobiernan el flujo del material (pues definen si se obtendrá la configuración deseada), sino también la ductilidad de los materiales (pues fija un límite a la deformación obtenible) y las presiones, fuerzas y requisitos de potencia (ya que determinan las cargas de las herramientas y del equipo).

El éxito de los procesos depende de la interacción entre las propiedades del material y las condiciones del proceso. Los principios que se analizarán a continuación tienen aplicabilidad universal; sin embargo, por razones prácticas es común dividir los procesos de trabajo de metal en dos grupos. En los *procesos de deformación volumétrica* (Cap. 9) el espesor, el diámetro u otra dimensión importante de la pieza de trabajo se modifica

Tabla 8-1 Embarques de productos forjados (EU)

	Miles MG*	
Grupo de aleación	**1972**	**1995**
Acero		
Secciones, rieles	5 900	8 700
Plancha	7 300	9 000
Lámina y rollos laminados en caliente	14 200	17 800
Lámina y rollos laminados en frío	17 800	14 200
Lámina galvanizada	4 900	14 600
Hojalata	5 000	2 600
Barra laminada en caliente	11 800	11 900
Barra terminada en frío	1 600	1 800
Alambre	2 300	650
Tubo, tubería	6 900	5 400
Forjas	1 200	
Cobre y latón	2 600	3 300
Aluminio	4 100	6 500
Plomo (incluyendo acumuladores)	480	760
Magnesio	16	24

Fuente: compilado de *Metal Statistics* 1974 y *Metal Statistics* 1997, American Metals Market, Fairchild Publications Inc., Nueva York, 1974 y 1997.

*Mg (= 1 000 kg = tonelada métrica = 2 200 lb).

sustancialmente. En los *procesos de trabajo de lámina metálica* (Cap. 10) la variación del espesor es incidental; además, la lámina —que es el material de partida— es producto de un proceso de deformación volumétrica llamado laminación. Aquí el interés se centra en los fundamentos que son igualmente aplicables a la deformación volumétrica y a los procesos de trabajo de lámina de metal.

8-1 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

En las secciones 4-1 y 4-3 ya se analizaron muchas propiedades de los materiales sólidos, pero en relación con las propiedades requeridas en servicio. Es necesario volver a examinar estas propiedades, pero ahora con énfasis en su relevancia para el proceso de deformación.

8-1-1 Esfuerzo de fluencia en el trabajo en frío

Para los cálculos del trabajo de metal, el límite de cedencia y la resistencia a la tensión —propiedades de interés primordial para el diseño de productos— son de importancia

secundaria. La primera preocupación es el esfuerzo que se requiere para deformar el material de la pieza de trabajo.

Esfuerzo de fluencia en tensión El esfuerzo de ingeniería (ecuación 4-3), calculado convencionalmente a través del ensayo por la tensión, es de poco valor en los cálculos aunque se usa mucho en comunicación. Se necesita un esfuerzo real que, por definición, es la fuerza P dividida entre el área instantánea A. Es posible medir el área instantánea de la sección transversal, pero la mayor parte del tiempo se calcula usando el principio de la invariabilidad del volumen. Mientras la elongación sea uniforme sobre la longitud de calibración (Fig. 4-2*c*),

$$A = A_0 \frac{l_0}{l} = \frac{V}{l} \tag{8-1}$$

donde l es la longitud instantánea. Una vez que comienza la estricción, el diámetro mínimo —el único de importancia— se desconoce y no se pueden calcular más puntos.

Como lo que nos ocupa es la deformación permanente, la cual comienza en el punto de cedencia, el esfuerzo real suele calcularse partiendo de la cedencia inicial hasta la estricción. Cada punto deducido define el esfuerzo que se debe aplicar para seguir deformando el material; de ahí que se le llame esfuerzo de fluencia σ_f

$$\sigma_f = \frac{P}{A} \tag{8-2}$$

donde P es la fuerza instantánea. Es factible —y algunas veces se realiza— graficar el esfuerzo de fluencia como una función de la deformación por tensión de ingeniería e_t [ecuación (4-4)], pero para propósitos de cálculo se necesita la *deformación real* ε (también llamada *natural* o *deformación logarítmica*). Por definición, se obtiene como el logaritmo natural de la razón de la longitud instantánea l respecto a la longitud original l_0

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{A_0}{A} \tag{8-3}$$

Ahora los datos derivados de la curva fuerza de tensión-desplazamiento se pueden graficar para definir la curva esfuerzo real-deformación real (Fig. 8-1*a*). Como comparación, la curva esfuerzo de ingeniería-deformación real se muestra también en la figura 8-1*a* con líneas discontinuas. [Hay un punto que se puede calcular aun si está sólo un poco más allá de la estricción: la fuerza de fractura P_f está disponible y se puede medir el área de sección transversal mínima A_f correspondiente (Fig. 4-2*d*) en la probeta rota. Por razones que se explicarán más adelante, el esfuerzo real calculado de esta manera es un poco elevado.]

Actualmente se cuenta con un atlas de las curvas del esfuerzo de fluencia de muchos materiales; sin embargo, se puede utilizar un registro más condensado y más conveniente para realizar cálculos. Cuando σ_f se vuelve a graficar contra ε en papel logarítmico en ambos ejes, con frecuencia se obtiene una línea recta (Fig. 8-1*b*) que indica que σ_f debe ser una función de una potencia de ε

$$\sigma_f = K\varepsilon^n \tag{8-4}$$

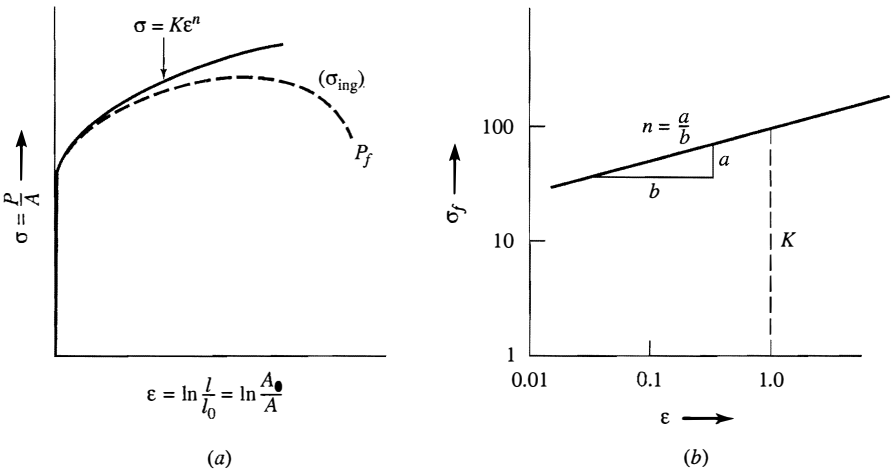


Figura 8-1 En el rango de temperatura de trabajo en frío (*a*) muchos materiales obedecen la ley de potencia del endurecimiento por deformación como se muestra con (*b*) la gráfica lineal doblemente logarítmica del esfuerzo de fluencia contra deformación real.

donde K es el *coeficiente de resistencia* y n el *exponente del endurecimiento por deformación.* En la gráfica doblemente logarítmica, K es el esfuerzo para deformación unitaria y n la pendiente de la línea, *medida en una escala lineal.* Alternativamente, K y n se determinan ajustando una curva de potencia a los puntos de información (¡note que n *no* es la pendiente de la curva esfuerzo real-deformación real!).

Ejemplo 8-1

A partir de la curva fuerza-desplazamiento dada en el ejemplo 4-4, calcule el esfuerzo de fluencia del material en diferentes puntos. Grafique para obtener los valores de K y n.

La tarea se presta para obtener una solución por medio de una hoja de cálculo. Las constantes son: longitud de calibración, 25.0 mm; espesor, 6.35 mm; ancho, 6.38 mm, y volumen de la probeta, $V = (6.35)(6.38)(25.0) = 1\,013$ mm^3. Note que Δl siempre se obtiene dibujando una línea, desde el punto de interés, *paralela a la línea elástica.* La hoja de cálculo da los resultados que se muestran en la tabla de la página siguiente.

(Vea que el esfuerzo real siempre es mayor que el de ingeniería.)

Se puede calcular un último punto partiendo del área de fractura: $A = 2.85 \times 3.5 = 9.98$ mm^2 y la deformación se basa en la deformación de fractura $\varepsilon = \ln (A_0/A_f) = \ln (40.5/9.98) = 1.4$. La gráfica logarítmica en ambos ejes de los puntos define una línea recta, así el material obedece la ecuación (8-4). $K = 760$ MPa y $n = 0.45$ (muy alto pero no irrazonable, puesto que el material es una solución sólida dúctil).

Efecto del endurecimiento por deformación en la estricción Una observación importante es que el endurecimiento por deformación retrasa el inicio de la estricción. Esto se puede comprender considerando los sucesos involucrados en la formación de

A	B	C	D	E	F	G
Delta 1	P	I	et	epsilon	A	sigma
mm	N	mm				N/mm^2
			Ec. (4-4)	Ec. (8-3)	Ec. (8-1)	Ec. (8-2)
2.0	9 100	27.0	0.080	0.077	37.51	243
4.0	11 200	29.0	0.160	0.148	34.93	321
6.0	12 800	31.0	0.240	0.215	32.87	386
8.0	13 500	33.0	0.320	0.278	30.69	440
10.0	14 000	35.0	0.400	0.336	28.94	484
12.5	14 200	37.5	0.500	0.405	27.01	519

una estricción. En el suceso de la extensión, una incipiente estricción se puede formar en cualquier parte a lo largo de la longitud de calibración, generalmente en un punto no homogéneo, es decir, donde el material es, por cualquier razón, más débil (debido a una irregularidad superficial, una inclusión o un grano grande con orientación débil). Si el valor de n es alto, la deformación localizada en la estricción incipiente incrementa σ_f en este punto [ecuación (8-4)]. La deformación continuará en otras partes de la probeta menos endurecidas por deformación, hasta que el endurecimiento ya no pueda continuar con la pérdida de la capacidad de soporte de carga debida a la reducción de la sección transversal; en este momento, una de las estricciones se estabiliza y prosigue la estricción (Fig. 8-2*a*), mientras que la fuerza aplicada disminuye. Se puede demostrar que, para un material que obedece la ley de potencia del endurecimiento por deformación [ecuación (8-4)], el valor n es numéricamente idéntico a la deformación uniforme

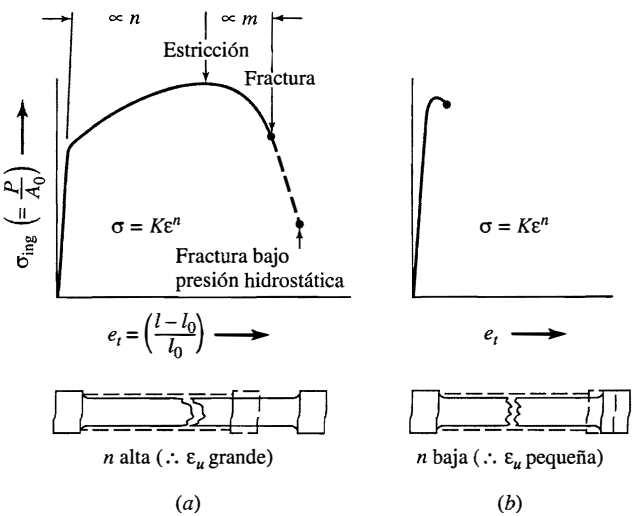


Figura 8-2 (*a*) Una tasa alta del endurecimiento por deformación, como la expresada por un valor elevado de n, provoca en una elongación uniforme grande (preestricción); la deformación posterior a la estricción aumenta con el incremento de la sensibilidad a la tasa de deformación o un valor alto de m, y la fractura se retrasa con presión hidrostática. (*b*) Un material de n baja presenta una estricción temprana, y si m es baja se fractura pronto.

anterior a la estricción expresada como la deformación real ε_u; por lo tanto, un material con n baja sufre estricción poco después de la cedencia inicial (Figs. 8-2*a* y *b*).

Ejemplo 8-2

Verifique si $n = \varepsilon_u$ para el material del ejemplo 4-4.

Por medio de la definición de la ecuación (4-9*a*), la deformación uniforme se puede expresar como una deformación natural $\varepsilon_u = \ln(l_u/l_0)$. A partir del registro en el ejemplo 4-4, $l_u = 25 + 12.5 = 37.5$ mm. Así, $\varepsilon_u = \ln(37.5/25.0) = 0.405$. Esto es menor que el valor $n = 0.45$ determinado en el ejemplo 8-1. Se puede esperar una buena concordancia entre ambos valores para los aceros, pues con frecuencia la concordancia es menos buena para los materiales no ferrosos.

Esfuerzo de fluencia en compresión Un problema con el ensayo de tensión es que la estricción limita la deformación uniforme que se puede obtener, de modo que el desarrollo del esfuerzo de fluencia es incierto a deformaciones mayores. Sin embargo, muchos procesos de trabajo de metales incluyen gran deformación; entonces, el ensayo de compresión (Secc. 4-3) es más útil. El área instantánea de la sección transversal se calcula de nuevo por medio de la invariabilidad del volumen [ecuación (4-2)], pero ahora la longitud se llama, de manera más descriptiva, altura h [ecuación (4-14)]. La deformación ε es, por definición,

$$\varepsilon = \ln \frac{h}{h_0} = \ln \frac{A_0}{A} \qquad \textbf{(8-5a)}$$

El cálculo produce un número negativo. Respecto al material, las deformaciones por compresión y tensión causan los mismos cambios metalúrgicos. De ahí que suele ignorarse la convención, y para obtener un valor positivo se toma la deformación real como el logaritmo natural de la razón *del valor mayor al menor*

$$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h} = \ln \frac{A}{A_0} \qquad \textbf{(8-5b)}$$

De nuevo el esfuerzo real se obtiene de la ecuación (8-2). En realidad, ésta es una presión de interfaz y se puede considerar como el esfuerzo de fluencia sólo si los efectos de la fricción se pueden ignorar (Secc. 9-2-1). Los valores de K y n se pueden extraer de una gráfica logarítmica en ambos ejes de σ_f *versus* ε. Efectivamente, la mayoría de los datos publicados (incluidos aquellos que se dan en las tablas 8-2 y 8-3) se han determinado mediante ensayos de compresión.

Ejemplo 8-3

Encuentre los valores de K y n para el acero del ejemplo 4-9.

Cuando se graficó la curva esfuerzo real/deformación por compresión en el ejemplo 4-9, ya se tenían todos los datos relevantes. Sólo debe calcularse la deformación real con la ecuación (8-5*b*) (los resultados se registran en la tabla del ejemplo 4-9). De la gráfica logarítmica en ambos ejes, $K = 800$ MPa y $n = 0.13$. Note que la capacidad de endurecimiento por deformación, aunque no es tan elevada como para la aleación Cu-Ni del ejemplo 8-1, es aún muy sustancial para esta solución sólida intersticial de C en Fe. El material de prueba estaba ligeramente estira-

do en frío, de aquí que n es menor de lo que sería para el mismo acero recocido (Secc. 8-1-4). (También note que las deformaciones natural y de ingeniería son muy similares a bajas reducciones, pero el valor numérico de la deformación natural se hace cada vez mayor con el incremento de las reducciones.)

Ejemplo 8-4

En cuanto a su efecto en el endurecimiento por deformación, la extensión de una barra de $l_0 = 1$ unidad de longitud a $l = 2$ unidades debe ser igual a la compresión del mismo material de $h_0 = 2$ unidades a $h = 1$ unidad de altura. Calcule las deformaciones de ingeniería y la real correspondientes.

Deformación de ingeniería por tensión [ecuación (4-4*b*)] $e_t = 100(2 - 1)/1 = 100\%$

Deformación por compresión [ecuación (4-16)] $e_c = 100(2 - 1)/2 = 50\%$

Deformación natural, tensión [ecuación (8-3)] $\varepsilon = \ln(2/1) = 0.69$

compresión [ecuación (8-5*a*)] $\varepsilon = \ln(1/2) = -0.69$

Es muy confuso establecer la deformación de ingeniería sin especificar si es por tensión o por compresión porque, para calcular la deformación por tensión, el *cambio en dimensiones* se divide entre la dimensión *menor*; mientras que para la deformación por compresión se divide entre la dimensión *mayor* (véase también el ejemplo 4-8). El valor absoluto de la deformación natural es el mismo para tensión y compresión, lo cual indica correctamente que los efectos de ambas deformaciones son equivalentes sobre el material.

8-1-2 Fluencia discontinua

No todos los metales ni las aleaciones presentan la transición uniforme de la deformación elástica a la plástica analizada hasta ahora, ni endurecen por deformación de manera continua. Tales anomalías en el comportamiento de la fluencia plástica tienen razones estructurales.

Elongación del punto de cedencia En la sección 6-1-2 se menciona la posibilidad de formar soluciones sólidas intersticiales en las cuales los átomos del soluto, mucho más pequeños que los del solvente, caben en los espacios que existen en la retícula básica entre los átomos. Estos átomos del soluto a menudo buscan sitios más confortables, donde los defectos de la retícula han creado vacíos en la estructura. Esto es más notorio en el carbono y el nitrógeno del hierro. Sus átomos son suficientemente pequeños para caber en la retícula; no obstante, tienden a migrar a las dislocaciones donde la distorsión de la retícula proporciona más espacio (justo debajo de la fila extra de átomos en la figura 6-13*c*). En cierto sentido, los átomos solutos forman una *atmósfera condensada* que completa la retícula e inmoviliza, *fija las dislocaciones*.

En el curso de la deformación se debe aplicar un esfuerzo mayor antes de que la dislocación pueda desprenderse de la atmósfera condensada de átomos de carbono o nitrógeno. Ello conduce a la aparición de un *punto de cedencia* en la curva esfuerzo-deformación de los aceros al bajo carbono (Fig. 8-3*a*; sin embargo, note que el pico inicial de la fuerza se debe a interacciones con las propiedades elásticas del equipo de

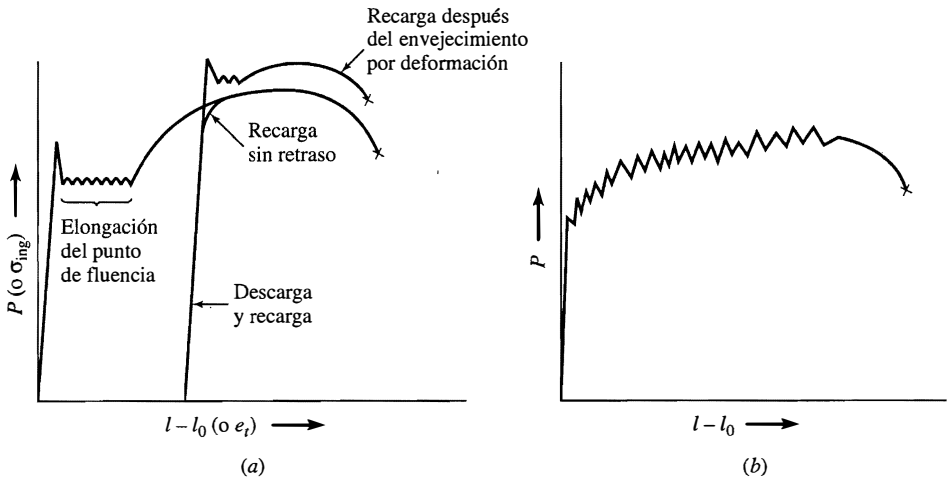


Figura 8-3 (*a*) La elongación del punto de cedencia típica del acero dulce regresa si un acero sometido a envejecimiento por deformación se almacena después de la deformación inicial; (*b*) la fluencia serrada es típica de las aleaciones de solución sólida.

ensayo, por lo tanto, el llamado punto de cedencia superior no es un parámetro real del material). Después de que las dislocaciones se han desprendido de los átomos de fijación, se multiplican y se mueven en grupos grandes en dirección del esfuerzo cortante máximo (muy cercano a 45° respecto a la fuerza aplicada). En condiciones favorables, esta cedencia localizada se hace visible con la apariencia de *líneas de Lüders* o *bandas de deformación* en la superficie de la probeta (Fig. 8-4), pero resulta en censurables marcas de la *deformación de estiramiento* en la superficie de las partes de lámina de metal formadas por estiramiento (Secc. 10-1-1). La generación sucesiva de bandas de deformación continúa sobre toda la longitud de la probeta con un esfuerzo relativamente bajo, provocando la familiar *elongación del punto de cedencia* (Fig. 8-3*a*). Una vez que las bandas de deformación cubren toda la superficie, el comportamiento normal del endurecimiento por deformación tiene lugar.

Si la deformación se interrumpe pero continúa inmediatamente, la curva original del endurecimiento por deformación se une de nuevo. Sin embargo, si se da el tiempo suficiente para que los átomos intersticiales busquen nuevos sitios de dislocación (de manera que las atmósferas de carbono y nitrógeno se condensen de nuevo), el acero se refuerza y el fenómeno del punto de cedencia regresa (línea discontinua en la Fig. 8-3*a*). Este comportamiento se describe como *envejecimiento por deformación.*

Fluencia serrada La fluencia discontinua durante el endurecimiento por deformación se presenta en algunos materiales por causas relacionadas con una sensibilidad negativa a la rapidez de deformación, en vez de que se presenta por fijación de la dislocación. Cuando se prueba en una máquina "suave" (de constante de resorte baja), la cedencia ocurre *en forma escalonada*; en una máquina dura, la fuerza baja errática y rápidamente (*fluencia serrada*) (Fig. 8-3*b*). Ese comportamiento puede ser demasiado

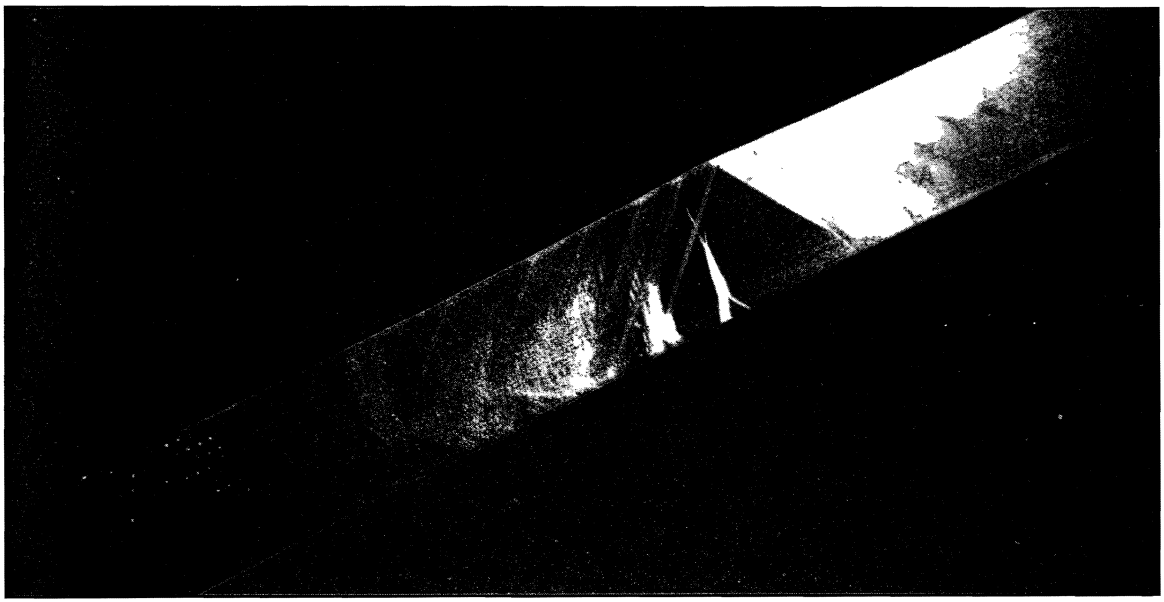


Figura 8-4 El fenómeno del punto de cedencia causa el desarrollo de bandas de cortante visibles, líneas de Lüder, en una tira pulida de acero dulce sometida a tensión. (*Cortesía S. Kadela, University of Waterloo.*)

problemático con algunas aleaciones sustitucionales de aluminio, porque una vez más provoca el desarrollo de marcas visibles e inaceptables en la superficie (Secc. 10-1-2).

8-1-3 Texturas (anisotropía)

En la sección 6-3-1 se analizó (Secc. 6-13) que los cristales se deforman por deslizamiento sobre planos preferidos. Si el cristal que se muestra en la figura 6-13*a* se va a hacer más largo, los planos de deslizamiento deben girar en dirección de la deformación; en la deformación por compresión, los planos de deslizamiento rotan perpendiculares a la dirección de la deformación. Esto tiene consecuencias importantes en los materiales policristalinos, sobre todo cuando sólo está disponible un número limitado de sistemas de deslizamiento. Antes de la deformación, las propiedades serán *isotrópicas* (iguales en todas direcciones), y representan el promedio de las propiedades de los cristales orientados de forma aleatoria. La deformación causa una elongación de los granos y dentro de ellos, la rotación de los planos de deslizamiento. En consecuencia, hay una alineación notoria (*orientación preferida* o *textura*) de las orientaciones cristalográficas (Fig. 8-5*a*). Un material policristalino que posee una textura presentará algunas propiedades direccionales típicas de cristales individuales. Esta *direccionalidad* o *anisotropía* de las propiedades (dependencia en la dirección del ensayo) es evidente en las variaciones del módulo elástico, YS, TS, elongación (Fig. 8-5*b*) y otras propiedades. Se puede explotar para propósitos especiales. De esta manera, las láminas de acero

al silicio (3Si-0.003C) se procesan con el fin de alinear el borde del cubo a lo largo de la dirección de laminación y así optimizar las propiedades magnéticas para los núcleos de los transformadores. Más relevante para el trabajo de metales es que las magnitudes relativas de las deformaciones también cambian durante la deformación.

Anisotropía de la deformación El principio de la invariabilidad del volumen [ecuación (4-2)] se puede expresar en términos de la deformación unitaria natural: la suma de las tres deformaciones principales *reales* es igual a cero

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \qquad \textbf{(8-6)}$$

Recuerde que la deformación real es el logaritmo natural de la nueva dimensión dividida entre la dimensión anterior [ecuaciones (8-3) y (8-5*a*)]. En un ensayo de tensión, la deformación principal (de tensión) ε_1 es positiva, mientras que las deformaciones transversales (de compresión) ε_2 y ε_3 son negativas. Por conveniencia, es usual hablar de longitud de deformación ε_l, ancho de deformación ε_w, y espesor de deformación ε_t (Fig. 8-5*c*). Entonces

$$\varepsilon_l + \varepsilon_w + \varepsilon_t = 0 \qquad \textbf{(8-7)}$$

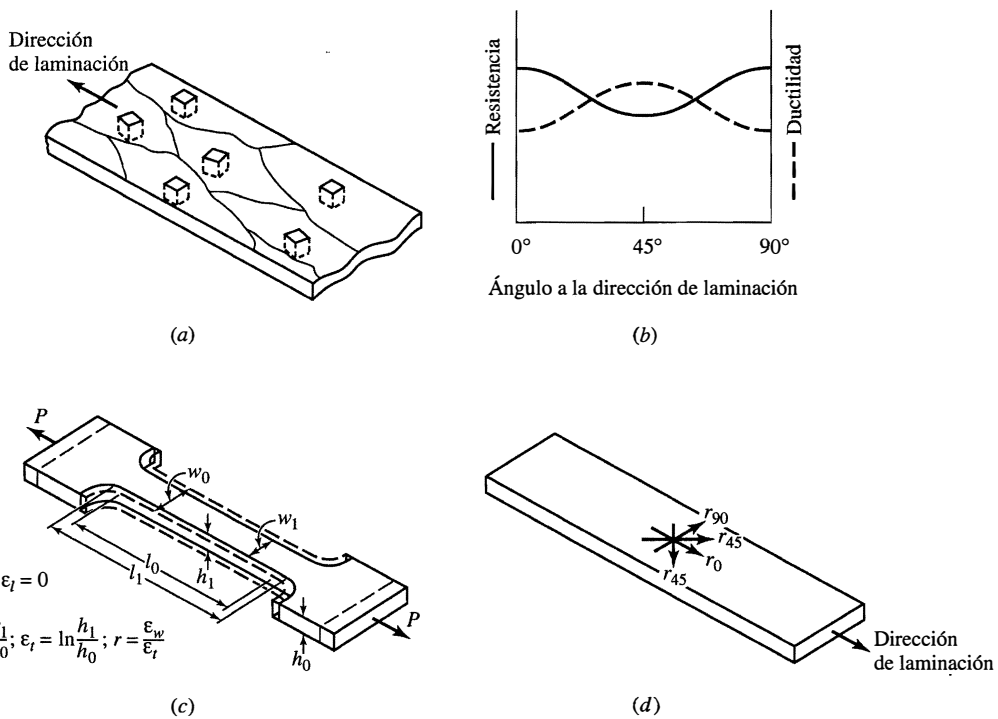


Figura 8-5 El desarrollo de una textura (*a*) se refleja en variaciones de las propiedades mecánicas (*b*). Los efectos de la anisotropía en la deformación de un material se determinan en ensayos de tensión (*c*), las cuales se repiten en direcciones diferentes relativas a la dirección de laminación (*d*).

Esta relación siempre es válida, pero no es necesario que ε_w y ε_t tengan igual magnitud. Por convención, las magnitudes relativas de las deformaciones transversales se expresan con el *valor r*, el cual es la razón del ancho de la deformación respecto a su espesor

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \tag{8-8}$$

Tipos de anisotropía Existen varias posibilidades:

1. Cuando el material es *isotrópico*, $\varepsilon_w = \varepsilon_t$, y $r = 1$. No importa si la probeta se corta en dirección de laminación, a través de ella, o en un ángulo intermedio (Fig. 8-5*d*); en un material isotrópico

$$r_0 = r_{90} = r_{45} = 1 \tag{8-9a}$$

2. Es factible que los valores de r varíen en relación con la dirección de laminación.

$$r_0 \neq r_{90} \neq r_{45} \tag{8-9b}$$

Esto se denomina *anisotropía planar* y provoca problemas como el olaneado en el embutido profundo (Secc. 10-6-2).

3. Si los valores de r medidos en el plano de la lámina son idénticos en todas direcciones, pero son distintos de la unidad

$$r_0 = r_{90} = r_{45} \lessgtr 1 \tag{8-9c}$$

se habla de *anisotropía normal*, porque la deformación de la probeta de ensayo en dirección del espesor (normal a la superficie de la lámina) es mayor o menor que en dirección del ancho.

4. Es posible y resulta común que las anisotropías normal y planar ocurran en forma simultánea.

$$r_0 \neq r_{90} \neq r_{45} \neq 1 \tag{8-9d}$$

Para separar las dos clases de anisotropía, se puede definir una r media, denotada $\bar{r}$ o r_m

$$r_m = \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{4} \tag{8-9e}$$

como una medida de la anisotropía normal (con frecuencia, el símbolo r se usa libremente para denotar $\bar{r}$ o r_m). Una medida de la anisotropía planar es Δr

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2} \tag{8-9f}$$

Ejemplo 8-5

El proveedor de una lámina de acero proporcionó los valores siguientes: $r = 1.70$ y $\Delta r = 0.64$. Se sabe que r es la misma en las direcciones de laminación y transversal, y que tiene un valor elevado. Encuentre r_0, r_{90}, y r_{45}.

$$\Delta r = 0.64 = (2r_0 - 2r_{45})/2; \quad 0.64 = r_0 - r_{45}$$
$$r_0 = r_{90} = 1.700 + 0.32 = 2.02; \quad r_{45} = 1.70 - 0.32 = 1.38$$

Anisotropía de materiales en lámina El desarrollo de la textura depende en gran parte de la estructura cristalina.

1. En los materiales hexagonales, el número limitado de sistemas de deslizamiento provoca el desarrollo de una textura después de deformaciones relativamente pequeñas (20-30%), con la mayoría de los planos basales alineados perpendicularmente a la aplicación de la fuerza de laminación; es decir, casi paralelos a la superficie de la lámina. Cuando se alarga una probeta para ensayo de tensión cortada de esa lámina, la deformación es muy anisotrópica.

a. En los materiales hcp con una *razón c/a elevada*, el deslizamiento se limita a los planos basales (Fig. 6-2*c*), de esta manera, el espesor de la lámina se reduce, mientras que su ancho se afecta muy poco, al igual que un paquete de naipes se puede alargar deslizándolos uno sobre otro (Fig. 8-6*a*). El valor r se hace muy pequeño, por lo general 0.2 para el zinc.

b. La deformación de una probeta de tensión cortada de un material hcp con una *razón c/a baja* presenta un comportamiento drásticamente diferente. Como ahora el deslizamiento tiene lugar en planos prismáticos y/o piramidales (Fig. 6-2*d*), el espesor de la lámina se reduce muy poco; en vez de ello, la mayor parte de la deformación ocurre por el reacomodo de los prismas hexagonales, resultando en una marcada reducción en el ancho de la probeta (Fig. 8-6*b*). El valor r podría, teóricamente, alcanzar el infinito, pero en la práctica rara vez excede 6, el correspondiente al titanio.

2. Los metales de estructura fcc poseen muchos sistemas de deslizamiento equivalentes (Fig. 6-2*a*); por lo tanto, sólo mucho después —por lo general luego de una

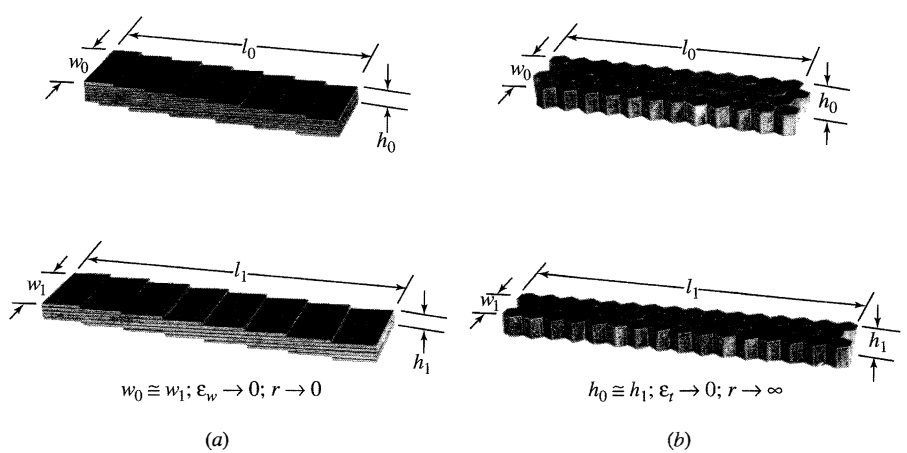


Figura 8-6 Deformación de metales hexagonales: (*a*) una razón c/a grande ocasiona el deslizamiento basal y un bajo valor de r; (*b*) una relación c/a pequeña causa un deslizamiento prismático y un alto valor de r.

reducción de más de 50%— desarrollan una textura. Un material fcc policristalino orientado completamente de manera aleatoria es casi isotrópico ($r = 1$). Sin embargo, después de la deformación, el valor r puede bajar, de modo que muchas aleaciones de aluminio tienden a tener $0.4 < r < 0.8$.

3. La dirección común de deslizamiento en los materiales bcc (Fig. 6-2*b*) se puede explotar por medio de un procesamiento apropiado para obtener valores r que varíen desde 0.8 hasta más de 2.

Ejemplo 8-6

Se conduce un ensayo de tensión en una probeta de lámina (como se muestra en la Fig. 8-5*c*) de $l_0 = 50.0$ mm, $w_0 = 6.0$ mm y $h_0 = 1.00$ mm. El ensayo se interrumpe antes del inicio de la estricción; en este momento, $l_1 = 60.0$ mm y $w_1 = 5.42$ mm (es difícil medir el espesor h_1 con suficiente exactitud). Calcule el valor r.

Se puede calcular el espesor promedio a través de la invariabilidad del volumen, o se puede obtener ε_t de la ecuación (8-7):

$$\varepsilon_t = -\varepsilon_l - \varepsilon_w = -[\ln (60/50)] - [\ln (5.42/6.00)] = -0.1823 + 0.1017 = -0.0806$$

$$r = (-0.1017)/(-0.0806) = 1.26$$

8-1-4 Efectos del trabajo en frío

Es obvio que en la figura 8-1 se necesita un esfuerzo real cada vez mayor para continuar la deformación de un metal. Como esto es una consecuencia directa del trabajo o de la deformación, se habla de *endurecimiento por trabajo* o *endurecimiento por deformación*. La razón de ello se encuentra en el mecanismo de la deformación plástica.

En la sección 6-3-1 se vio que los metales cristalinos se deforman por deslizamiento y, en la escala atómica, por la propagación y multiplicación de las dislocaciones (Fig. 6-13). El deslizamiento ocurre en los planos y direcciones compactas (Fig. 6-2); el análisis de la figura 6-2 demostrará que hay un número de *sistemas de deslizamiento* equivalentes en cada estructura cristalina. A medida que la deformación procede, las dislocaciones pueden comenzar a moverse en varios sistemas. Se requiere un esfuerzo mayor para trasladar una sucesión de dislocaciones sobre el mismo plano y se necesita un esfuerzo mucho mayor para moverlas una vez que se enredan las dislocaciones que se propagan sobre los diferentes planos. Este esfuerzo mayor es la causa del incremento en el esfuerzo de fluencia. La distorsión de la retícula cristalina por átomos extraños inhibe aún más el movimiento libre de las dislocaciones e incrementa el endurecimiento por deformación; por lo tanto, las soluciones sólidas tienen un valor n mayor. Como esto proporciona una deformación mayor antes de la estricción, las *soluciones sólidas tienen una ductilidad elevada.*

Un material sometido al trabajo en frío, por ejemplo por laminación o embutido, también se endurece por deformación. La densidad de dislocaciones se incrementa y cuando se realice un ensayo de tensión en el material, se necesitará un esfuerzo mayor para iniciar y mantener la deformación plástica; de esta manera, el YS se incrementa.

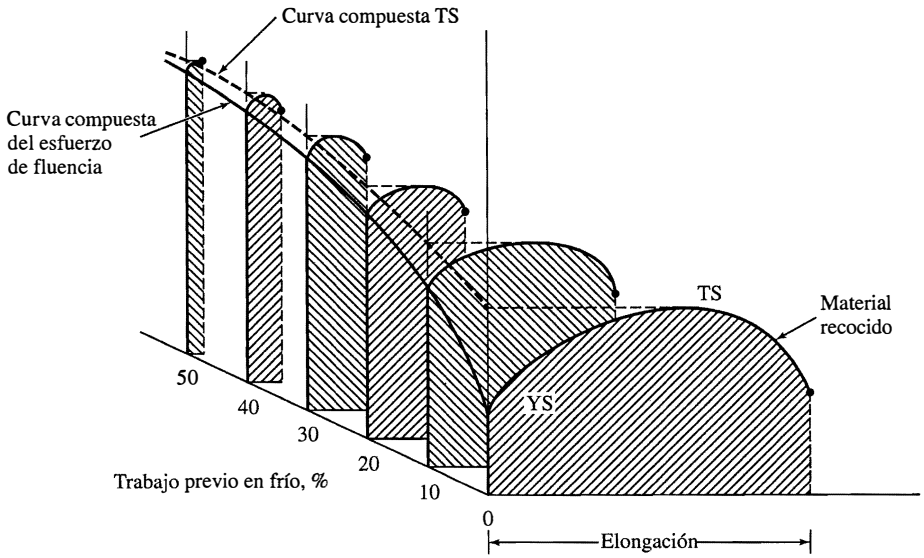


Figura 8-7 Los ensayos de tensión realizados en un material previamente trabajado demuestran que el trabajo en frío incrementa la resistencia y reduce la ductilidad.

La TS aumenta también, aunque no tan rápidamente como el YS, y la razón TS/YS tiende a la unidad (Fig. 8-7). Sin embargo, la ductilidad del material, expresada por la elongación y la reducción totales del área, disminuye debido a la densidad inicial elevada de dislocaciones. En forma similar, K sube y n disminuye. También la microestructura cambia: los cristales (granos) se alargan en dirección de la deformación mayor. Estos cambios se resumen en la figura 8-8*a*. El material también puede desarrollar propiedades direccionales, como se vio en la sección 8-1-3.

El endurecimiento por deformación es importante por varias razones. Puesto que muchos materiales trabajados en frío retienen un nivel razonable de ductilidad, el trabajo en frío ofrece al diseñador un método de bajo costo para obtener materiales de resistencia elevada. Sin embargo, existe un precio que hay que pagar: el incremento del esfuerzo de fluencia puede generar presiones excesivas en las herramientas, y la reducción de la ductilidad puede causar la fractura de la pieza de trabajo. Esto se transforma en un problema importante cuando se van a realizar grandes reducciones, o cuando la manufactura de productos incluye una sucesión de pasos de trabajo en frío. Entonces, es necesario remover los efectos del trabajo en frío por medio del recocido.

Ejemplo 8-7

Los efectos del trabajo en frío se demuestran muy bien en las propiedades del latón Cu-30Zn. Como se indicó en el ejemplo 6-7, éste fue el material tradicional para los casquillos de los cartuchos, aunque se usa para muchos otros propósitos, sobre todo en la forma de lámina. Se abastece en varios "temples" laminados.

De *Metals Handbook*, 9a. ed., vol. 2, p. 324:

Revenido	Reducción de laminado, %	YS, MPa	TS, MPa	el., %	Dureza, HRB
H01 (1/4 duro)	10.9	275	370	43	55
H02 (1/2 duro)	20.7	360	425	23	70
H04 (duro)	37.1	435	525	8	82
H06 (extra duro)	50.1	450	595	5	83
H08 (resorte)	60.5		650	3	91
H10 (extra resorte)	68.6		680	3	93

8-1-5 Recocido

El recocido se define como el tratamiento térmico que abarca el calentamiento hasta (y mantenimiento de) una temperatura elevada (Secc. 6-4-1). Cuando su propósito es la eliminación de los efectos del trabajo en frío en el producto terminado, se habla simplemente de *recocido*. Cuando el fin es el ablandamiento de una pieza para el trabajo en frío posterior, se trata del *recocido de proceso*. Ambos incluyen fundamentalmente el mismo proceso metalúrgico.

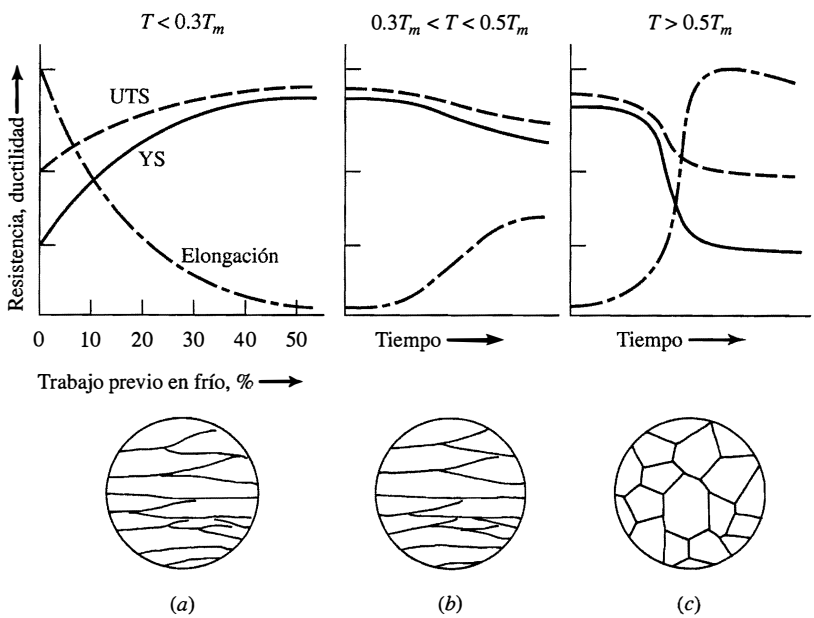


Figura 8-8 Los efectos del trabajo previo en frío (*a*) se eliminan parcialmente por recuperación (*b*), y la condición original suave se restablece de manera total por medio de la recristalización (*c*).

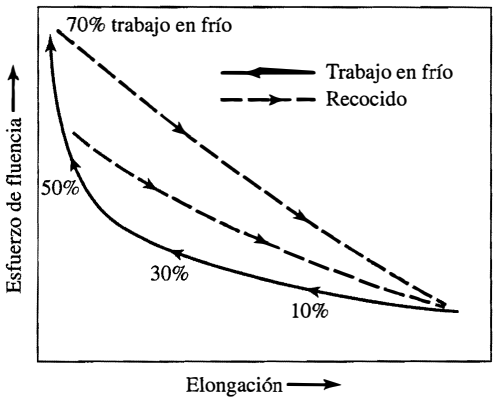


Figura 8-9 El trabajo en frío seguido por un recocido parcial puede producir una ductilidad relativamente elevada, combinada con una buena resistencia. (*De J. A. Schey, en Techniques of Metals Research, R. F. Bunshah (ed.), vol. 1, pt. 3, Interscience, 1968, p. 1415. Con permiso.*)

Recuperación En la sección 4-6 se introdujo el concepto de la temperatura homóloga y se indicó que la resistencia de muchos materiales disminuye por arriba de $0.5T_m$. Una de las razones es que las elevaciones mayores de la temperatura permiten que los átomos se muevan a los sitios vacantes (Secc. 6-1-2) y de esta manera cambian lugar con relativa facilidad. Aun antes de que se alcance esta temperatura, la movilidad atómica incrementada permite el reacomodo de las dislocaciones en arreglos regulares (por lo general, a temperaturas de $0.3\text{-}0.5T_m$). Si se da un tiempo suficiente, esa *recuperación* restaura algo de la suavidad original sin cambiar la estructura visible del grano (Fig. 8-8*b*). Esto ofrece algunos beneficios especiales: en la mayor parte de los metales la ductilidad baja rápidamente, incluso con un grado pequeño de trabajo en frío (Fig. 8-8*a*, y línea continua en la Fig. 8-9), mientras que la recuperación la eleva sin afectar en gran medida la resistencia (línea discontinua en la Fig. 8-9). Por lo tanto, el *recocido de recuperación* es un método útil para producir un material de resistencia mayor pero de ductilidad razonable. También restaura la conductividad eléctrica, lo cual es importante para los alambres de eléctricos.

Ejemplo 8-8

Algunas aleaciones de aluminio se suavizan poco a poco a temperatura ambiente y se estabilizan por un tratamiento térmico a baja temperatura (temple H3). Del *Metals Handbook*, 9*a*. ed., vol.2, p. 102:

	YS, MPa	TS, MPa	el., %
5056-O (recocido)	152	290	35
5056-H18 (completamente dura)	407	434	10
5056-H38 (recocido de recuperación)	345	414	15

El incremento de la ductilidad puede parecer muy poco, pero con frecuencia un material tratado por recocido de recuperación permite que se lleven a cabo procesos de trabajo de lámina metálica con dificultad crítica.

Recristalización Arriba de $0.5T_m$ los átomos se mueven y se difunden para formar núcleos relativamente libres de dislocaciones, que crecen hasta que toda la estructura trabajada en frío se recristaliza. La difusión depende en gran medida del tiempo y de la temperatura (Fig. 8-8*c*). Normalmente se obtiene una estructura equiaxial, con un tamaño de grano que es una función del trabajo previo en frío, de la temperatura de recocido y del tiempo.

La fuerza de accionamiento para la *recristalización* la proporciona el incremento en el contenido de energía (*energía almacenada*) que resulta de la densidad de dislocación mayor inducida por el trabajo en frío. Por lo tanto, la recristalización comienza a una temperatura tanto menor con un aumento del *trabajo en frío previo* (Fig. 8-10). Se sabe que un material de grano grueso tiene baja resistencia (Secc. 6-3-6), de ahí que por lo general el objetivo sea producir un grano más fino. Esto se puede lograr aumentando el trabajo en frío porque, para cualquier temperatura dada, se forman más núcleos y disminuye el tamaño del grano. La resistencia se incrementa con poca pérdida de la ductilidad (véase el ejemplo 6-13). Por supuesto que no puede haber recristalización si el trabajo en frío es cero y se conserva el tamaño original del grano. Las bajas densidades de dislocación inducidas por un trabajo en frío muy ligero (digamos de 2 a 4%)

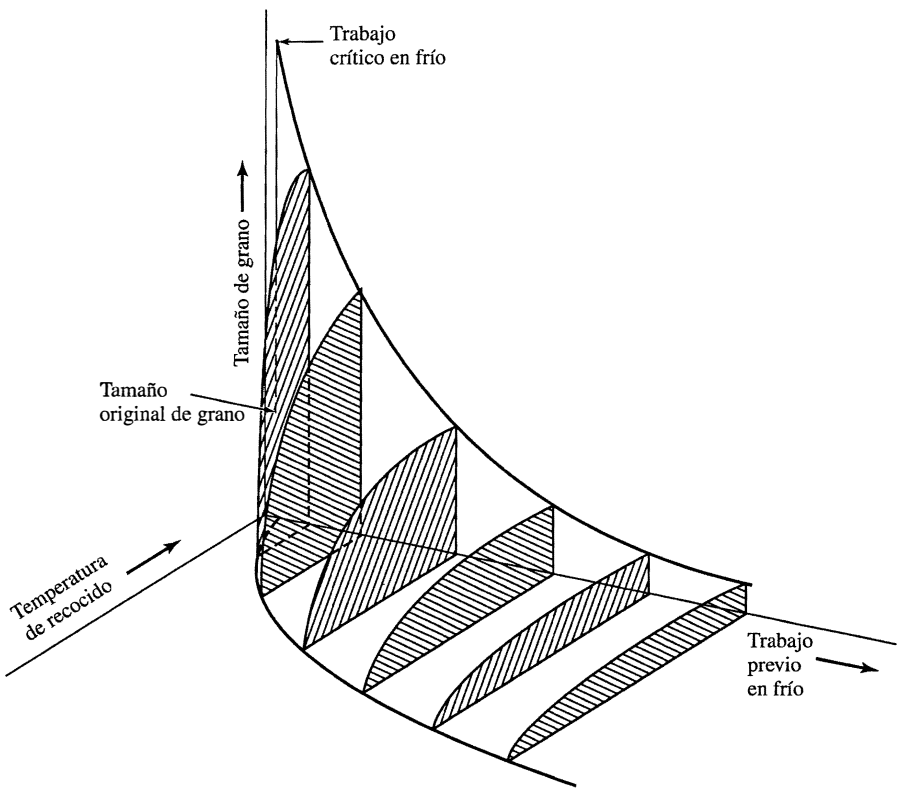


Figura 8-10 La recristalización comienza a temperaturas menores y el tamaño de grano recristalizado disminuye incrementando el trabajo previo en frío.

causan la formación de sólo algunos núcleos, los cuales pueden crecer hasta un gran tamaño. Ese *trabajo crítico en frío* es indeseable debido a las malas propiedades mecánicas de las estructuras de grano grueso. En el extremo opuesto del espectro, un grano muy fino, obtenido al recocer un metal muy trabajado en frío, proporciona resistencia elevada pero una ductilidad razonable (véase ejemplo 6-13). Se debe notar que el recocido no necesariamente restaura la isotropía; la textura de la deformación se puede reemplazar simplemente con una textura de recocido.

La temperatura de $0.5T_m$ se debe tomar sólo como una guía aproximada, ya que incluso cantidades menores de los elementos de aleación pueden retrasar en forma sustancial la formación de nuevos granos y así elevar la temperatura de recristalización. En las aleaciones diseñadas específicamente para el servicio a temperatura elevada, como las superaleaciones, la gran cantidad de aleantes propicia el inicio de la recristalización hasta alrededor de $0.8T_m$ (véase el ejemplo 6-9).

Cuando un metal se mantiene a cierta temperatura durante un tiempo prolongado, crecen granos mayores —los cuales tienen un área menor de superficie por unidad de volumen, y por tanto una menor energía de superficie— a costa de los menores. Ese *crecimiento de grano* es, en general, indeseable porque la resistencia disminuye, y si es excesivo, también la ductilidad.

A la recuperación y a la recristalización se les denomina colectivamente *procesos de ablandamiento* o *procesos de restauración*.

8-1-6 Trabajo en caliente

Se ha mencionado que las temperaturas arriba de $0.5T_m$ facilitan mucho la difusión de los átomos. Esto significa que una dislocación retenida tiene la opción de ascender, y de esta manera puede moverse hacia otro plano atómico no obstruido. Por lo tanto, si la deformación en sí ocurre a temperaturas tan elevadas, muchas dislocaciones pueden desaparecer de inmediato; de hecho, los procesos de ablandamiento trabajan simultáneamente con la propagación de la dislocación. El material que resulta de ese *trabajo en caliente* tiene una densidad de dislocación mucho menor, así que se endurece menos por deformación que el material trabajado en frío.

En la práctica, el trabajo en caliente se realiza a temperaturas elevadas, en donde los procesos de ablandamiento son rápidos, pero no tan elevadas para que representen un peligro de fusión incipiente (por lo general entre $0.7T_m$ y $0.9\,T_m$).

Mecanismos del trabajo en caliente Como $0.5T_m$ también es la temperatura de recristalización, a menudo se dice que el trabajo en caliente se lleva a cabo arriba de ésta. Sin embargo, la recristalización *durante* el trabajo en caliente (*recristalización dinámica*) de ningún modo es universal; en muchos materiales la *recuperación dinámica* sucede durante el trabajo, causando esfuerzos de fluencia muy bajos. La recristalización todavía puede ocurrir al mantener o enfriar la temperatura respecto a la temperatura de trabajo en caliente. Así, la marca distintiva del trabajo en caliente no es una estructura recristalizada, sino la ocurrencia simultánea de la propagación de la dislocación y de los procesos de ablandamiento, *con o sin recristalización durante el trabajo*. El mecanismo dominante depende de la temperatura, de la rapidez de deformación y del tama-

ño del grano y puede mostrarse convenientemente en los mapas de mecanismos de deformación. En general, la estructura recristalizada se hace más fina a una temperatura de deformación menor y a una mayor rapidez de enfriamiento; a menudo material de propiedades superiores controlando la temperatura de acabado.

Esfuerzo de fluencia en el trabajo en caliente Como todos los procesos de ablandamiento requieren el movimiento de átomos, el tiempo disponible es crítico. Esto significa que en el trabajo en caliente existe una sustancial *sensibilidad a la tasa de deformación*. Ya se indicó que la tasa de deformación no se debe confundir con la velocidad de deformación (Secc. 4-6). En su definición más simple, la tasa de deformación es la velocidad instantánea de deformación dividida entre la longitud instantánea o altura de la pieza de trabajo [ecuación (4-17)]. Para la deformación por compresión (Fig. 4-11)

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{h} \qquad \textbf{(8-10)}$$

De nuevo, $\dot{\varepsilon}$ se expresa en unidades de s^{-1}.

Para encontrar el esfuerzo de fluencia de un metal, las probetas se calientan a una temperatura constante y luego se comprimen (o se ensayan en tensión) a una rapidez constante de deformación constante, en máquinas cuya velocidad del cabezal cambia de manera controlada para mantener $\dot{\varepsilon}$ [ecuación (8-10)] también constante.

Ejemplo 8-9

Se va a determinar el esfuerzo de fluencia de metales comprimiendo cilindros de 20 mm de altura con tasas constantes de deformación. Calcule la velocidad necesaria de la prensa en compresión para lograr una reducción de 60% en la altura a $\dot{\varepsilon} = 5\ s^{-1}$.

De acuerdo con la ecuación (8-10), la velocidad de la prensa debe disminuir cuando la altura decrece a su nivel final de 8 mm.

Altura, mm	Velocidad de la prensa, mm/s
20	100
16	80
12	60
8	40

De los registros de la fuerza contra desplazamiento, se grafican curvas esfuerzo-deformación unitaria, las cuales pueden mostrar una variedad de tendencias (Fig. 8-11*a*):

1. Después de un pico inicial, el esfuerzo de fluencia baja y se incrementa la deformación. Ese *suavizado por deformación* usualmente es un signo de la recristalización dinámica.
2. La curva esfuerzo-deformación puede ser muy plana después de una fluencia inicial, lo que indica que los procesos del endurecimiento por deformación y por suavizado casi se equilibran uno al otro.

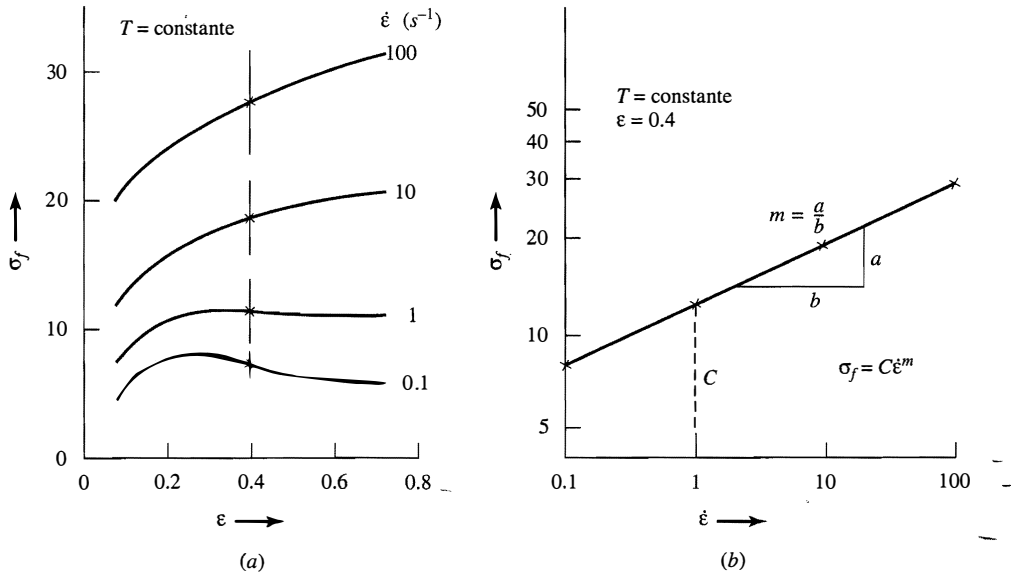


Figura 8-11 El trabajo en caliente procede con endurecimiento y ablandamiento simultáneos. (*a*) El esfuerzo de fluencia es sensible a la tasa de deformación y (*b*) para una temperatura y deformación dadas, a menudo es una función de potencia de la tasa de deformación.

3. A mayor tasa de deformación, los esfuerzos y la propia deformación se elevan, lo cual es signo de que los procesos de suavizado no pudieron mantener el ritmo con el endurecimiento por deformación.

En una primera aproximación, se puede considerar que el trabajo en caliente está gobernado sólo por la tasa de deformación. Luego, los valores del esfuerzo de fluencia para una deformación dada se pueden extraer de las curvas esfuerzo real-deformación unitaria real (Fig. 8-11*a*) y volver a graficar como una función de la tasa de deformación en una escala doblemente logarítmica (Fig. 8-11*b*). En la mayor parte de los casos, la línea que se define de esta manera es recta, lo que significa que el esfuerzo de fluencia en el trabajo en caliente es una función de potencia de la tasa de la deformación $\dot{\varepsilon}$:

$$\sigma_f = C\dot{\varepsilon}^m \qquad \textbf{(8-11)}$$

donde C es un *coeficiente de la resistencia*, y m el *exponente de la sensibilidad a la tasa de deformación*. El valor de C se determina en una tasa unitaria de deformación y m es la pendiente de la línea, medida de nuevo en una escala lineal (Fig. 8-11*b*). En forma alterna, se ajusta una función de potencia a los puntos de entrada. En la figura 8-11*a* es evidente que se determinarán valores distintos de C y m para deformaciones diferentes. Tanto C como m cambian con la temperatura, cuya elevación incrementa la sensibilidad a la rapidez de la deformación y por lo tanto a m, pero siempre disminuyen el esfuerzo de fluencia y C. [*Nota*: la forma completa de la ecuación (8-11) incluiría $\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$; con $\dot{\varepsilon}_0 = 1$, se obtiene la forma universalmente usada de la ecuación (8-11).]

Ejemplo 8-10

Calcule C y m para el material que se muestra en la figura 8.11, suponiendo que σ_f se da en MPa.

De la gráfica en la figura 8-11*b*, $C = 11.8$ MPa (recuerde leer en la escala logarítmica) y $m = 7.5/17 = 0.44$ (no olvide leer en la escala lineal). Este valor elevado de m indica un material superplástico.

Para propósitos de cálculo se deben emplear los valores de C y m determinados experimentalmente (por ejemplo, de las tablas 8-2 y 8-3) o de las curvas del esfuerzo de fluencia. Sin embargo, vale la pena notar que el tiempo y la temperatura son equivalentes en sus efectos sobre el suavizado. Por lo tanto, algunas veces es posible expresar todos los valores del esfuerzo de fluencia del trabajo en caliente, en una sola curva que es una función de una *temperatura modificada por la velocidad* (o *por la tasa de deformación*) *modificada.*

Al analizar el esfuerzo de fluencia del trabajo en frío [ecuación (8-4)] se hizo la suposición tácita de que los efectos de la tasa de deformación podrían ignorarse (es decir, $m = 0$). Esto no es del todo cierto; una descripción más completa de la respuesta de los metales incluiría tanto la deformación como la tasa de deformación. La sensitividad a la tasa de deformación se eleva con el incremento de la temperatura homóloga y de manera repentina cuando se alcanza la temperatura del trabajo en caliente. Los valores usuales del exponente de la sensibilidad a la tasa de deformación son:

Trabajo en frío	$-0.05 < m < 0.05$
Trabajo por calor	$0.05 < m < 0.3$
Superplasticidad	$0.3 < m < 0.7$
Fluido newtoniano	$m = 1$

Trabajo en tibio La deformación de $0.3T_m$ a $0.5T_m$ a menudo se denomina como *trabajo en tibio*, y se caracteriza por un endurecimiento reducido por deformación, un incremento de la sensibilidad a la tasa de deformación y un esfuerzo de fluencia un poco menor, respecto al trabajo en frío.

Ductilidad Un valor elevado de m significa que se necesitan esfuerzos muy superiores para deformar el material a mayor tasa de deformación. Esto se traduce en una elongación total mayor por la siguiente razón:

Cuando en el curso de un ensayo de tensión se empieza a formar una estricción, ésta es la sección transversal más pequeña de la probeta. En un material no sensible a la tasa de deformación, también sería la parte más débil y se adelgazaría y fracturaría. Los sucesos toman un giro diferente en un material con valor positivo de m. Como la deformación se concentra en la estricción, su longitud instantánea en la ecuación (4-17) baja repentinamente (véanse las Figs. 4-2 y 4-5). La tasa de deformación en la estricción es mucho más alta que antes de ésta, y disminuye a cero fuera de la zona de estricción. En consecuencia [ecuación (8-11)], incrementa el esfuerzo de fluencia del material en la estricción, la cual resiste una deformación adicional. Es decir, el material adyacente se

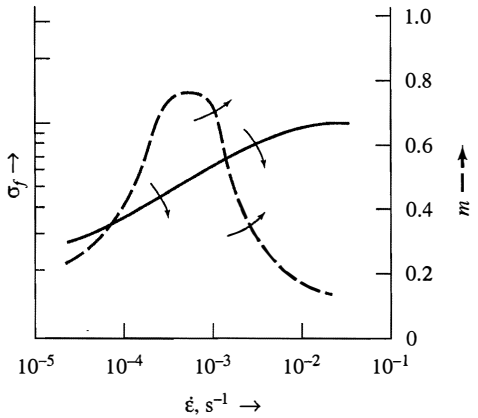


Figura 8-12 Algunos materiales de grano muy fino presentan superplasticidad, con valores muy altos de m dentro de un intervalo limitado de la tasa de deformación. Las flechas indican los efectos de la disminución del tamaño de grano o del incremento de la temperatura.

deforma y las localizaciones posteriores se adelgazan hasta que toda la longitud de calibración se deforma (Fig. 4-16). Así, la elongación total se eleva con un mayor valor de n (exponente del endurecimiento por deformación), el cual gobierna la *deformación previa a la estricción*; y también con uno más grande de m (exponente de la sensibilidad a la tasa de la deformación), que gobierna la *deformación posterior a la estricción* (Fig. 8-2*a*). Esto será particularmente importante en operaciones del tipo de estirado (Seccs. 10-5 y 14-4).

Superplasticidad En algunos materiales de granos extremadamente finos (a menudo aleaciones con una *estructura microdúplex* de dos fases), la deformación a temperatura elevada ocurre debido al extenso deslizamiento de las fronteras de grano y por la difusión acompañante (esencialmente, por granos completos deslizándose rebasándose unos a otros), o a causa de la difusión de masa, la cual reforma granos completos. Las fuerzas de deformación pueden ser muy bajos; siempre que se conserve la tasa de deformación en los límites que permiten estos mecanismos (Fig. 8-12), el comportamiento superplástico se mantiene y se obtienen fácilmente valores muy grandes de la elongación (porcentajes hasta de varios cientos e incluso de miles). Por lo tanto, a estos metales se pueden aplicar las técnicas desarrolladas para la formación de polímeros (Secc. 14-4).

Después de enfriarse a partir de la temperatura superplástica, muchas aleaciones desarrollan una resistencia sustancial. Sin embargo, los mismos mecanismos que permiten la deformación superplástica son responsables de la escasa resistencia a la termofluencia de los materiales de grano fino (Secc. 6-3-6). Así, las partes deformadas superplásticamente pueden ser adecuadas para el servicio a temperatura elevada por medio de un recocido a alta temperatura. Los granos gruesos formados de esta manera tienen un área relativamente pequeña de frontera de grano y ofrecen mayor resistencia a la

termofluencia a una tasa baja de deformación (Fig. 6-18). Esta secuencia del proceso es la base del Gatorizing,®[1] un proceso patentado para hacer discos de turbina superaleados.

8-1-7 Interacciones entre la deformación y la estructura

Hasta ahora se ha supuesto de manera tácita que la pieza de trabajo es homogénea. Esto puede estar lejos de la realidad, así que se pueden explotar las interacciones de los procesos de deformación con las características estructurales, a fin de controlar las propiedades de servicio de los materiales.

Destrucción de la estructura fundida La estructura de los lingotes o palanquillas fundidos presenta una variedad de características indeseables. Los granos y el espaciamiento de los brazos de las dendritas dentro de ellos tienden a ser grandes, por lo que la resistencia es baja; los granos columnares (Fig. 7-1*a*) pueden estar orientados en direcciones desfavorables, reduciendo aún más la resistencia y la ductilidad en algunas direcciones. Usualmente existen gradientes de concentración, lo cual es evidente ante la microsegregación (segregación intragranular, Fig. 6-9) y la macrosegregación (Fig. 7-4). La microporosidad, típica de la solidificación dendrítica (Fig. 7-1*b*) se presenta con frecuencia e incluso puede existir un gran rechupe (Fig. 7-1*a*). Los agujeros de alfiler y las sopladuras pueden permanecer como resultado de la descomposición del gas durante la solidificación (Fig. 7-4*a* y Secc. 6-3-5).

El trabajo en caliente es el método más poderoso para eliminar características dañinas porque:

1. El movimiento forzado de los átomos favorece la recristalización y la ecualización de la composición. De esta manera, el grano se refina y se acelera la homogeneización. Se ha determinado que se requiere una reducción mínima de 75% ($\varepsilon > 1.4$) para destruir la estructura fundida. Si resulta necesario, se puede invertir la dirección de la deformación para acumular la deformación necesaria sin un cambio general de la forma (*procesamiento de trabajo redundante*).

Ejemplo 8-11

Un rotor de un generador eléctrico se forja de un lingote fundido de 1 500 mm de diámetro y 3 000 mm de longitud. Para asegurar la integridad del rotor, se debe impartir un trabajo en caliente de 75%, pero su forma requiere que se mantengan las dimensiones originales. Encuentre un método para acumular el trabajo preciso.

En el ejemplo 8-4 se determinó que comprimir axialmente un cilindro de 2 unidades de altura y 1 unidad de diámetro a la mitad de su altura, imparte una deformación $\varepsilon = -0.69$. Así, se puede comprimir hasta 1 500 mm y luego estirar (véase la sección 9-2-3) la pieza de trabajo hasta sus dimensiones originales, imponiendo de nuevo una deformación $\varepsilon = 0.69$. En términos de su efecto en la estructura, las deformaciones por compresión y por tensión son equivalentes, de ahí que la deformación total sea $\varepsilon = 0.69 + 0.69 = 1.38$. (El ejemplo está muy simplificado e ignora las complicaciones introducidas por la deformación no homogénea.)

---

[1] Marca comercial registrada de Pratt & Whitney, United Technologies.

2. Los poros se comprimen hasta que sus paredes se tocan; si las presiones y las temperaturas son lo suficiente elevadas, la adhesión y la soldadura de estado sólido eliminan en forma efectiva el poro como un defecto (al menos si sus paredes originalmente estaban libres de contaminantes). Sin embargo, es probable que las grietas orientadas en dirección de la aplicación del esfuerzo se abran en vez de corregirse.

3. La deformación extiende mucho las películas de óxidos y otros contaminantes internos. Las consecuencias dependen de la naturaleza de las inclusiones.

a. Las inclusiones *frágiles* se rompen en piezas pequeñas, alrededor de las cuales puede tener lugar la soldadura por presión. De esta manera, aunque las inclusiones permanecen en el material, se pueden hacer inofensivas desde el punto de vista de las propiedades mecánicas. Esto también es cierto para las películas de óxido que pueden estar presentes en las superficies internas de los poros y rechupes. Como los compuestos internos suelen ser frágiles, también se pueden romper.

b. Las inclusiones *dúctiles* se alargarán y podrían afectar considerablemente las propiedades.

c. Los *óxidos pesados* y las inclusiones de escoria que se encuentran en los rechupes evitan la soldadura y causan laminaciones en el producto trabajado en caliente.

4. Los lingotes fundidos se someten a una secuencia de pasos de trabajo en caliente (*pasadas*), y la recristalización durante o entre ellos reemplaza el grano grueso fundido con una estructura equiaxial fina de propiedades mecánicas mucho mejores.

5. Las inclusiones y las partículas de la segunda fase se alinean más o menos al azar y, hasta cierto punto, se orientan en dirección de la deformación mayor. Esta *fibración mecánica* origina *anisotropía*, es decir, una variación de las propiedades en dirección del ensayo, muy independientemente de cualquier direccionalidad debida a la estructura cristalina (Secc. 8-1-3). Por lo general en la dirección de la orientación de las fibras dominan las propiedades de la matriz, así que la resistencia y la ductilidad son elevadas (Fig. 8-13*a*). Cuando el material se carga (durante su manufactura o en el servicio) en dirección trasversal, las inclusiones sirven como concentradores efectivos de esfuerzos (Fig. 8-13*b*). Por lo tanto, las llamadas *propiedades transversales cortas* como la resistencia, y aún más la resistencia al impacto, a la fatiga y la ductilidad, se alteran (Fig. 8-13*c*).

6. La fibración se puede exponer por medio del macroataque químico profundo (en oposición al microataque ligero para revelar la estructura del grano). La estructura fibrosa desarrollada en pasadas anteriores se distorsiona en el trabajo subsiguiente, de modo que el ataque químico de una sección transversal para exponer las *líneas de fluencia* es una de las herramientas más útiles para el estudio de la fluencia del material. Hasta en la ausencia de inclusiones o de partículas de segunda fase, las líneas de fluencia se presentan cuando la homogeneización no es perfecta y quedan rastros de la microsegregación. Esto es cierto para aceros en los cuales los átomos grandes de fósforo están segregados aun después de un trabajo extenso en caliente, lo cual realza de esta manera las líneas de fluencia en el macroataque químico (como en las Figs. 9-4*d* y 9-18).

Ejemplo 8-12

Una inclusión frágil embebida en una barra tiene un ancho de 5 mm, una longitud de 12 mm y un espesor de 1 mm. Está orientada en dirección de la elongación (que puede ser el resultado de

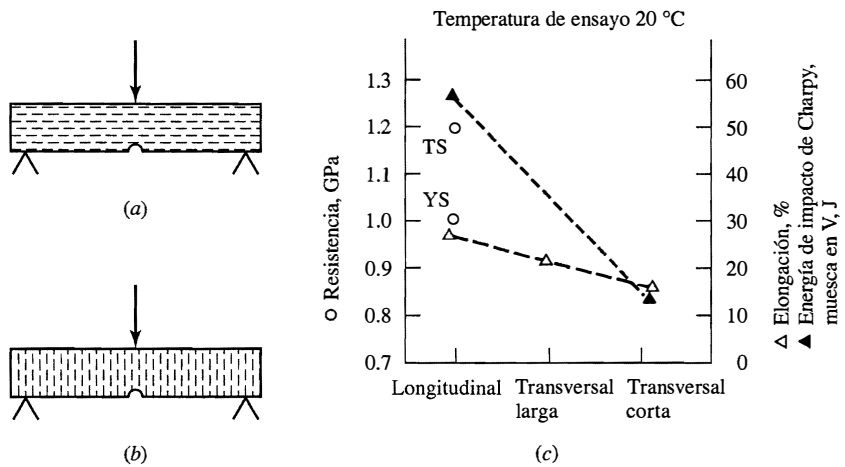


Figura 8-13 La fibración debida a la alineación de las partículas de segunda fase, de las inclusiones y de la segregación lleva a las propiedades direccionales, las cuales (*a* y *b*) se exponen en los ensayos de impacto y (*c*) son más evidentes en la ductilidad y energía de impacto. (*Datos para Inconel 718 tomados de Forging Design Handbook, American Society for Metals, 1972, p. 14.*)

cualquier proceso de trabajo del metal que la cause por medio de la reducción de la altura de la pieza de trabajo). Si el espesor de la barra se reduce 90% sin cambiar el ancho, y si la inclusión se rompe sin que varíe el espesor, ¿sobre qué longitud se distribuirán los fragmentos?

Una reducción de 90% en el espesor resulta en una franja con una altura igual a (100 – 90) = 10% del original. De la invariabilidad del volumen, $l_0 w_0 h_0 = l_1 w_1 h_1$. Si $w_0 = w_1$, la extensión es $l_1/l_0 = h_0/h_1 = 100/10$ o diez veces. De esta manera, los fragmentos de la inclusión de una longitud original de 12 mm se dispersarán sobre una longitud de 120 mm. En medio, a una distancia de 120 – 12 = 108 mm (o 90%), el material de la barra estará en contacto completo y se soldará de nuevo.

Ejemplo 8-13

Cuando el Titanic se botó en 1912, presentaba lo último en tecnología y la prensa lo apodó el "insumergible". Pero cuando se impactó con un *iceberg*, sufrió un daño severo y se hundió en tres horas. En 1996 se recuperó una sección del enchapado del casco y varios remaches, que se entregaron a la Junta Forense Marítima de la Sociedad de Arquitectos e Ingenieros Navales. Se determinó que la chapa tenía una temperatura de transición de dúctil a frágil mucho mayor que la temperatura del agua (recuerde el problema con los barcos Liberty, ejemplo 4-7). Sin embargo, el mayor daño fue causado por la fractura de los remaches de hierro forjado, de manera que las planchas del casco se desgarraron. El acero forjado de 1912 contenía alrededor de 2 o 3% vol. de escoria de silicato de hierro, el cual se alargó durante el laminado en caliente. Las venillas de escoria actúan como inclusiones de resistencia cero, así que la resistencia transversal y la ductilidad del hierro sólo fueron de un décimo de la resistencia y de la ductilidad longitudinales. Los remaches recuperados tenían aún más escoria (más de 9%), extendida en venillas gruesas. Ello no creó un problema en la cabeza preformada, en la cual las venillas siguieron la forma de ésta, pero demostraron ser catastróficas en la cabeza formada durante el remachado: las venillas estaban orientadas transversalmente en dirección de la carga, y los remaches reventaron cuando el

barco se impactó con el témpano (Fuente: T. Foecke: *Metallurgy of the RMS Titanic*, National Institute of Standards and Technology-IR 6118, Feb. 4, 1988.)

Procesamiento termomecánico Como la deformación plástica incluye el movimiento de átomos, *acelera* todos los procesos que dependen de la difusión o transformación. Ya se analizó que las dislocaciones, multiplicadas y enredadas durante la deformación, suministran sitios para la recristalización. También proporcionan lugares para la nucleación de las partículas precipitadas, incrementando de esta manera el número de los precipitados y disminuyendo su tamaño. Existen muchas posibilidades de las cuales sólo las más importantes se discutirán aquí.

1. Cuando un acero se alea de manera que la austenita metaestable pueda existir durante un tiempo razonable (la nariz de la curva se desplaza hacia la derecha en la Fig. 6-20), hay oportunidad para trabajarla. Para esto, el acero se austeniza y luego se enfría rápidamente entre 100 y 200°C por debajo de la temperatura de transformación en la que se trabaja. La densidad elevada de las dislocaciones inducida en la austenita resulta en un refinamiento sustancial de los productos de transformación, así que esos aceros *ausformados* tienen resistencia elevada. Si la austenita se trabaja a temperaturas menores (trabajo *termomecánico de baja temperatura*, Fig. 6-20, línea 6), la resistencia se eleva todavía más, pero a costa de la ductilidad.

2. Por medio de la aleación, la temperatura inicial de la transformación martensítica (M_s) se puede reducir, además de retener una estructura austenítica metaestable a temperatura ambiente. Cuando un material así es sometido a una deformación, la movilidad mayor de los átomos durante la deformación comienza la transformación a la martensita. Por lo tanto, en el curso de un ensayo de tensión, una estricción incipiente se estabiliza a través de la transformación de la austenita en una martensita mucho más fuerte, y el origen de la estricción localizada se retrasa hasta que se transforma todo el volumen de la probeta. De esta manera, la *plasticidad inducida por transformación* (TRIP) proporciona un tercer medio (además de elevar los valores de n y m) para aumentar la ductilidad de un metal al tiempo que se obtiene una gran resistencia. Los aceros TRIP se benefician más de una elevada densidad de dislocación inducida en la austenita por medio del trabajo en tibio.

3. Ya se mencionó que no todas las martensitas son duras. Si el contenido de carbono es muy bajo, como en los *aceros marenvejecidos*, la martensita será suave y fácil de trabajar, pero subsecuentemente se puede reforzar en gran medida con la precipitación de compuestos intermetálicos (como el Ni_3Ti o el Ni_3Mo) en los numerosos sitios de densidad elevada de dislocaciones, inducidos por el trabajo en frío.

4. Los materiales endurecidos por precipitación (Secc. 6-4-2), tales como el aluminio y las aleaciones de níquel, se pueden trabajar mientras se encuentran en el rango de temperatura de solución sólida homogénea. Al enfriarse, los precipitados se refinan porque comienzan a formarse en los sitios con concentraciones de dislocaciones. Alternativamente, el material puede tratarse por solución, y la solución sólida supersaturada (que es muy dúctil) se puede trabajar en frío para introducir una densidad elevada de dislocaciones, lo cual refina los precipitados en el envejecimiento subsiguiente. Puede resultar un gran incremento en la resistencia sin pérdida de ductilidad.

5. Un material ya envejecido, e incluso una martensita revenida, se puede trabajar en frío para aprovechar el gran reforzamiento resultante del apilamiento de las dislocaciones contra los obstáculos finamente distribuidos. Por lo general la ductilidad se ve afectada.

6. Existen más posibilidades si el material experimenta una transformación alotrópica. Un material calentado hasta la cercanía de la temperatura de transformación a menudo presenta resistencia baja y ductilidad alta, aunque no hasta el mismo grado que un material superplástico. (Esto se explota en el trabajo en caliente del titanio y sus aleaciones alrededor de la temperatura de transformación α a β.) Los granos también se refinan y la morfología de los productos de transformación también puede cambiar. Por ejemplo, la perlita formada mientras se trabaja el acero en la temperatura de transformación se refina mucho y es factible que se haga globular (esferoide). El acero que se trabaja de forma directa a través de la temperatura de transformación puede presentar una resistencia inusualmente elevada y una ductilidad razonable (*trabajo controlado en caliente*).

Ejemplo 8-14

Algunos aceros inoxidables se alean con cantidades pequeñas de Cu, Al, P, Nb o Ti. Después de formarse en frío, un tratamiento de endurecimiento por envejecimiento causa la precipitación de los compuestos intermetálicos duros, la cual incrementa la resistencia. El acero 17-4PH [17Cr-4Ni-4Cu-0.3(Nb + Ta)] es común en estos aceros inoxidables endurecidos por precipitación:

Condición	YS, MPa	TS, MPa	el. %
Recocida por solución	275	900	35
Envejecido	1 310	1 415	9
Trabajado en frío y envejecido	1 790	1 825	2

(Datos de R. Brucker, *Adv. Mater. Proc.*, 1995 (12): 25-27.)

Ejemplo 8-15

La aleación de aluminio 6063 se proporciona en varias formas:

Temple	Designación	YS, MPa	TS, MPa	el., %
Recocida	-0	48	90	
Tratada por solución y envejecida naturalmente	-T4	90	172	22
Tratada por solución y envejecida artificialmente	-T6	214	240	12
Tratada por solución, trabajada en frío y envejecida artificialmente	-T8	270	290	12

Note el marcado incremento en la resistencia cuando el material se trabaja en frío después del tratamiento por solución, pero antes del endurecimiento por precipitación.

Ejemplo 8-16

Los aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA) contienen cantidades pequeñas de elementos de formación de carburo y nitruro (V, Nb, Ti, Mo) que permiten el control del tamaño de grano de la austenita, de la temperatura de recristalización y del tamaño de grano de la ferrita. De esta manera se puede desarrollar una resistencia y tenacidad elevadas con una secuencia adecuada de procesamiento termomecánico. Por ejemplo, después de un enfriamiento controlado, las partes forjadas en caliente se pueden usar como salen de la forja. La eliminación del tratamiento térmico convencional del templado y revenido, del reforzamiento y del alivio de esfuerzos disminuye el costo y acelera los tiempos de entrega.

8-2 MECÁNICA DEL PROCESADO POR DEFORMACIÓN

Existe una gran variedad de procesos de deformación plástica pero algunos principios se pueden aplicar a todos ellos. Sin un entendimiento de estos principios, ningún proceso se puede diseñar o controlar de manera inteligente.

La deformación plástica se realiza con la ayuda de herramientas (matrices). Todos los materiales de las matrices tienen una resistencia limitada; por lo tanto, una preocupación principal es la magnitud de la presión que se desarrolla en el curso de la deformación. Si la presión es demasiado grande, el proceso no es posible; aun si las presiones son razonables, la fuerza total de deformación puede ser demasiado elevada para el equipo disponible. Consecuentemente, el cálculo de las presiones y de las fuerzas es la preocupación primaria de los libros sobre los procesos de deformación. A menudo el énfasis se hace en la exactitud relativa de las varias teorías; para nuestro propósito es más importante que cualquier estimación de las presiones y de las fuerzas sea en verdad relevante. La sencilla aproximación que aquí se presenta tiene una exactitud hasta de ±20% y da margen para un factor de seguridad apropiado. Con objeto de obtener una estimación significativa, se deben observar cuatro puntos: (1) analizar el estado de esfuerzos; (2) determinar un esfuerzo de fluencia relevante; (3) distinguir los efectos de la fricción; (4) tomar en cuenta la deformación no homogénea.

8-2-1 Criterios de cedencia

El estado de esfuerzos es, en el caso general, triaxial; es decir, los esfuerzos actúan en todas direcciones. El análisis se simplifica si el sistema coordenado se orienta de tal forma que los esfuerzos cortantes desaparezcan y sólo actúen tres esfuerzos normales. Éstos se llaman esfuerzos principales y se denotan como σ_1, σ_2 y σ_3 (Fig. 8-14*a*).

Para que ocurra la fluencia plástica, la combinación de los esfuerzos debe satisfacer el *criterio de cedencia*. Estos criterios de cedencia se formulan para describir el inicio de la deformación plástica, relacionando los esfuerzos principales con la resistencia del material a la cedencia bajo tensión o bajo compresión (Seccs. 4-1-3 y 4-3). El tema a tratar son las deformaciones plásticas grandes; por lo tanto, se usará el esfuerzo de fluencia σ_f. (De esta forma en realidad se debería hablar de criterios de fluencia; sin embargo, el término *criterio de fluencia* está tan atrincherado que se preferirá para el propósito de este libro.) Para los metales, frecuentemente se usan dos criterios. El criterio de fluencia de acuerdo con Tresca se puede escribir como

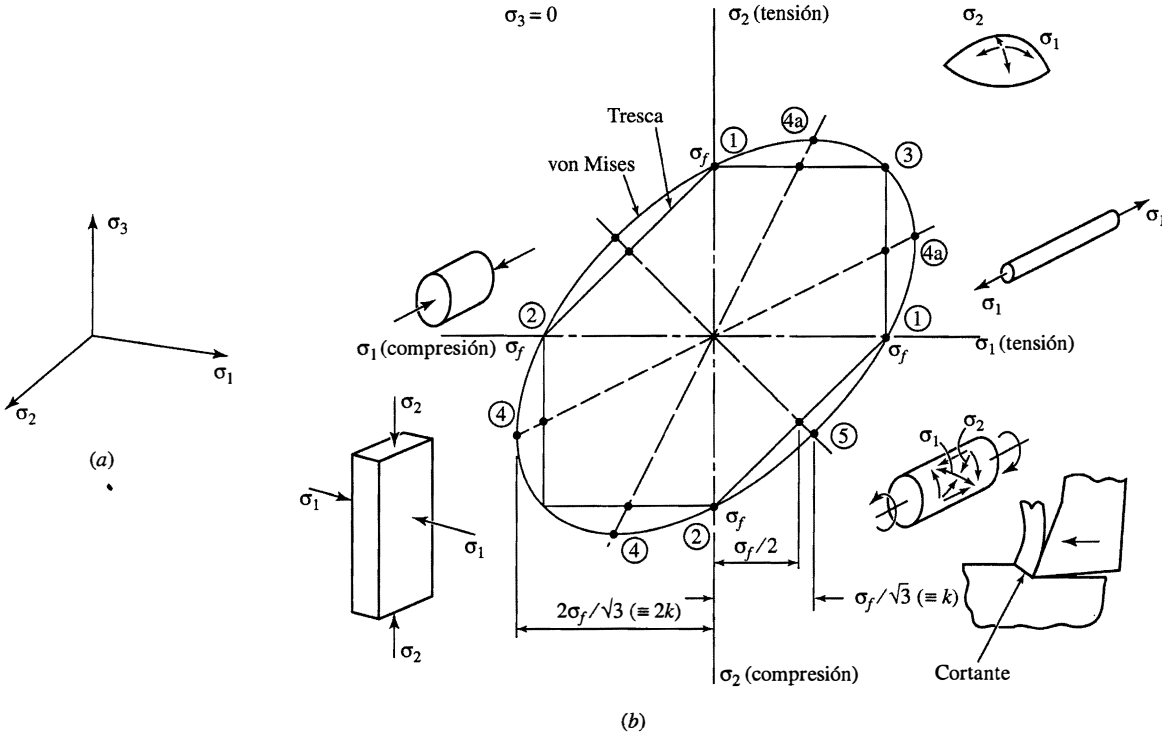


Figura 8-14 (*a*) El sistema coordenado puede girarse para obtener sólo esfuerzos principales. (*b*) Bajo condiciones de esfuerzo plano, algunos de los estados de esfuerzos importantes se pueden mostrar en el hexágono de cedencia de Tresca y en la elipse de cedencia de von Mises. (*De J.A. Schey, Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication and Wear, ASM International, 1983, p. 12. Con permiso.*)

$$\frac{\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}}{2} = \frac{\sigma_f}{2} \qquad \textbf{(8-12)}$$

donde $\sigma_{\text{máx}}$ es el esfuerzo más positivo y $\sigma_{\text{mín}}$ el más negativo.

De acuerdo con von Mises el criterio de cedencia es:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_f^2 \qquad \textbf{(8-13)}$$

La importancia de los criterios de fluencia se ilustra mejor examinando un estado simplificado de esfuerzos en el cual $\sigma_3 = 0$ (*esfuerzo plano*). Por facilidad de visualización, se podría pensar en una placa cuya dirección de laminación se toma de manera arbitraria como la de σ_1 y la del ancho como σ_2 (Fig. 8-14*b*). La fluencia plástica se puede iniciar en muchas formas:

1. Si una probeta de tensión se corta en dirección de la laminación, la fluencia ocurre, de acuerdo con Tresca y con von Mises, en el esfuerzo de fluencia σ_f (puntos 1, correspondientes a las dos direcciones en el plano de la placa).

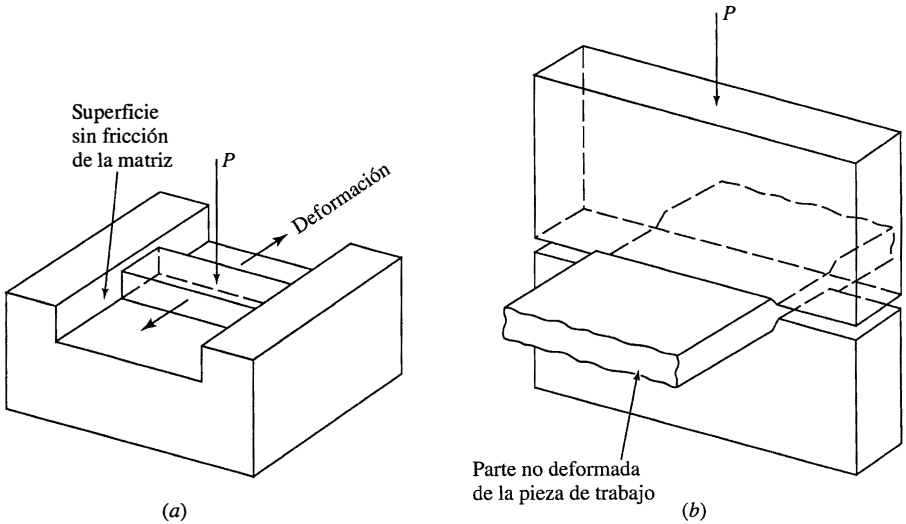


Figura 8-15 La deformación en una dirección a menudo se evita y se establece una condición de deformación plana por medio de la restricción dada por (*a*) los elementos de la matriz o (*b*) por las partes no deformadas de la pieza de trabajo adyacentes a la zona de deformación. (*De J.A. Schey, como Fig. 8-14, p. 13.*)

2. Se pueden ensayar cilindros más cortos en las mismas direcciones en compresión y usualmente se encontrará que fluyen en el mismo esfuerzo σ_f (puntos 2).

3. Cuando la placa se abulta por un punzón o por un medio presurizado (como un globo es expandido por el aire), los dos esfuerzos principales que actúan en el plano de la placa son iguales (*tensión biaxial equilibrada*) y deben alcanzar σ_f (punto 3).

4. Una condición técnicamente muy importante se alcanza cuando se previene la deformación de la pieza de trabajo en una de las direcciones principales (*deformación plana*) por una de dos razones.

a. Un elemento de la matriz mantiene una dimensión constante (Fig. 8-15*a*).

b. Sólo se deforma una parte de la pieza de trabajo, por lo que las porciones adyacentes no deformadas ejercen una influencia de restricción (Fig. 8-15*b*).

En cualquiera de estos casos, la restricción impone un esfuerzo sobre el material en esa dirección principal; el esfuerzo es el promedio aritmético de los otros dos esfuerzos principales (correspondientes a los puntos 4 en la Fig. 8-14*b*). El esfuerzo que se requiere para la deformación todavía es σ_f de acuerdo con Tresca, quien ignora el esfuerzo principal intermedio. Sin embargo, según von Mises, el esfuerzo que se requiere es mayor, $1.15\sigma_f$, cuyo valor a menudo se denota como $2k$. También se llama *esfuerzo de fluencia de deformación plana* o *esfuerzo de fluencia restringido* del material. La deformación plana se puede imponer en tensión, puntos 4a.

5. Si un cilindro se corta y tuerce (*torsión*), los dos esfuerzos principales sobre la superficie del cilindro son de igual magnitud, pero de signo opuesto (puntos 5 en la Fig. 8-14*b*). Ésta es una condición de *cortante puro*, y la fluencia ocurre en el esfuerzo

cortante de fluencia τ_f, el cual es igual a $0.5\sigma_f$ de acuerdo con Tresca, y de $0.577\sigma_f$ según von Mises, quien denomina k al esfuerzo cortante de fluencia. El punto importante es que cuando en el curso de la deformación por compresión se impone un esfuerzo transversal de signo opuesto (un esfuerzo de tensión), *el esfuerzo que se requiere por compresión disminuirá.* Esto ofrece un mecanismo poderoso para reducir las presiones de la matriz.

6. Una condición especial se alcanza cuando los tres esfuerzos principales son iguales en magnitud (*estado hidrostático de esfuerzos*, Secc. 4-1-5). Una inspección de los criterios de cedencia [ecuaciones (8-12) y (8-13)] demostrará que la superposición de un esfuerzo hidrostático simplemente desplaza todos los esfuerzos principales en la misma cantidad; así, no hay cambio en el criterio de cedencia y la fluencia aún comienza en σ_f.

Se notará que, para ciertos estados de esfuerzos, von Mises predice un esfuerzo crítico 15% mayor que el esfuerzo de fluencia uniaxial. No todos los materiales obedecen el criterio de von Mises, pero para evitar problemas, siempre se empleará $1.15\sigma_f$ ($= 2k$) como el esfuerzo de fluencia en la deformación plana.

8-2-2 Esfuerzo relevante de fluencia

En todos los cálculos, el esfuerzo suficiente para mantener la deformación plástica, σ_f, se debe tomar en cuenta para la temperatura, la deformación y la tasa de deformación que prevalecen en el proceso. No es posible enfatizar de manera suficiente que lo primordial no sólo es en iniciar, sino *mantener* la fluencia plástica. Así, la resistencia a la cedencia que se encuentra en muchos manuales es de poca utilidad; el esfuerzo de fluencia atraviesa la curva de esfuerzo real-deformación real (Fig. 8-1*a* u 8-11*a*) dentro de los límites de deformación definidos por la condición del material inicial y de la deformación final.

1. En el trabajo en frío es factible suponer que la ley de la potencia, ecuación (8-4), es válida y, cuando estén disponibles, se deben usar los valores de K y n (en las tablas 8-2 y 8-3 se proporciona una selección).

2. Para el trabajo en caliente, el esfuerzo de fluencia se puede calcular a partir de la función de potencia, ecuación (8-11), con los valores apropiados de C y m (tablas 8-2 y 8-3). Si estos valores no están disponibles para varias deformaciones, se debe suponer que el esfuerzo de fluencia permanece constante durante toda la deformación (como en la curva para una tasa de deformación de 1 s^{-1} en la Fig. 8-11*a*; en las tablas 8-2 y 8-3 los valores se dan para una deformación de $\varepsilon = 0.5$). Si no hay datos de C y m disponibles, es preciso realizar un ensayo de compresión. Es inadmisible usar los valores de la resistencia en caliente determinados en ensayos lentos de tensión convencionales, porque con frecuencia sólo representan una fracción del esfuerzo de fluencia real que prevalece con una tasa de deformación mucho más elevada (usualmente, 1-1 000 s^{-1}) obtenida en los procesos de deformación. Extrapolar la tasa baja de deformación a la tasa elevada es peligroso porque m también puede cambiar con la tasa de deformación (véase la Fig. 8-12).

Se debe notar que las constantes empleadas en los cálculos del esfuerzo de fluencia también son una función de la condición inicial del material. Los datos proporcionados en las tablas 8-2 y 8-3 son valores representativos para un material recocido. Se hizo un esfuerzo para que los datos fueran confiables y los dos valores de C y m ingresados para el cobre muestran la peor de las variaciones extremas que ocasionalmente se encuentra en los datos publicados.

8-2-3 Efectos de la fricción

En la mayor parte de la deformación la pieza de trabajo se pone en contacto con una herramienta o con una matriz; por lo tanto, la fricción entre los dos cuerpos en contacto es inevitable. Con algunas excepciones, el objetivo será reducir la fricción mediante la aplicación de un lubricante.

En la sección 4-9-2 ya se examinó la fricción tal como se encuentra en los elementos de la maquinaria (por ejemplo, en cojinetes). La fricción se describió con un coeficiente de fricción μ; debido a su importancia, se reproduce la ecuación (4-18):

$$\mu = \frac{F}{P} = \frac{\tau_i}{p} \tag{4-18}$$

Cuando la presión en la interfaz p es baja respecto al esfuerzo de fluencia σ_f de los materiales en contacto (como sería en un cojinete), la ecuación (4-18) es válida: al incrementar la presión p, el esfuerzo cortante τ_i en la interfaz se eleva linealmente (Fig. 8-16*a*), y μ podría tomar cualquier valor constante. En los procesos de deformación uno de los materiales en contacto (la pieza de trabajo) se deforma, y entonces se desliza contra la superficie más dura (la herramienta o la matriz). De nuevo se genera un esfuerzo de fricción τ_i, pero esta vez existe un límite para μ, ya que el material elegirá un patrón de deformación que *minimiza la energía de deformación*. Si la fricción es alta, el esfuerzo cortante τ_i en la interfaz alcanzará en el límite el esfuerzo de cortante de fluencia τ_f del material de la pieza de trabajo (Fig. 8-16*a*). En este punto la pieza de trabajo se niega a deslizarse sobre la herramienta; en vez de eso, se deforma por cortante dentro del cuerpo (Fig. 8-16*b*). Como $\tau_f = 0.5\sigma_f$ (Fig. 8-14*b*), a menudo se dice que el valor máximo de μ es 0.5. Esto es cierto cuando $p = \sigma_f$; con una p mayor, el valor máximo de μ es menor (Fig. 8-16*b*). En general, es más exacto decir que el coeficiente de fricción no tiene significado cuando $\tau_i = \tau_f$, pues no hay deslizamiento relativo en la interfaz. Esto se describe como *fricción adherida*, aunque la pieza de trabajo en realidad no se adhiere a la superficie de la matriz.

Debido a las dificultades introducidas por el coeficiente de fricción, con frecuencia es preferible usar el valor real de τ_i, sobre todo cuando las presiones en la interfaz son muy elevadas. Alternativamente, τ_i se puede denotar como una fracción del esfuerzo de fluencia por cortante

$$\tau_i = m^* \tau_f = m^* \frac{\sigma_f}{2} \quad \left(\text{o} = m^* \frac{\sigma_f}{\sqrt{3}} \right) \tag{8-14}$$

donde m^* es el *factor de cortante por fricción* [en la literatura se emplea m pero, debido a la posible confusión con m en la ecuación (8-11), se agrega el asterisco]. Para un lubricante perfecto, $m^* = 0$; para la fricción adherida, $m^* = 1$.

Tabla 8-2 Propiedades de manfactura de aceros y aleaciones de cobre*
(Condición recocida)

Designación y composición, %	Liquidus/ solidus, °C	Trabajo en caliente: Temperatura usual, °C	Trabajo en caliente: Esfuerzo de fluencia, † MPa: no °C	C	m	Facti-bilidad ¶	Trabajo en frío: Esfuerzo de fluencia, ‡ MPa: K	n	$\sigma_{0.2}$, MPa	TS, MPa	Elon-gación, %	q Ra, %	Temperatura de recocido., § °C
Aceros:													
1008 (0.08C), lámina		<1 250	1 000	100	0.1	A	600	0.25	180	320	40	70	850-900 (F)
1015 (0.15C), barra		<1 250	800	150	0.1	A	620	0.18	300	450	35	70	850-900 (F)
			1 000	120	0.1								
			1 200	50	0.17								
1045 (0.45C)		<1 150	800	180	0.07	A	950	0.12	410	700	22	45	790-870 (F)
			1 000	120	0.13								
			1 000	120	0.1	A			350	620	30	60	
~8620 (0.2C, 1Mn, 0.4Ni, 0.5Cr, 0.4Mo)													
D2 acero para herramientas (1.5C, 12Cr, 1Mo)		900-1 080	1 000	190	0.13	B	1 300	0.3					880 (F)
H13 acero para herramientas (0.4C, 5Cr 1.5Mo, 1V)			1 000	80	0.26	B							
302 SS (18Cr, 9Ni) (austenítico)	1 420/1 400	930-1 200	1 000	170	0.1	B	1 300	0.3	250	600	55	65	1 010-1 120 (Q)
410 SS (13Cr) (martensítico)	1 530/1 480	870-1 150	1 000	140	0.08	C	960	0.1	280	520	30	65	650-800
Aleaciones con base de cobre:													
Cu (99.94%)	1 083/1 065	750-950	600	130	0.06	A	450	0.33	70	220	50	78	375-650
				(48)	(0.17)								
			900	41	0.2								
Latón para cartuchos (30Zn)	955/915	725-850	600	100	0.24	A	500	0.41	100	310	65	75	425-750
			800	48	0.15								
Metal Muntz (40Zn)	905/900	625-800	600	38	0.3	A	800	0.5	120	380	45	70	425-600
			800	20	0.24								
Latón con plomo (1Pb, 39Zn)	900/855	625-800	600	58	0.14	A	800	0.33	130	340	50	55	425-600
			800	14	0.20								
Bronce fosforado (5Sn)	1 050/950		700	160	0.35	C	720	0.46	150	340	57		480-675
Bronce de aluminio (5A1)	1 060/1 050	815-870				A			170	400	65		425-750

* Compilados de varias fuentes; la mayoría de los datos del esfuerzo de fluencia son de T. Altan y F.W. Boulger, *Trans. ASME, Ser. B, J. Eng. Ind. 95*: 1009 (1973).
† El esfuerzo de fluencia en el trabajo en caliente es para una deformación de $\varepsilon = 0.5$. Para convertir a 1 000 psi, divida los esfuerzos entre 7.
‡ El esfuerzo de fluencia en el trabajo en frío es para tasas moderadas de deformación, alrededor de $\varepsilon = 1\ s^{-1}$. Para convertir a 1 000 psi, divida los esfuerzos entre 7.
§ El enfriamiento en el horno se indica con F, el templado con Q.
¶ Clasificaciones relativas, con A la mejor, correspondiente a la ausencia de agrietamiento en el laminado y en el forjado en caliente.

Tabla 8-3 Propiedades de manufactura de varias aleaciones no ferrosas[a] (Condición de recocido, excepto 6061-T6)

Designación y composición, %	Liquidus/ solidus, °C	Trabajo en caliente: Temperatura usual, °C	Trabajo en caliente: Esfuerzo de fluencia,[b] MPa: no °C	C	m	Trabajo en caliente: Facti-bilidad[f]	Trabajo en frío: Esfuerzo de fluencia[c] MPa: K	n	$\sigma_{0.2}$, MPa	TS,[d] MPa	Elonga-ción,[d] %	q RA, %	Temperatura de recocido,[e] °C
Metales ligeros:													
1100 Al (99%)	657/643	250-550	300	60	0.08	A	140	0.25	35	90	35		340
			500	14	0.22								
~3003 Al (1Mn)	649/648	290-540	400	35	0.13	A			40	110	30		370
~2017 Al (3.5Cu, 0.5Mg, 0.5Mn)	635/510	260-480	400	90	0.12	B	380	0.15	70	180	20		415 (F)
			500	36	0.12								
5052 Al(3.5Mg)	650/590	260-510	480	35	0.13	A	210	0.13	90	190	25		340
6061-0(1Mg, 0.6Si, 0.3Cu)	652/582	300-550	400	50	0.16	A	220	0.16	55	125	25	65	415 (F)
			500	37	0.17								
6061-T6	NA[g]	NA	NA	NA	NA	NA	450	0.03	275	310	8	45	
~7075 Al(6Zn, 2Mg, 1Cu)	640/475	260-455	450	40	0.13	B	400	0.17	100	230	16		415
Metales bajo punto de fusión:													
Sn (99.8%)	232	100-200				A				15	45	100	150
Pb (99.7%)	327	20-200	100	10	0.1	A				12	35	100	20-200
Zn (0.08% Pb)	417	120-275	75	260	0.1	A				130/170	65/50		100
			225	40	0.1								
Aleaciones para temperatura elevada:													
Ni (99.4Ni + Co)	1 446/1 435	650-1 250				A			140	440	45	65	650-760
Hastelloy X (47Ni, 9Mo, 22Cr, 18Fe, 1.5Co, 0.6W)	1 290	980-1 200	1 150~	140	0.2	C			360	770	42		1 175
Ti (99%)	1 660	750-1 000	600	200	0.11	C			480	620	20		590-730
			900	38	0.25	A							
Ti-6A1-4V	1 660/1 600	790-1 000	600	550	0.08	C			900	950	12		700-825
			900	140	0.4	A							
Circonio	1 852	600-1 000	900	50	0.25	A			210	340	35		500-800
Uranio (99.8%)	1 132	~700	700	110	0.1				190	380	4	10	

[a] Los espacios vacíos indican no disponibilidad de datos. Compilados de varias fuentes; la mayoría de los datos del esfuerzo de fluencia son de T. Altan y F.W. Bolger, *Trans ASME, Ser. B.J. Eng. Ind.* **95**: 1009 (1973).

[b] El esfuerzo de fluencia en el trabajo en caliente es para una deformación de $\varepsilon = 0.5$. Para convertir a 1 000 psi, divida los esfuerzos calculados entre 7.

[c] El esfuerzo de fluencia en el trabajo en frío es para tasas moderadas de deformación, alrededor de $\dot{\varepsilon} = 1\ s^{-1}$. Para convertir a 1 000 psi, divida los esfuerzos entre 7.

[d] Donde se dan dos valores, el primero es longitudinal, el segundo transversal.

[e] El enfriamiento en el horno se indica con F.

[f] Clasificaciones relativas, con A como la mejor, correspondiente a la ausencia de agrietamiento en el laminado y en el forjado en caliente.

[g] NA no aplicable al temple –T6.

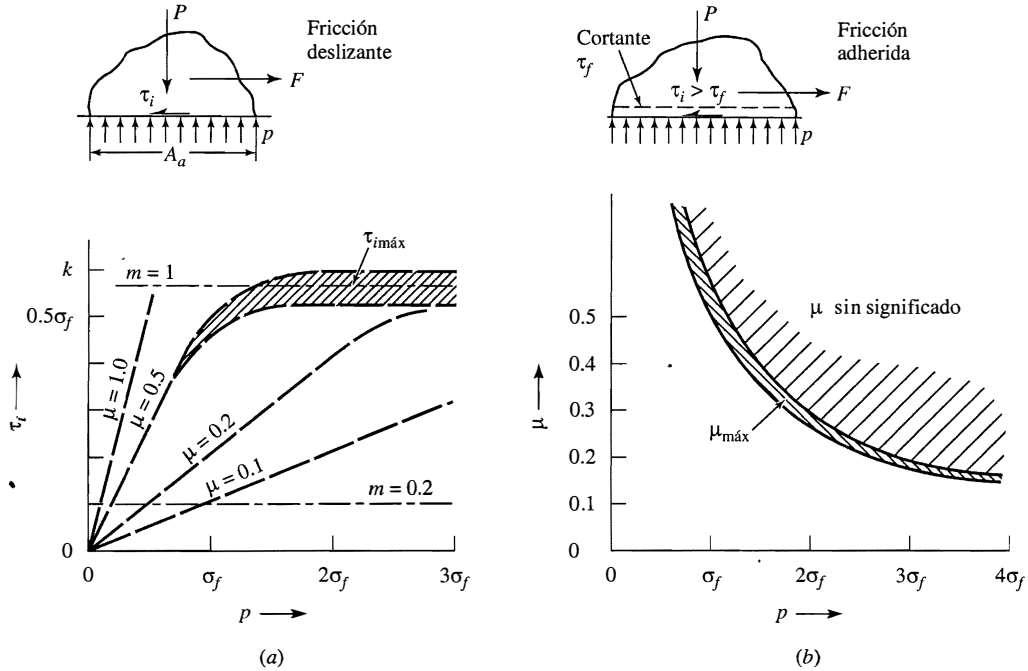


Figura 8-16 (*a*) El esfuerzo cortante en la interfaz nunca puede exceder al esfuerzo de fluencia por cortante del material y (*b*) el coeficiente máximo posible de fricción disminuye cuando las presiones en la interfaz exceden el esfuerzo de fluencia del material. (*De J.A. Schey, como Fig. 8-12, p. 15.*)

En el capítulo 9 se usan ambas descripciones de la fricción. Ésta siempre incrementa las presiones y las fuerzas, y fácilmente podría limitar la deformación alcanzable; por lo tanto, en muchos casos todo esfuerzo se hace para reducir la fricción con un lubricante adecuado.

Ejemplo 8-17

La fricción adherida inicia donde $\mu p = \tau_f$. Calcule los valores de μ para varias presiones en la interfaz p.

Es conveniente expresar p como un múltiplo de σ_f. Si se emplea el criterio de fluencia de Tresca, $\tau_f = 0.5\sigma_f$ y, por definición, ecuación (4-18),

$$\mu_{\text{máx}} = \frac{\tau_f}{p} = \frac{\tau_f}{x\sigma_f} = \frac{\sigma_f}{2x\sigma_f}$$

de aquí que, cuando

$x =$	1	2	4	8
$\mu_{\text{máx}} =$	0.5	0.25	0.125	0.062

Los puntos se grafican en la figura 8-16*b*. El criterio de von Mises da $\tau_f = 0.577\sigma_f$, y de esta manera se obtienen valores ligeramente mayores de $\mu_{\text{máx}}$.

Ejemplo 8-18

De las ecuaciones (4-18) y (8-14), $\tau_i = \mu p = m^* \tau_f$. Si p se expresa de nuevo como un múltiplo x de σ_f, calcule los valores equivalentes de μ y m^*.

Cuando $p =$	σ_f	$2\sigma_f$	$4\sigma_f$	$8\sigma_f$
Entonces $m^* =$	2μ	4μ	8μ	16μ

Así no hay una relación sencilla entre los dos parámetros que se usan para describir la fricción. Además, las relaciones que se calcularon arriba no son válidas cuando comienza la adherencia parcial.

8-2-4 Lubricación

Ya se mencionó que un lubricante se aplica para reducir (o controlar) la fricción. Un buen lubricante logra mucho más: separa las superficies de la matriz y de la pieza de trabajo y evita la adhesión con sus efectos secundarios indeseables sobre el agarre de la herramienta; además previene el daño de la pieza de trabajo y el desgaste de la matriz, así como el desgaste de la matriz reduce debido a la abrasión y otros a mecanismos. Asimismo, controla el acabado superficial de la pieza producida, enfría el sistema en el trabajo en frío y ayuda a evitar la pérdida de calor (o remueve calor a una rapidez constante) en el trabajo en caliente. El lubricante no debe ser tóxico ni alérgico y debe aplicarse y removerse con facilidad; sus residuos no deben interferir con las operaciones subsecuentes o causar corrosión.

Los lubricantes que se usan más frecuentemente se listan en la tabla 8-4 (los tipos básicos se describen en la Secc. 4-9-2). En un sentido muy general, los lubricantes se eligen por su "trabajo". Una película de lubricante para trabajo pesado sobrevive al deslizamiento bajo presión elevada, a una sustancial expansión de la superficie, y a una temperatura más alta; también reduce la fricción y el desgaste. Para trabajos más ligeros, puede ser suficiente un refrigerante sintético (una solución verdadera de un químico en agua). Las emulsiones (dispersiones de una fase aceitosa en agua) y los lubricantes con base de aceite se pueden formular para un intervalo amplio de trabajos, compuestos con aditivos marginales (en la tabla 8-4, FA y FO) y EP. Para el formado en frío más severo, la descomposición del lubricante sólo se puede evitar aplicando un recubrimiento de conversión (en el acero, una capa de Zn-fosfáto) sobre la superficie. La estructura de este recubrimiento asegura la retención del lubricante superpuesto (a menudo un jabón que reacciona con el recubrimiento) y permite la extensión de la superficie sin perder la continuidad de la película lubricante/recubrimiento. Debido a su base de agua, los sintéticos y las emulsiones son esenciales si el enfriamiento es importante en el trabajo en frío o en caliente. Los compuestos de capas reticulares tales como el grafito o el MoS_2 sobreviven a temperaturas elevadas, pero la preocupación por tener un entorno más limpio en la planta propició la búsqueda de alternativas.

Para minimizar el costo y el impacto en el ambiente, los lubricantes a menudo se aplican en sistemas de recirculación que incorporan tanques (los cuales pueden contener desde 10 L hasta 400 000 L de fluido), bombas para desarrollar la presión necesaria, boquillas que suministran el fluido hasta puntos estratégicos, y pilas de recolección y tuberías de regreso. Los componentes vitales son los *filtros*, que pueden ser de una

Tabla 8-4 Lubricantes comunes* y coeficientes de fricción en la deformación plástica

Material de la pieza de trabajo	Trabajo	Forjado		Lubricante para extrusión †	Estirado de alambre		Laminado		Trabajo de lámina de metálica	
		Lubricante	μ		Lubricante	μ	Lubricante	μ	Lubricante	μ
Aleaciones de Sn, Pb, Zn		FO-MO	0.05	FO o jabón	FO	0.05	FA-MO o MO-EM	0.05 0.1	FO-MO	0.05
Aleaciones de Mg	Caliente o tibio	GR y/o MoS_2	0.1-0.2	Ninguno			MO-FA-EM	0.2	GR en MO o jabón seco	0.1-02
Aleaciones de Al	Caliente	GR o MoS_2	0.1-0.2	Ninguno			MO-FA-EM	0.2		
	Frío	FA-MO o jabón seco	0.1 0.1	Lanolina o jabón sobre PH	FA-MO-EM, FA-MO	0.1 0.03	1-5% FA en MO(1-3)	0.03	FO, lanolina, o FA-MO-EM	0.05-0.1
Aleaciones de Cu	Caliente	GR	0.1-0.2	Ninguno (o GR)			MO-EM	0.2		
	Frío	Jabón seco, cera o sebo	0.1	Jabón seco, cera o sebo	FO-jabón-EM, MO	0.1 0.03	MO-EM	0.1	FO-jabón-EM o FO-jabón	0.05-0.1
Aceros	Caliente	GR	0.1-0.2	GL (100-300), GR			Ninguno o GR-EM	ST ‡ 0.2	GR	0.2
	Frío	EP-MO o jabón sobre PH	0.1 0.05	Jabón sobre PH	Jabón seco o jabón sobre PH	0.05 0.03	10% FO-EM	0.05	EP-MO, EM, jabón, o polímero	0.05-0.1
Acero inoxidable, Ni y aleaciones	Caliente	GR	0.1-0.2	GL (100-300)			Ninguno	ST ‡	GR	0.2
	Frío	CL-MO o jabón sobre PH	0.1 0.05	CL-MO o jabón sobre PH	Jabón sobre PH o CL-MO	0.03 0.05	FO-CL-EM o CL-MO	0.1 0.05	CL-MO, jabón, o polímero	0.1
Aleaciones de Ti	Caliente	GL o GR	0.2	GL (100-300)					GR, GL,	0.2
	Frío	Jabón o MO	0.1	Jabón sobre PH	Polímero	0.1	MO	0.1	Jabón, o polímero	0.1

*Algunos lubricantes usados con frecuencia (los guiones indican que se emplean varios componentes en el lubricante):
CL = parafina clorada.
EM = emulsión; los ingredientes listados del lubricante se distribuyen finamente en agua.
EP = compuestos de "extrema presión" (conteniendo S, Cl y P).
FA = ácidos y alcoholes grasos, por ejemplo, ácido oleico, ácido esteárico, alcohol estearílico.
FO = aceites grasos, por ejemplo, aceite de palma y aceite sintético de palma.
GL = vidrio (viscosidad a temperatura de trabajo en unidades de poise).
GR = grafito; usualmente en un fluido portador con base de agua.
MO = aceite mineral (la viscosidad en paréntesis, en unidades de centipoises a 40°C).
PH = conversión superficial fosfatada (o similar), proporcionando modulación del lubricante.
† Los coeficientes de fricción son confusos para la extrusión, y por lo tanto aquí no se citan.
‡ El símbolo ST indica fricción adherida.
Fuente: datos extraídos de J.A. Schey: *Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication, and Wear*, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1983.

simple malla de alambre o tener una construcción compleja para retener los finos generados durante el proceso, para retirar los componentes indeseables que se forman en las interacciones metal/lubricante y, si es posible, para separar aceite contaminante proveniente del equipo. La condición del lubricante se monitorea y se hace una compensación apropiada para mantener la concentración y la composición dentro de las especificaciones. Algunos lubricantes, especialmente las emulsiones, están sujetos al ataque de organismos, por lo que se agregan sustancias químicas venenosas para prevenir la rancidez y el olor fétido.

Aun con el mejor cuidado, existe un punto más allá del cual no se puede mantener un lubricante y debe reemplazarse con un lote nuevo. El lubricante usado se recolecta por compañías de reciclaje especializadas que lo regresan a su condición original, lo reformulan para otra aplicación, o lo adecuan para ser desechado por combustión. Algunos lubricantes son difíciles de reciclar o contienen ingredientes peligrosos, así que el desecho es extremadamente costoso. Por todas estas razones, la elección de un lubricante no puede ser tardía; el lubricante debe considerarse como parte integral del sistema desde el principio.

Con frecuencia es necesario remover los residuos de los lubricantes. Los residuos orgánicos se retiran desengrasando. En el *desengrasado por solventes* se han usado en gran medida solventes tratados con cloro, pero como varios de ellos agotan la capa de ozono o son cancerígenos potenciales, otros métodos han ganado terreno, tales como el *desengrasado acuoso* con químicos alcalinos, seguido por un enjuague de agua. Donde el desengrasado por solventes es inevitable, se usan sistemas cerrados o con una recuperación total, de manera que ningún solvente se escape. Esto también se aplica al *desengrasado por vapor* en una cámara saturada con el vapor calentado del solvente; dicho vapor se condensa en las partes más frías y los residuos aceitosos se desprenden. Se deben elegir lubricantes que sean compatibles con el proceso de desengrasado propuesto. También se hacen esfuerzos para minimizar la cantidad de lubricante aplicada y para mantener la niebla de aceite (compuestos orgánicos volátiles, VOC, por sus siglas en inglés) a un mínimo. Los límites impuestos por las legislaturas son fijos y poco a poco se hacen más estrictos respecto a sus emisiones al aire y al agua. Los métodos de eliminación también están regulados, por lo tanto, todos estos factores se deben tomar en cuenta al seleccionar un lubricante.

8-2-5 Deformación no homogénea

Existe una fuente importante de presiones y fuerzas elevadas que no tiene nada que ver con la fricción en la interfaz, y, por lo tanto, no se afecta por la lubricación. Se puede entender mejor por medio del ejemplo de la *indentación*. El análisis de la figura 8-17*a* sugiere que una herramienta pequeña no puede deformar todo el volumen de una pieza de trabajo grande (semiinfinita). Efectivamente, los experimentos demuestran que cuando la herramienta penetra, ocurre una *fluencia altamente no homogénea del material.*

El mecanismo se muestra en la figura 8-17*a*: una parte de la pieza de trabajo (1) inmediatamente debajo del indentador permanece inmóvil con respecto a éste y se mueve con él como si fuera una extensión del mismo. Después, esta cuña rígida empuja a dos cuñas triangulares (2) a los lados, que a su vez empujan a otras dos cuñas exteriores (3),

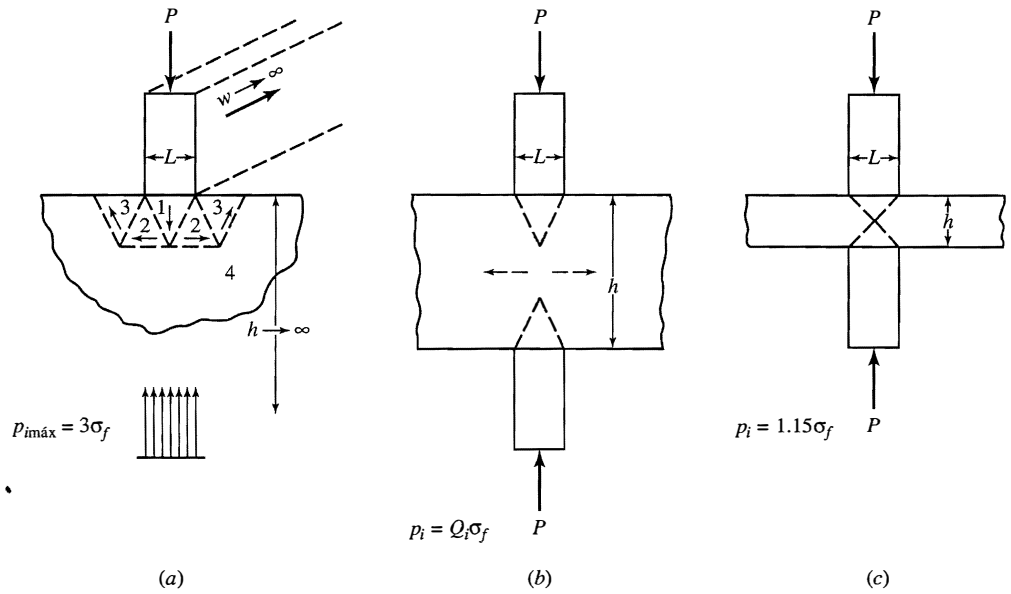


Figura 8-17 La deformación es (*a*) altamente no homogénea cuando se indenta un cuerpo semiinfinito; (*b*) para valores h/L altos, la deformación aún es no homogénea; (*c*) sólo en $h/L = 1$ se aproxima la homogeneidad.

formando jorobas que corresponden al volumen desplazado por el indentador. El resto de la pieza de trabajo (4) sólo se carga en forma elásticamente. La dificultad de mover el material sólo en forma local, *en comparación con la restricción dada por el material elástico circundante*, origina la presión requerida en la interfaz. Comparada con la deformación homogénea, la fuerza de forjado debe realizar ahora trabajo extra, a lo cual se le denomina *trabajo redundante* (como en el ejemplo 8-11).

En algunos procesos una pieza de trabajo de espesor finito se deforma de modo simultáneo a los dos lados (Fig. 8-17*b*). Entonces, la no homogeneidad de la deformación depende de cuán lejos estén separadas las dos zonas de deformación; esto se expresa de manera más útil con la razón h/L, es decir, la relación de la altura con la longitud de contacto. Por medio de la teoría y de experimentos se ha determinado que cuando $h/L \geq 8.7$, ambas zonas de deformación están por completo separadas; el material entre ellas sólo se deforma elásticamente y ejerce el mismo efecto de restricción que si fuera de espesor infinito. Para razones h/L menores, las dos cuñas cooperan (Fig. 8-17*b*) y la presión baja. Como se podría esperar, en una razón $h/L = 1$ ambas zonas de deformación cooperan completamente (Fig. 8-17*c*) y el material fluye a una presión mínima. Si la razón h/L disminuyera más, la deformación sería homogénea, pero la fricción incrementaría las presiones en la matriz.

El análisis de la figura 8-17*b* indica que cuando las dos cuñas penetran arriba y abajo tienden a desgajar la pieza de trabajo; en otras palabras, la deformación no homogénea genera *esfuerzos secundarios de tensión* (es decir, esfuerzos que no se imponen

de manera externa sino que se producen por el proceso mismo de deformación). Se tienen varias consecuencias:

1. La fractura interna de la pieza de trabajo puede ocurrir durante la deformación.

2. Es factible establecer un patrón de esfuerzo residual (esfuerzo interno) que puede causar deformación subsecuente (alabeo) de la pieza de trabajo, particularmente durante el calentamiento.

3. Los esfuerzos residuales de tensión superficiales se pueden combinar con otros efectos para causar fallas retrasadas (por ejemplo, el agrietamiento por esfuerzo de corrosión en presencia de un medio corrosivo).

Por lo tanto, en general, el objetivo del desarrollo del proceso es hacer la deformación tan homogénea como sea posible, a menos que la fractura interna se induzca de forma intencional (Secc. 9-7-4). Si continúan los esfuerzos residuales dañinos, se aplica el tratamiento térmico de alivio de esfuerzos (Secc. 6-4-1).

Hemos visto que los esfuerzos residuales de compresión concentrados en una capa superficial delgada mejoran mucho la resistencia a la fatiga de la pieza de trabajo en servicio (Secc. 4-5). Así que se aplica de manera intencional una deformación por compresión altamente no homogénea. Los esfuerzos superficiales de compresión se equilibran por los esfuerzos internos de tensión, que al difundirse sobre un área de sección transversal tan grande, su nivel es inofensivo.

8-2-6 Factibilidad volumétrica

Una vez que se ha determinado que un proceso es posible desde el punto de vista de las presiones y las fuerzas, se deberá asegurar que la pieza de trabajo sobrevivirá a la deformación sin fractura. Un material con una ductilidad dada puede comportarse en forma diferente en varios procesos, dependiendo de las condiciones a que se someta. Por lo tanto, el objetivo no es simplemente la ductilidad, sino una propiedad más compleja llamada *factibilidad* en las operaciones volumétricas de trabajo de metales. En la sección 4-1-4 se analizó que la fractura dúctil se induce por medio de esfuerzos triaxiales de tensión, y en la 4-1-5 que la imposición de presión hidrostática retrasa la fractura. Así, la factibilidad tiene dos componentes:

1. La *ductilidad básica* del material le permite deformarse hasta cierto punto, sin fractura, aun en la presencia de esfuerzos de tensión. Por lo tanto, la reducción en el área estimada en el ensayo de tensión [ecuación (4-10)] es una medida útil (pero no aplicable universalmente) de la ductilidad básica; en esencia es un parámetro de la resistencia a la formación de huecos. Otras medidas posibles son el número de giros a la fractura en un ensayo de torsión, o la reducción en la altura en ensayos de compresión (recalcado) diseñados para generar esfuerzos secundarios de tensión elevados (Secc. 4-3). El recalcado con la fricción adherida en la cara extrema causa abarrilamiento severo y agrietamiento superficial en un material de ductilidad baja (Fig. 8-18*a*). Los esfuerzos de tensión son mayores en una probeta con collarín (Fig. 8-18*b*) o en un ensayo de indentación de ancho parcial (Fig. 8-18*c*).

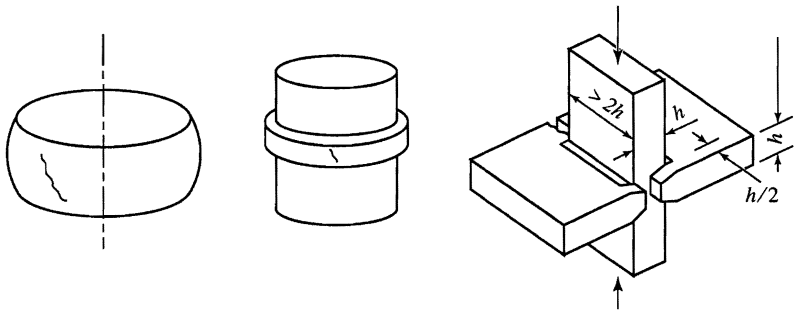


Figura 8-18 La factibilidad se puede evaluar por (*a*) compresión con fricción adherida, (*b*) al recalcar una probeta con collarín, o (*c*) por indentación de ancho parcial.

Ejemplo 8-19

Generalmente se reconoce que en los materiales superplásticos la ductilidad depende mucho de la tasa de deformación. Sin embargo, la dependencia está menos establecida en el trabajo convencional en caliente. El ensayo de indentación de ancho parcial es en particular adecuado para explorar la ductilidad de los materiales de grano grueso a tasas relevantes de deformación. En un estudio las probetas se cortaron de palanquillas fundidas en forma semicontinua de una aleación 7075 y parcialmente homogeneizadas durante 10 h a 470°C. La ductilidad se expresó como la reducción del área en la costilla de las probetas de ensayo (Fig. 8-18*c*).

Rapidez de deformación en la costilla, s^{-1}	1	10
Reducción del área a 400°C	75	58
Temperatura a la cual la reducción bajó a cero, °C	460	440

De esta manera, los procesos de restauración sensibles al tiempo no sólo afectan la ductilidad, sino también el inicio de la fragilidad en caliente. [Datos de D. Duly, J.G. Lenard y J.A. Schey, *J. Mater. Working Technol.*, **75**: 143-151 (1998).]

2. El estado de esfuerzos inducido por el proceso modifica la ductilidad. Si el proceso mantiene esfuerzos de compresión en todas las partes de la pieza de trabajo que se deforman (si prevalece la presión hidrostática), no pueden comenzar la formación de cavidades y la fractura dúctil. (En deformaciones muy extremas, la ductilidad del material se puede agotar y entonces ocurre una fractura de tipo cortante.) Sin embargo, si el proceso permite que se desarrollen esfuerzos de tensión, la formación de cavidades puede comenzar y causará, finalmente, la fractura.

El punto en que esta fractura debe ocurrir se predice con los *criterios de factibilidad*, cuya universalidad no ha sido comprobada. El sencillo pero útil criterio de Cockroft y Latham[2] enuncia que, para un metal dado, el trabajo realizado por el mayor esfuerzo local de tensión debe alcanzar un valor crítico. De esto se deriva que si el desarrollo de esfuerzos secundarios de tensión se suprime, la deformación puede llegar

[2] M.G. Cockroft y D.J. Latham, *J. Inst. Met.*, **96**: 33-39 (1968).

más lejos, de la misma forma en que la fractura en el ensayo de tensión se retrasa por la presión hidrostática. Por lo tanto, uno de los objetivos importantes en el diseño del proceso es incrementar la *componente de presión hidrostática* $\sigma_H = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$.

8-2-7 Formabilidad de láminas

En la sección 8-2-6 se vio que en los procesos de deformación volumétrica, los límites de la deformación se fijan por la factibilidad del material. La sobrevivencia en el trabajo de lámina de metal está ligada a la *formabilidad*, la cual también es una propiedad compleja, y ahora se debe relacionar con las definiciones de falla relevantes para los productos de lámina:

1. La primera objeción puede surgir cuando una lámina estirada adquiere una apariencia *granosa* (*cáscara de naranja*). Esto es un reflejo de la estructura policristalina de los metales: los granos individuales orientados en diferentes direcciones cristalográficas se deforman en grados que difieren poco. El arrugamiento de la superficie no tiene importancia para la integridad de la superficie de la parte. Si la apariencia granosa es inaceptable estéticamente, un material de grano más fino producirá una granosidad en una escala tan pequeña que será invisible a simple vista.

2. En la sección 8-1-2 se discutió que en algunos materiales la cedencia discontinua provoca en la formación de bandas de superficie (*líneas de Lüders, marcas de deformación por alargamiento,* o *gusanos*, como se les llama en el taller). Las marcas de deformación por alargamiento son inofensivas pero pueden ser inaceptables en superficies expuestas. Una vez que toda la superficie se cubre, ya no se pueden distinguir.

3. La apariencia se modifica y las propiedades funcionales de una parte se pueden afectar cuando ocurre una *estricción localizada.* Aunque la parte no se fractura, es posible la reducción de su capacidad de soporte de carga, aunque en algunas configuraciones la parte permanecerá por completo funcional. En general, los materiales se eligen para optimizar los factores que retrasan el inicio de la estricción (una elongación uniforme grande, que corresponde a un valor elevado de n, Secc. 8-1-1) o ayudan a difundir una estricción incipiente (un valor elevado de m, Secc. 8-1-6, o transformaciones, Secc. 8-1-7).

4. Una vez localizada la estricción, ocurre una deformación posterior por adelgazamiento local hasta que finalmente empieza la *fractura*. En la sección 8-1-6 se vio que la deformación posterior a la estricción es una función del valor de m. En el trabajo en frío, incluso un incremento ligero de m (digamos de 0 a 0.05) es de ayuda; en el trabajo en caliente una m elevada permite una deformación sustancial posterior a la estricción al tiempo que se mantiene un espesor razonablemente uniforme (en $m = 1$ la lámina adelgazaría en una forma muy uniforme). Una reducción mayor del área provoca que el espesor de la lámina se reduzca aún más sin fractura, pero la capacidad de soporte de carga de la pieza se puede perder si el adelgazamiento local es demasiado severo.

En resumen, una lámina de metal altamente moldeable tiene una elongación muy uniforme (o un elevado valor de n), una gran deformación posterior a la estricción (o un elevado valor de m) y puede sufrir una transformación. En la práctica industrial, una

elongación alta en el ensayo de tensión [ecuación (4-9*b*)] se ha considerado desde hace mucho tiempo como un atributo deseable; el examen de la figura 8-2*a* muestra que esta visión se traduce en una combinación de n y m elevadas, y por consiguiente es fundamentalmente correcta. Para un material dado, la ductilidad disminuye con el incremento de la dureza, así que es común especificar esta última además de, o en vez de, la elongación. Una ductilidad adecuada es un criterio necesario pero no suficiente; asimismo, un material deseable no presenta bandas de Lüders y tiene una anisotropía favorable. Igual que en la deformación volumétrica, los límites de la deformación también dependen del estado de esfuerzos generado en el proceso (Cap. 10).

8-3 ALEACIONES FORJADAS

En todos los procesos de deformación, se da forma a la pieza de trabajo al desplazar material de localizaciones no deseadas a posiciones requeridas por la forma de la pieza. Esto exige que el material sea capaz de soportar una deformación plástica sin fracturarse. Se analizó que la factibilidad volumétrica y la formabilidad de lámina se ven afectadas por el proceso mismo. De esta manera, en forma general, sólo se puede decir que las aleaciones adecuadas para el procesamiento de la deformación (tradicionalmente llamadas *metales forjados*) deben poseer una ductilidad mínima conmensurable al proceso que se planea.

Este requisito se satisface por completo en todos los metales puros que tienen un número suficiente de sistemas de deslizamiento (Secc. 6-3-1) y también por la mayor parte de las aleaciones de solución sólida de los mismos metales. Los materiales de dos fases y de fases múltiples (Secc. 6-3-2) son deformables si cumplen con ciertos requisitos mínimos. No debe existir una fase líquida o frágil en las fronteras de los granos o a través de varios de ellos (así, no se pueden trabajar en frío el hierro gris, el hierro fundido blanco, o una aleación hipereutéctica de Al-Si). Las cantidades excesivas de un constituyente frágil no son permitidas aun en una matriz dúctil, sobre todo si aquél es además grueso o laminar. Si la matriz es menos dúctil, es más importante que el material esté libre de otras características debilitantes, como las inclusiones, los vacíos o los contaminantes de la frontera de grano.

Los aceros representan el segmento más grande de los productos forjados (tabla 8-1), y de acuerdo con el sistema que se adoptó en la sección 7-3 para las aleaciones fundidas, los materiales ferrosos se analizarán primero, seguidos por los no ferrosos. Las propiedades importantes de algunas aleaciones seleccionadas se establecen en las tablas 8-2 y 8-3.

8-3-1 Aceros al carbono

En la sección 7-3-1 se analizaron los aceros como aleaciones para fundición. Se mencionó que los aceros (así como otros metales) por lo general se desoxidan con objeto de evitar la porosidad debida al gas. Sin embargo, esto no precisamente es el caso en las

fundiciones destinadas para trabajo de metal; se pueden distinguir varias clases de acero según la práctica de desoxidación.

1. Los llamados *aceros efervescentes* no se desoxidan. El carbono reacciona con el oxígeno en la fusión para formar monóxido de carbono de acuerdo con la reacción $2C + O_2 = 2CO$. Como el CO es un gas reductor, las grandes sopladuras que se forman tienen superficies limpias, y a las temperaturas y presiones elevadas que prevalecen en el trabajo en caliente, se sueldan sin huella. Una ventaja del gran número de burbujas de gas que se forman durante la solidificación es que el rechupe se elimina de manera virtual. Las sopladuras son prominentes a una distancia por debajo de la superficie del lingote y ayudan a mover los contaminantes hacia el centro, impartiendo un fuerte patrón normal de segregación (Fig. 7-4*a*), el cual persiste durante todos los pasos del proceso. La superficie del lingote (*reborde*) es particularmente limpia y baja en carbono. La superficie limpia es una ventaja en muchas aplicaciones y con frecuencia se produce en esta forma la lámina con hasta 0.25% C.

2. La separación del gas se suprime hasta cierto punto cuando se coloca un *reverbero* (un tapón metálico) en el lingote (*aceros reverberados*), el cual retiene un poco de la limpieza de la superficie, pero logra una homogeneidad estructural mayor que en un acero efervescente. Los *aceros semicalmados* se desoxidan parcialmente y son adecuados para aplicaciones en que no se requiere gran uniformidad estructural, como en muchos aceros usados para propósitos de construcción.

3. Las aplicaciones más exigentes requieren *acero calmado*, en el cual se evita (*calma*) la reacción del gas al añadir aluminio, silicio, etcétera. Virtualmente no se presenta la segregación, las propiedades son uniformes en todas partes y el tamaño de grano se puede controlar en el producto terminado. Sin embargo, se debe asegurar una alimentación adecuada para evitar rechupes.

Se puede hacer otra distinción de acuerdo con el contenido de carbono. Los *aceros al bajo carbono* (menos de 0.15% C) contienen muy poco de éste como para beneficiarse del endurecimiento, y se emplean con el acabado del trabajo en caliente, o, para máxima ductilidad, en la condición recocida, principalmente en la forma de lámina y alambre. Debido a su importancia especial para el trabajo de lámina de metal, se analizan con más detalle en la sección 10-1-1. Los aceros de menos de 0.25% C (con frecuencia llamados como *aceros dulces*) tienen una resistencia un poco más alta, pero aún son fáciles de soldar y se emplean mucho para propósitos estructurales como barras, secciones y placas laminadas en caliente. Los *aceros al medio carbono* (de 0.25 a 0.55% C) a menudo se tratan térmicamente (templados y revenidos) después de la manufactura por medio del trabajo en caliente o en frío. Los *aceros al alto carbono* (0.55-1.0% C) tienen aplicaciones como resortes y partes resistentes al desgaste.

Los aceros que se van a trabajar en frío suelen ser recocidos, y los de contenido mayor de carbono se esferodizan para asegurar máxima ductilidad. Una combinación especial de sus propiedades se obtiene al carburizar la superficie de una pieza forjada de acero al bajo carbono (Secc. 6-4-4). Después del tratamiento térmico, una parte como un engrane o una flecha tendrá una superficie dura, resistente al desgaste, y un núcleo tenaz.

8-3-2 Aceros aleados

Para muchas aplicaciones, los aceros al carbono no pueden proporcionar la combinación requerida de las propiedades; por lo que se especificarán los aceros de aleación, más costosos.

Aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA) Dependen de cantidades muy pequeñas de Ti, V o Nb acopladas con procesos termomecánicos (Secc. 8-1-7) para desarrollar resistencia y tenacidad elevadas (véase el ejemplo 8-16). Los precipitados de carbonitruros inhiben el crecimiento de grano en la austenita y de esta manera refinan la ferrita que se forma al enfriar a partir de la temperatura controlada del trabajo en caliente. La combinación del refinamiento de grano y del endurecimiento por precipitación causa elevadas resistencias a la fluencia (350-560 MPa). Las inclusiones dúctiles de sulfuro de manganeso tienden a extenderse en venillas y se reducen las propiedades transversales al impacto del acero. La adición de Zr o Ti reduce la plasticidad de las inclusiones y evita su difusión, removiendo de esta manera sus efectos dañinos.

Aceros de baja aleación Las cantidades relativamente pequeñas de elementos de aleación permiten el tratamiento térmico de secciones más gruesas (Secc. 6-4-3).

Aceros de alta aleación Las concentraciones mayores de elementos de aleación, en combinación con un contenido elevado de carbono, aumentan la dureza y la dureza en caliente de los aceros para herramientas y matrices, introduciendo carburos resistentes a la temperatura (como el WC, VC y carburos de cromo). Se trabajan más fácilmente en la condición de recocido, aunque el mayor contenido de carburo incrementa las fuerzas de formado, el desgaste de la matriz, y reduce la ductilidad. Por lo tanto, estos aceros se suelen trabajar en caliente, ya que su resistencia a la fluencia en el rango de temperatura austenística no es mucho más alta que la de los aceros al carbono.

Aceros inoxidables Su resistencia a la corrosión los hace valiosos en muchas aplicaciones. La mayoría se puede trabajar en caliente si se toman las precauciones adecuadas. Los que contienen níquel y cromo (*aceros inoxidables austeníticos*) se encuentran entre los materiales más formables en frío debido a su elevada tasa de endurecimiento por deformación.

8-3-3 Materiales no ferrosos

Igual que en la sección 7-3-2, los materiales no ferrosos se abordarán en el orden ascendente de su punto de fusión, no de acuerdo con su importancia relativa.

Aleaciones de estaño La baja resistencia del estaño lo hace inadecuado como material estructural, excepto para hojas y tubos colapsables (aunque se usa por su resistencia a la corrosión). Entre las aleaciones de estaño, el peltre moderno se deforma con facilidad, se utiliza principalmente en productos decorativos.

Aleaciones de plomo El plomo tiene baja resistencia pero su resistencia a la corrosión fomentó una amplia difusión de su uso en forma de lámina, tubo y blindaje de cables. Se puede reforzar por medio de una variedad de elementos (As, Sn, Bi, Te y Cu). También sirve como absorbente de sonido, vibraciones y de radiación. Una aleación de Pb-Ca-Sn se usa, en forma de lámina expandida, para baterías de almacenamiento de electricidad. La toxicidad del plomo provoca restricciones en muchas aplicaciones.

Aleaciones de zinc El zinc puro se emplea como el material para las camisas estiradas de baterías, techumbres corrugadas y burletes (usualmente con 1% Cu para las dos últimas aplicaciones). Debido a su estructura hexagonal, se trabaja en frío arriba de 20°C.

Una transformación eutéctica en el sistema zinc-aluminio permite la producción comercial de un material de grano extremadamente fino que presenta superplasticidad (Secc. 8-1-6). Las aleaciones binarias con 22% Al y las variantes aleadas se pueden deformar posteriormente a temperaturas elevadas, casi como plásticos, y obtener así una resistencia sustancial a temperatura ambiente. Se han usado para trabajos de prototipos y gabinetes para instrumentos en que se debe reproducir un detalle considerable del diseño.

Aleaciones de magnesio La estructura hexagonal del magnesio lo hace algo frágil a temperatura ambiente. Sin embargo, se trabaja con facilidad a temperaturas ligeramente elevadas, por lo general arriba de 220°C, las cuales no crean problemas en la herramienta o de lubricación y sí dan el beneficio de una gran facilidad de formado. Tanto el endurecimiento por aleación de solución sólida como el endurecimiento por precipitación se explotan para obtener un material de resistencia mayor. Su baja densidad se combina con una resistencia elevada para producir razones de resistencia elevada al peso, deseables para aplicaciones aeroespaciales y automotrices.

Aleaciones de aluminio El segmento de crecimiento más acelerado en la industria del trabajo de metal es el de las aleaciones de aluminio. Siendo un material fcc, el aluminio se deforma con facilidad en todas las temperaturas. Con la ayuda de mecanismos de endurecimiento por solución sólida y por precipitación, se pueden producir materiales de gran resistencia a menudo con una razón de resistencia al peso muy alta. Las aleaciones de aluminio han sido el principal material de construcción para aeronaves, y están empezando a hacer grandes incursiones en la construcción de vehículos terrestres como en parachoques, ruedas y algunos componentes de la carrocería (incluidos bastidores completos). Su resistencia a la corrosión y su peso ligero las hace atractivas para muchas aplicaciones domésticas, en la industria de alimentos, para recipientes, para casos marinos y para plantas químicas. Se puede obtener una conductividad eléctrica equivalente a un costo con frecuencia menor al del cobre, y se usan en grandes cantidades en líneas de alto voltaje, barras colectoras y embobinados de motores.

Su condición metalúrgica se llama temple y se designa por una letra seguida de números. La mayoría de las aleaciones se forman en la condición de recocido (O). Las aleaciones no tratables térmicamente adquieren una resistencia útil a través del trabajo en frío (condición H1), aunque a costa de la ductilidad; un segundo dígito describe el grado de endurecimiento (por ejemplo, H12 = un cuarto duro; H14 = medio duro; h18 =

duro). El temple H2 (endurecido por deformación y parcialmente recocido) proporciona una ductilidad mayor para una resistencia dada (Fig. 8-9). Las aleaciones tratables térmicamente se pueden trabajar en la condición de recocido, luego se someten a un tratamiento de solución seguido por envejecimiento natural (T4) o artificial (condición T6). Se puede obtener una resistencia aún mayor trabajando en frío una solución material tratado térmicamente por solución, ya que en un envejecimiento natural (T3) o artificial (T8) subsecuente, los precipitados se hacen demasiado finos y están bien distribuidos (Secc. 8-1-7 y ejemplo 8-15).

El aluminio de alta pureza es un excelente conductor. El aluminio de pureza comercial (1100) se usa mucho para hojas, utensilios de cocina, etcétera. La aleación de manganeso de solución sólida (serie 3000) tiene una mayor resistencia y una ductilidad aún adecuada y es un material de propósito general para artículos de lámina de metal. Las aleaciones de Al-Mg de solución sólida (serie 5000) tienen una excelente resistencia a la corrosión, de ahí que sean adecuadas para acabados automotrices y aplicaciones marinas. Las aleaciones de Al-Cu serie 2000 adquieren gran resistencia y una ductilidad razonable en la condición endurecida por envejecimiento. Junto con las aleaciones de Al-Zn-Mg de la serie 7000, son los materiales primordiales para la construcción de aeronaves, aunque las aleaciones más ligeras de aluminio-litio pueden ofrecer razones de resistencia al peso aún mayores (cada porcentaje de Li reduce la densidad en 3% e incrementa el módulo elástico en 5%, pero se necesita un proceso especial para minimizar la anisotropía). Algunas aleaciones como las de Al-Li y Al-Cu-Zr son superplásticas. Recientemente, las adiciones de escandio han elevado la temperatura de recristalización a 600°C, lo que propicia un tamaño de grano muy pequeño y con resistencia elevada.

Aleaciones con base de cobre El cobre es uno de los materiales más dúctiles y tiene la conductividad eléctrica más elevada, después de la plata. Su alta conductividad térmica, y su facilidad para unirse por métodos de soldadura suave y fuerte, lo hacen el material principal en la construcción de alambrado eléctrico y para sistemas domésticos de agua. Su resistencia se puede incrementar sin gran pérdida de la conductividad eléctrica, por medio de pequeñas cantidades de Ag, Ca o Be.

Las aleaciones de solución sólida con zinc (latones) son las que más se utilizan. Como su nombre lo implica, el *latón de cartuchos* (latón α) es extremadamente dúctil y adecuado para deformaciones extremas, mientras que los latones $\alpha + \beta$ (como el *metal Muntz*) son menos dúctiles pero toleran los contaminantes; además, su buena maquinabilidad se puede mejorar al añadir plomo. El plomo se puede agregar también a los latones α, pero no se pueden trabajar en caliente, pues el plomo se localiza en la frontera de grano.

Los bronces al estaño normalmente se desoxidan con fósforo, el cual forma un eutéctico terniario de baja fusión. En consecuencia, son frágiles en caliente a menos que se homogeneicen antes del trabajo en caliente. Los bronces al aluminio se trabajan con facilidad en caliente, así como las aleaciones de níquel (*cuproníquel*) y ternarias (como la *plata de níquel*, una aleación de Cu-Ni-Zn).

El cálido brillo del cobre y las gradaciones infinitas de amarillos de latón y bronce han atraído a los humanos por milenios; su atractivo estético con frecuencia se resalta mediante productos de corrosión (*pátina*).

Aleaciones con base de níquel El níquel se deforma con facilidad en su forma pura, tanto a temperatura elevada como a la ambiente. Algunas de sus aleaciones, sobre todo aquellas con cobre, no presentan problemas de manufactura. Las superaleaciones con base de níquel son altamente aleadas con elementos para endurecimiento por solución sólida y por precipitación, para dar una resistencia elevada a la termofluencia a temperaturas elevadas. Esto las hace difíciles de trabajar porque el rango de la temperatura del trabajo en caliente es muy estrecho y cercano al solidus. Se usan técnicas complejas de fusión y vaciado para excluir los contaminantes y los gases, y se necesita un conocimiento profundo de la metalurgia de las aleaciones y de las tecnologías de proceso para evitar el agrietamiento durante el trabajo en caliente.

Aleaciones de alta temperatura El titanio hexagonal, estable a temperatura ambiente, tiene una ductilidad razonable pero requiere de frecuentes procesos de recocido. La forma bcc (más de 880°C) es la más dúctil. Para el control de las propiedades terminadas, las aleaciones a menudo se trabajan apenas debajo de la temperatura de transformación, pero a tasas mayores de deformación tienen una resistencia relativamente alta. Por lo tanto, frecuentemente se emplea el forjado isotérmico; ya que el enfriamiento no es una preocupación, la elevada sensibilidad a la tasa de deformación y la ductilidad del material se pueden explotar trabajando con una tasa muy baja de deformación y con sus correspondientes bajos esfuerzos.

Debido a su resistencia a la corrosión, el titanio y sus aleaciones, en las formas de tubos y láminas, se utilizan mucho en aplicaciones químicas. Las aleaciones de titanio tratadas térmicamente con elevadas razones de resistencia a peso, se han hecho indispensables para componentes críticos de aeronaves, incluyendo las etapas del compresor en los motores de reacción.

Las aleaciones de metales refractarios (molibdeno, tungsteno y niobio) forman fácilmente un óxido volátil a temperaturas elevadas, de ahí que se deban procesar en el vacío o en una atmósfera protectora. El tungsteno se usa en gran medida en forma de alambre en lámparas incandescentes. Los avances recientes en las aleaciones de metales refractarios fueron estimulados por las exigencias de la tecnología de la era espacial, para materiales que funcionen a temperaturas muy elevadas. Un derivado de este progreso es el material para matrices con base de molibdeno TZM, el cual se suele emplear en la condición de trabajo en frío; algunos efectos de éste se retienen hasta cerca de 1 000°C.

8-4 RESUMEN

En este capítulo se analizaron conceptos aplicables a todos los procesos de deformación plástica.

1. El esfuerzo de fluencia es el esfuerzo real requerido para mantener la deformación plástica. En el trabajo en frío, el esfuerzo de fluencia se incrementa y la ductilidad disminuye debido al endurecimiento por deformación; el esfuerzo de fluencia suele ser una función de potencia de la deformación. La fluencia discontinua y la anisotropía de las propiedades pueden modificar el comportamiento.

2. El trabajo en frío se puede explotar para hacer un producto fuerte pero menos dúctil. Es factible recuperar las propiedades originales aplicando procesos de restauración a temperatura elevada (recuperación y recristalización), los cuales de nuevo se pueden controlar para obtener un conjunto de propiedades más deseables.
3. Los procesos del endurecimiento por deformación y de restauración ocurren de manera simultánea en el trabajo en caliente. Como los procesos de restauración toman tiempo, el esfuerzo de fluencia se convierte en una función de la tasa de deformación y de la temperatura. El trabajo en caliente es eminentemente adecuado para destruir una estructura fundida. La combinación de la deformación y de las transformaciones puede producir materiales con una resistencia y ductilidad excepcionales.
4. La ductilidad, como se observa en el ensayo de tensión, refleja las propiedades del material: la deformación uniforme (previa a la estricción) se incrementa con el endurecimiento por deformación, mientras que la deformación posterior a la estricción se eleva con la sensibilidad a la tasa de deformación.
5. En los procesos prácticos el estado de esfuerzos es típicamente triaxial, y los esfuerzos requeridos para la deformación plástica se pueden encontrar por medio de los criterios de fluencia. Para calcular las presiones y las fuerzas que prevalecen en un proceso particular, será necesario tomar en cuenta los efectos de la fricción en la interfaz matriz-pieza de trabajo y el incremento de la presión debido a la no homogeneidad de la deformación.
6. La ductilidad en tensión se puede considerar como una propiedad del material, pero se ve afectada por el estado de esfuerzos que prevalece, lo cual origina los conceptos de factibilidad volumétrica y formabilidad de lámina.

PROBLEMAS 8A

8A-1 Defina el esfuerzo y la deformación de ingeniería en tensión (con palabras o fórmulas).

8A-2 Defina el esfuerzo y la deformación naturales (reales) en tensión.

8A-3 Dibuje un boceto de una probeta cilíndrica para ensayo de tensión (*a*) antes de la carga, (*b*) después de la carga pero antes de la estricción y (*c*) después de la estricción. Con flechas, indique los esfuerzos que actúan en los tres casos.

8A-4 Escriba la ecuación de potencia para el endurecimiento por deformación; defina las constantes.

8A-5 (*a*) Dibuje una curva típica de ensayo de tensión para un material dúctil. Identifique el rango (*b*) previo a la estricción y (*c*) posterior a ella. Indique la propiedad del material más importante en cada rango.

8A-6 Dibuje una curva característica de ensayo de tensión para un material, mostrando la elongación del punto de cedencia (YPE). (*b*) Establezca qué causa el fenómeno. La probeta se descarga después de la deformación plástica más allá del YPE; dibuje curvas que muestran (*c*) la recarga inmediata después de la descarga y (*d*) un nuevo ensayo después de varios meses.

8A-7 Determine qué problema significativo puede causar la elongación en el punto de cedencia en (*a*) la deformación volumétrica y (*b*) en el trabajo de lámina.

8A-8 Defina *r* para una lámina de metal con la ayuda de un boceto.

8A-9 Dibuje un diagrama que indique el cambio en YS, TS y el. como una función del trabajo en frío.

8A-10 Una aleación se trabajó en frío hasta YS = 330 MPa, TS = 350 MPa y el. = 2%. Dibuje un diagrama que muestre cómo cambian estos valores como una función del tiempo, al mantener la aleación a una temperatura superior a $0.5T_m$.

8A-11 Escriba la ley de potencia aplicable al trabajo en caliente. Establezca las constantes.

8A-12 Defina superplasticidad (*a*) en términos descriptivos y (*b*) por referencia a la ley de potencia relevante. (*c*) Indique la condición crítica del material para la superplasticidad.

8A-13 Dibuje un diagrama TTT típico para el acero. (*b*) Muestre las fases principales. (*c*) Defina el ausformado dibujando la línea apropiada en el diagrama.

8A-14 Dibuje un esquema que contenga los criterios de cedencia de Tresca y von Mises para el esfuerzo plano. Identifique los puntos que corresponden a la (*b*) tensión uniaxial, (*c*) compresión uniaxial, (*d*) deformación plana por compresión, (*e*) tensión biaxial equilibrada y (*f*) cortante puro.

8A-15 La recuperación y la recristalización son dos procesos para cambiar las propiedades de los materiales endurecidos por deformación. (*a*) Explique la diferencia entre ambos en términos del mecanismo atómico operativo. (*b*) Dibuje dos diagramas, lado a lado, para mostrar los efectos de la recuperación y la recristalización en la resistencia a la fluencia, resistencia a la tensión y elongación total.

8A-16 Dibuje un diagrama tridimensional que señale la dependencia del tamaño de grano en la deformación anterior y la temperatura de recocido mientras se recuece un material endurecido por deformación.

8A-17 Dé una definición breve del fibramiento mecánico y escriba sus fuentes. (*b*) En una gráfica sencilla muestre su efecto en las propiedades mecánicas tales como resistencia, ductilidad y resistencia a la fatiga.

PROBLEMAS 8B

8B-1 Se va a fabricar una pieza de un nuevo acero aleado resistente al calor. Se ha propuesto estimar las fuerzas de formado partiendo de los datos de resistencia a la tensión en caliente proporcionados por la compañía acerera. (*a*) ¿Está de acuerdo? (*b*) Justifique. (*c*) Sugiera el curso apropiado de acción.

8B-2 En un análisis se afirma que es factible ignorar la sensibilidad a la tasa de deformación en el trabajo en frío. (*a*) ¿Está de acuerdo? (*b*) Si no, ¿qué beneficio o daño esperaría de una sensibilidad alta y baja a la tasa de deformación?

8B-3 Dibuje un boceto de la vista lateral de una plancha fundida de 100 mm de espesor. La plancha tiene porosidad en la línea central. Muestre conjuntos de herramientas que (*a*) abrirían los poros y (*b*) los cerrarían. Justifique su respuesta.

8B-4 (*a*) Haga un boceto de la porción calibrada de una probeta de tensión de una lámina de metal con ancho *w*, espesor *h* y longitud de calibración *l*. (*b*) Dibuje la probeta después de una deformación plástica. (*c*) Defina el valor *r* con referencia a las dimensiones marcadas en (*a*) y (*b*).

8B-5 Una pieza de lámina de metal se formó superplásticamente. Se distorsionó mucho en servicio a temperatura elevada. (*a*) Identifique la causa del problema y (*b*) sugiera una solución.

8B-6 Una compañía de aluminio afirma que el material que suministró es superplástico, pero éste se fracturó después de una pequeña deformación en una prensa mecánica rápida. Para identificar el problema, (*a*) indique qué se puede esperar de un material superplástico

y (*b*) sugiera las características de un proceso que tome ventaja de la superplasticidad.

8B-7 Se ha sugerido que la presión hidrostática en todas partes incrementa YS, TS y el. Para explicar su punto de vista, (*a*) dibuje una curva ingenieril típica esfuerzo-deformación para un metal dúctil. (*b*) Identifique los ejes. (*c*) Marque YS, TS y la elongación total. (*d*) Muestre el efecto de la presión hidrostática. (*e*) Justifique su respuesta.

8B-8 (*a*) Dibuje un diagrama para mostrar el tamaño de grano obtenido al recocer un material trabajado en frío como una función de la temperatura y antes del trabajo en frío. (*b*) Sugiera un proceso o secuencia de procesos para producir un material de grano muy fino.

8B-9 Un metal forjado a menudo se caracteriza por fibramiento. (*a*) ¿Cuál es el origen del fibramiento? (*b*) Con frecuencia se afirma que ese metal siempre es mejor en la fatiga que una fundición. Critique tal afirmación.

8B-10 Un estudiante escribió que "el fibramiento mecánico resulta en anisotropía de las propiedades y en un valor elevado de r". Critique este enunciado.

8B-11 Un estudiante escribió que "un material libre de fibramiento es isotrópico". Analice este enunciado.

8B-12 Un estudiante respondió la pregunta "¿qué es textura?" escribiendo que "es la anisotropía de las propiedades" . Critique la respuesta.

8B-13 En el ejemplo 6-13 se vio que la lámina recocida de latón se puede obtener con diferentes tamaños de grano. Sugiera una secuencia adecuada de procesamiento para un tamaño muy fino de grano.

8B-14 (*a*) Dé una definición breve de la textura y escriba la fuente o fuentes para ella, (*b*) determine su efecto posible sobre las propiedades mecánicas tales como resistencia y ductilidad, y (*c*) indique la consecuencia sobre la deformación plástica.

8B-15 En un análisis se afirma que la sobrevivencia de un material en un proceso de deformación volumétrica se puede predecir por medio de su elongación a la tensión. (*a*) ¿Está de acuerdo? (*b*) Si no, dé una explicación concisa de su punto de vista.

PROBLEMAS 8C

8C-1 Se sabe que el acero al bajo carbono tiene una ligera pero no despreciable sensibilidad a la tasa de deformación a temperatura ambiente. Para determinar el valor m, se ensayaron probetas de ancho w = 12.68 mm, espesor h = 3.23 mm, y longitud de calibración l = 50 mm, con una velocidad del cabezal de 6 mm/min hasta que se alcanzó una carga de 10 660 N. En este punto la velocidad se incrementó instantáneamente diez veces a 60 mm/min y la carga se incrementó a 11 096 N. Calcule el valor de m. (*Sugerencia*: como en el momento del cambio de velocidad el área de la sección transversal es constante, la fuerza se puede sustituir por el esfuerzo.)

8C-2 Para obtener una idea del efecto del endurecimiento por deformación en el esfuerzo de fluencia [ecuación (8-4)], (*a*) calcule el valor de ε^n para ε = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 1.2, 1.5 y 2.0, y n = 0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 y 0.6. (*b*) Grafique la familia de curvas n como una función de ε.

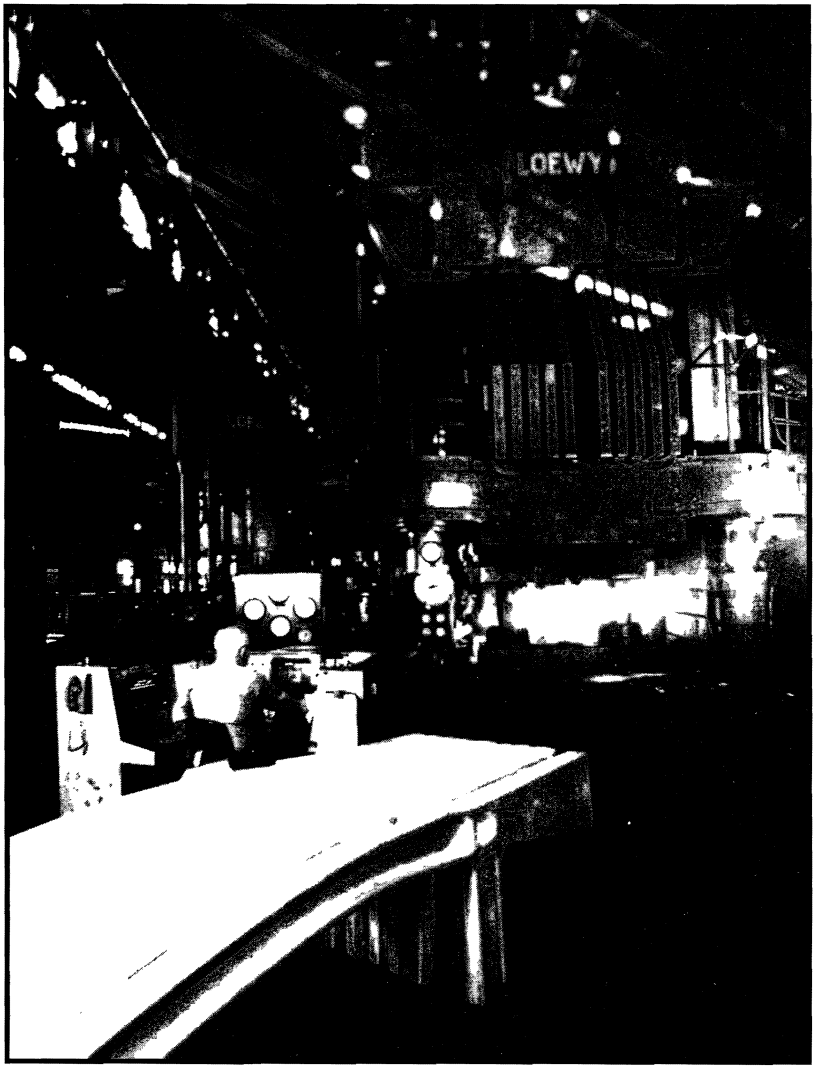
8C-3 Para propósitos de conversación, se usa mucho la deformación de ingeniería. Derive fórmulas para convertir la deformación natural en tensión de ingeniería y deformación por compresión.

8C-4 Para tener una aproximación del efecto de la sensibilidad a la tasa de deformación en el esfuerzo de fluencia [ecuación (8-11)], (*a*) calcule el valor de $\dot{\varepsilon}^m$ para $\dot{\varepsilon}$ = 1, 10, 100 y 1 000 s^{-1} y m = 0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 y 0.6. (*b*) Grafique la familia de curvas m como una función de $\dot{\varepsilon}$.

8C-5 Una probeta de lámina de metal de una aleación de aluminio con dimensiones w = 10 mm, h = 1.5 mm y l = 50 mm se ensaya en tensión. Después de una elongación de 25%, el ancho es w_1 = 9.23 mm. Calcule el valor r.

LECTURAS ADICIONALES

Altan, T., S.I. Oh y H.C. Gegel: *Metal Forming—Fundamentals and Applications*, 1983.
Avitzur, B.: *Metal-Forming Processes*, Wiley-Interscience, 1981.
Avitzur, B.: *Handbook of Metalforming Processes*, Wiley-Interscience, 1983.
Backofen, W.A.: *Deformation Processing*, Addison-Wesley, 1972.
Blazynski, T.Z. (ed.): *Plasticity and Modern Metal Forming Technology*, Elsevier, 1989.
Boyer, H.E.: *Atlas of Stress-Strain Curves*, American Society for Metals, 1986.
Byers, J.P.: *Metalworking Fluids*, Dekker, 1994.
Dieter, G.E.: *Mechanical Metallurgy*, 3a. ed., McGraw-Hill, 1986.
Dieter, G.E. (ed.): *Workability Testing Techniques*, American Society for Metals, 1984.
Frost, H.J. y M.F. Ashby: *Deformation-Mechanism Maps*, Pergamon, 1982.
Ghosh, S.K., y M. Predeleanu (eds.): *Materials Processing Defects*, Eelsevier, 1995.
Hosford, W.F. y R.M. Caddell: *Metal Forming Mechanics and Metallurgy*, 2*a*. ed., Prentice Hall, 1993.
Kobayashi, S., S.I. Oh y T. Altan: *Metal Forming and the Finite-Element Method*, Oxford University Press, 1989.
Mielnik, E.: *Metalworking Science and Engineering*, McGraw- Hill, 1991.
Natchtman, E. y S. Kalpakjian: *Lubricants and Lubrication in Metalworking Operations*, Dekker, 1985.
Prasad, Y.V.R.K. y S. Sasidhara (eds.): *Hot Working Guide: A Compendium of Processing Maps*, ASM International, 1997.
Rowe, G.W.: *Elements of Metalworking Theory*, Arnold, London, 1979.
Schey, J.A.: *Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication and Wear*, American Society for Metals, 1983.
Wagoner, R. y J-L. Chenot: *Fundamentals of Metalforming Analysis*, Wiley, 1996.



Las piezas para una aeronave que se ven en primer plano se forjan en matriz cerrada en una prensa hidráulica gigante de 350 GN; a medida que la matriz se cierra, las llamas forman una llamarada debido al lubricante aplicado a la matriz y a la pieza de trabajo. (*Cortesía de Wyman-Gordon Company, North Grafton, Massachusetts.*)

capítulo

9

Procesos de deformación volumétrica

Estamos listos para explorar las aplicaciones de los principios básicos de los procesos en los cuales el volumen de la pieza de trabajo se deforma, incluyendo:

El forjado en matriz abierta con herramientas sencillas y secuencias complejas de proceso

El forjado por impresión y en matriz cerrada con herramientas complejas y secuencias sencillas de proceso

La extrusión de partes con forma neta y casi neta

La extrusión y estiramiento de alambre, tubos y perfiles con sección formada

La laminación de plancha, lámina, tiras y hojas planas, así como productos formados

La estimación de la presión, de la fuerza y de los requerimientos de potencia de la matriz

El diseño de piezas para facilitar el proceso

Antes de iniciar en el análisis de los procesos, se debe explorar la aplicación de los principios del capítulo 8 a las circunstancias específicas de deformación volumétrica. Entonces se podrán estudiar los procesos reales, con particular énfasis en aquellos que producen artículos terminados. Los procesos de deformación volumétrica están entre aquellos para los que se pueden hacer cálculos útiles con base en métodos analíticos sencillos; dichas estimaciones se introducirán en forma adecuada para soluciones por hojas de cálculo. Las deducciones de las ecuaciones subyacentes se encuentran en el Manual del Instructor.

9-1 CLASIFICACIÓN

Los procesos se pueden clasificar de acuerdo con varios puntos de vista, los cuales pueden ser válidos bajo ciertas condiciones.

9-1-1 Temperatura de deformación

Ya se analizó que las propiedades de un material son una función de la temperatura, con $0.5T_m$ como una línea divisoria aproximada entre el comportamiento en caliente y en frío. En la práctica, la distinción se hace con respecto a la temperatura ambiente.

Trabajo en caliente En el uso coloquial, este término simplemente se refiere al trabajo de un material precalentado. Las temperaturas comunes del trabajo en caliente se dan en las tablas 8-2 y 8-3. Como para la mayoría de los materiales técnicos (excepto el estaño y el plomo), $0.5T_m$ está por encima de la temperatura ambiente, la definición coloquial es correcta también desde el punto de vista de los materiales.

El trabajo en caliente ofrece varias ventajas: los esfuerzos de fluencia son bajos, de ahí que las fuerzas y los requerimientos de potencia sean relativamente bajos, y se pueden deformar incluso grandes piezas de trabajo con equipo de tamaño razonable. La ductilidad es alta, por lo que se pueden realizar (usualmente en una sucesión de pasadas) grandes deformaciones (una reducción en exceso de 99%) y generar formas complejas en las piezas. En general, es factible que la estructura fundida se destruya (Secc. 8-1-7) por una deformación equivalente a una reducción de 75% en la altura o en el área, aunque se pueden necesitar reducciones de 90% (razón 10:1) si se van a obtener propiedades más elevadas.

También existen desventajas. Se requiere de energía para calentar la pieza de trabajo hasta una temperatura elevada. La mayoría de los materiales se oxidan y los óxidos de algunos metales (por ejemplo, cascarilla sobre el acero) pueden afectar el acabado superficial. Las variaciones en las temperaturas de acabado pueden conducir a tolerancias dimensionales muy amplias y a un conjunto menos definido de las propiedades en la condición de trabajado en caliente.

El trabajo en caliente se puede llevar a cabo por:

1. *Formado no isotérmico.* La herramienta de deformación debe ser varias veces más fuerte que la pieza de trabajo, lo que usualmente significa que la herramienta se debe mantener mucho más fría. Entonces es necesario minimizar el *tiempo de contacto* para evitar el *enfriamiento* excesivo. El enfriamiento de las capas superficiales de la pieza de trabajo tiene varias desventajas: se retrasa la fluencia del material; el enfriamiento de secciones delgadas limita el espesor mínimo obtenible de pared; se incrementan la presión de la matriz y la fuerza de deformación. El enfriamiento también afecta al producto, porque un enfriamiento variable introduce variaciones en las propiedades. Además, el contacto periódico con la pieza de trabajo caliente expone a las herramientas a un ciclo térmico, el cual conduce a la fatiga térmica (Secc. 4-5).

2. *Formado isotérmico.* Algunos de los problemas arriba citados desaparecen cuando la herramienta está a la misma temperatura que la pieza de trabajo. El tiempo de contacto deja de ser un problema puesto que no hay enfriamiento; sin embargo, es más difícil encontrar un material y un lubricante adecuados para la herramienta.

3. *Trabajo controlado en caliente.* Suele hacerse en forma no isotérmica, por lo que el trabajo controlado en caliente se usa para impartir propiedades deseables (Secc. 8-1-7).

Trabajo en frío En sentido coloquial, el término se refiere al trabajo a temperatura ambiente, aunque el trabajo de la deformación puede elevar las temperaturas desde 100 hasta 200°C. El trabajo en frío comúnmente sigue al trabajo en caliente, y normalmente la cascarilla y otras películas superficiales se remueven por medio de un ataque químico (*decapado*) o por un chorro de perdigones.

El trabajo en frío tiene varias ventajas. En ausencia de enfriamiento y oxidación se pueden obtener tolerancias más cerradas, un mejor acabado superficial y también paredes más delgadas. Las propiedades finales de la pieza de trabajo pueden controlarse con exactitud y, si se desea, retener la resistencia elevada obtenida durante el trabajo en frío; asimismo si se necesita una ductilidad elevada, es posible controlar el tamaño del grano para aprovechar el recocido (Secc. 8-1-5). La lubricación es, en general, un poco más fácil.

También existen desventajas. Para la mayoría de los materiales tecnológicos, la temperatura ambiente está por debajo de $0.5T_m$; por lo tanto, los esfuerzos de fluencia son elevados, de ahí que también lo sean las presiones en la herramienta, las fuerzas de deformación y los requisitos de potencia. La ductibilidad de muchos materiales es limitada, lo que restringe la complejidad de las formas que se pueden producir fácilmente.

Trabajo en tibio Combina algunas de las ventajas del trabajo en caliente y en frío, especialmente en el trabajo en el acero (usualmente entre 650 y 700°C). Las temperaturas son suficientemente bajas para evitar la cascarilla, asegurando de esta manera un buen acabado superficial; pero lo suficientemente elevadas como para reducir el esfuerzo de fluencia y así permitir la formación de piezas que generarían presiones excesivas en la matriz durante el trabajo en frío. Las temperaturas elevadas causan una sustancial sensibilidad a la tasa de deformación, y si se mantiene baja, el esfuerzo de fluencia [ecuación (8-11)] también lo hará.

9-1-2 Propósito de la deformación

Se puede hacer otra distinción adicional útil según el propósito de la deformación.

Procesos primarios Tienen como objetivo destruir la estructura fundida por medio de pasos de deformación sucesivos. El producto semifabricado resultante está destinado al conformado o formado posterior (como se muestra en la Fig. 5-2). Los procesos primarios suelen hacerse en caliente y a gran escala, en plantas especialmente construidas para ello.

Procesos secundarios Toman los productos de algunos procesos primarios y los transforman aún más en una pieza terminada; son el objetivo de nuestro análisis. Los procesos secundarios incluyen variantes de los procesos de deformación volumétrica (Fig. 9-1); todos los procesos del trabajo de lámina de metal se analizarán en el capítulo 10.

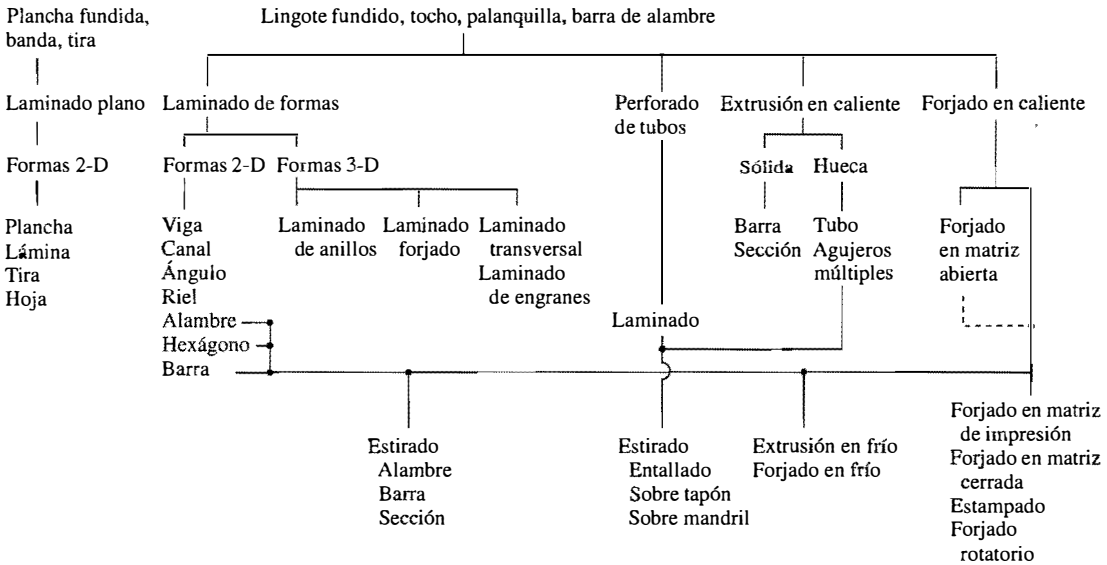


Figura 9-1 Los procesos de deformación volumétrica convierten un material fundido en productos semiterminados o terminados, a menudo a través de una secuencia de operaciones. (*Adaptada de J. A. Schey, ASM Handbook, vol. 20, Materials Selection and Design, ASM International, 1997, p. 691. Con permiso.*)

9-1-3 Análisis

Para entender y estudiar los procesos de deformación volumétrica es útil hacer una distinción.

Procesos en estado estable En ellos, todos los elementos de la pieza de trabajo se someten sucesivamente al mismo modo de deformación. De esta manera, una vez que se analiza la situación para la zona de deformación, el estudio permanece válido durante todo el proceso. El estirado de lámina en deformación plana se puede considerar como el caso genérico (Fig. 9-2*a*). La pieza de trabajo se endurece por deformación o sufre otros cambios a medida que pasa a través de la zona de deformación y, para simplificar cálculos, se emplea un *esfuerzo de fluencia medio* σ_{fm}. Éste se determina para el trabajo en frío, integrando la ecuación (8-4) entre los límites de las deformaciones:

$$\sigma_{fm} = \frac{K}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}\left[\frac{\varepsilon_2^{n+1} - \varepsilon_1^{n+1}}{n+1}\right] \qquad \textbf{(9-1a)}$$

Para un material recocido ($\varepsilon_1 = 0$), esto se reduce a

$$\sigma_{fm} = \frac{K}{\varepsilon}\left[\frac{\varepsilon^{n+1}}{n+1}\right] \qquad \textbf{(9-1b)}$$

Alternativamente, la curva del esfuerzo de fluencia se grafica y la media se determina al promediar de manera visual (Fig. 9-2*b*). Para el trabajo en caliente, se calcula una tasa

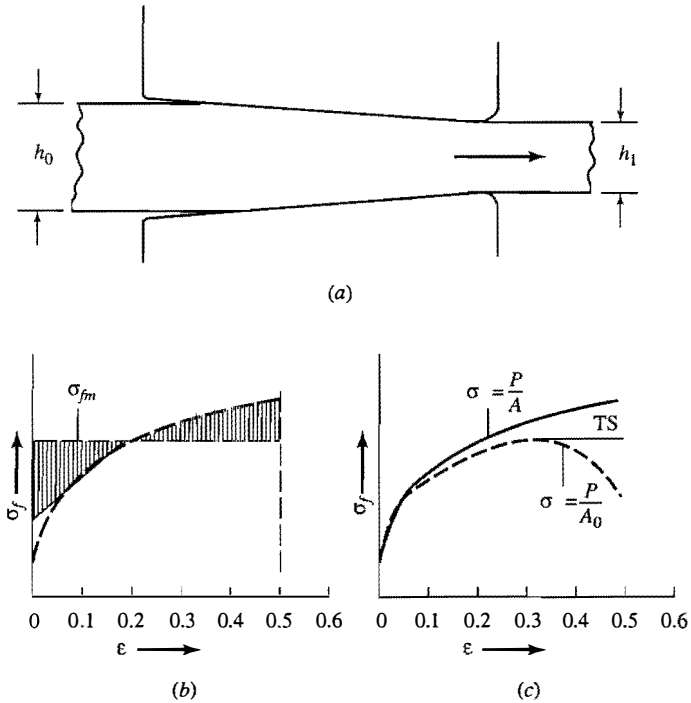


Figura 9-2 En los procesos de trabajo en frío de estada estable, (*a*) el material se somete al endurecimiento por deformación durante su paso a través de la matriz, y (*b*) el esfuerzo de fluencia relevante es el esfuerzo medio de fluencia de la curva esfuerzo real-deformación real; (*c*) si ésta no está disponible, la resistencia a la tensión puede dar una aproximación razonable.

de deformación media específica para el proceso y el esfuerzo de fluencia se toma de la ecuación (8-11).

Procesos en estado no estable En procesos como la compresión, la geometría de la pieza cambia continuamente (Fig. 9-3*a*) y el análisis se debe repetir para varios puntos en el tiempo, desde la condición inicial hasta el final de la carrera. Así, se debe tomar el *esfuerzo de fluencia instantáneo* σ_f en el punto de interés (Fig. 9-3*b*) de la ecuación (8-4) para el trabajo en frío, y de la ecuación (8-11) para el trabajo en caliente. A menudo sucede que se pone interés sólo en la fuerza máxima, desarrollada al final de la deformación, y luego se usa el esfuerzo de fluencia correspondiente a la deformación final.

Surge un problema cuando los valores de K y n se desconocen. Si se tiene equipo disponible, se puede realizar rápidamente un ensayo de tensión (Secc. 4-3). De otra forma, la única guía podría ser la TS, de las tablas 8-2 y 8-3 u otra fuente. De manera paradójica, el método básicamente absurdo para calcular la TS (Secc. 4-1-3) proporciona una aproximación razonable del esfuerzo de fluencia medio real σ_{fm}, al menos para deformaciones del orden de la de estricción (Fig. 9-2*c*). Como en el punto de estricción

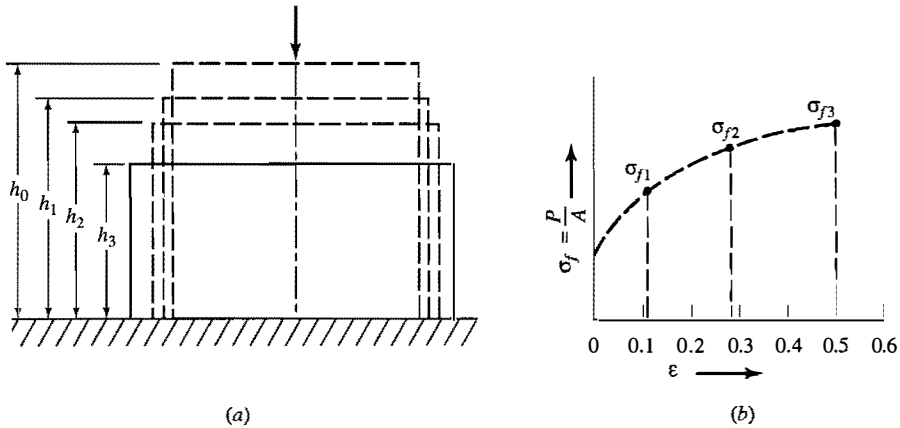


Figura 9-3 En los procesos en estado no estable, (a) el material se deforma en una sucesión de deformaciones que se incrementan y (*b*) el esfuerzo de fluencia se toma en la deformación de interés.

$n = \varepsilon_u$, se puede hacer una corrección razonable para deformaciones menores o mayores.

Ejemplo 9-1

En el ejemplo 4-4 se determinó que TS = 351 MPa para una aleación recocida de Cu-20Ni. En el ejemplo 8-1 se estableció que $K = 760$ MPa y $n = 0.45$. Si no se hubieran realizado los cálculos del ejemplo 8-1 (o si la Ts de un material sólo estuviera disponible en la literatura), ¿la TS proporcionaría alguna guía del esfuerzo de fluencia?

Aplicando la ecuación (8-4), $\sigma_f = 351 = 760\varepsilon^{0.45}$ y $\varepsilon = \exp(\frac{-0.7725}{0.45}) = 0.18$. Como $\varepsilon = \ln(l/l_0) = 0.18$, $l/l_0 = \exp 0.18 = 1.197$, y la deformación por tensión correspondiente es $e_t = (l - l_0) = (1.197 - 1.0)/1.0 = 19.7\%$. Para convertir a la deformación por compresión, considere $l = h_0$ y $l_0 = h$; entonces $e_c = (h_0 - h)/h_0 = (1.197 - 1.0)/1.197 = 16.5\%$. Así, la TS es una estimación razonable de σ_f para una deformación por compresión pequeña, pero sería demasiado baja si este material altamente endurecible por deformación se trabajara hasta una deformación mayor.

9-2 FORJADO EN MATRIZ ABIERTA

Los procesos de forjado están entre las técnicas de manufactura más importantes. Como se muestra en la figura 9-1, se pueden distinguir tres amplios grupos: el *forjado en matriz abierta* permite la deformación libre de al menos algunas superficies de la pieza de trabajo; la deformación se restringe mucho más en el *forjado por matriz de impresión* y completamente en el *forjado en matriz cerrada.* Como al menos una de las superficies de la pieza de trabajo se deforma libremente, los procesos de forjado en matriz abierta producen piezas de trabajo de menor exactitud que las del forjado por matriz de impresión o en matriz cerrada; sin embargo, las herramientas y el equipo usualmente son sencillos, relativamente baratos y permiten la producción de una gran variedad de formas.

9-2-1 Recalcado axial de un cilindro

En el *recalcado axial* de un cilindro, una pieza de trabajo cilíndrica se coloca entre dos matrices planas y paralelas (*platinas*), y su altura se reduce por medio de la fuerza de una prensa o de un martinete aplicada a las platinas. El recalcado es un proceso muy versátil que se practica en caliente o en frío. Los productos finales varían desde enormes rotores de acero de 150 Mg o mayores para las estaciones de generación de potencia, hasta componentes diminutos. Frecuentemente, se recalca una cabeza al final de una pieza, en máquinas mecanizadas (automatizadas) con propósito especial, produciendo vastos números de clavos, tornillos, pernos, pasadores y componentes similares.

Recalcado sin fricción Suponga que, por medio de la aplicación de algún lubricante muy bueno, la fricción se reduce de manera exitosa hasta virtualmente cero. Si se divide el cilindro en muchos elementos pequeños, ahora cada uno se deforma igualmente; en otras palabras, la deformación es *homogénea*. El cilindro se hace más corto y, para preservar la invariabilidad del volumen [ecuación (4-2)], adquiere un diámetro mayor, pero aún permanece como un cilindro real (Fig. 9-4*a*). Como el recalcado es un proceso en estado no estable, un análisis completo requiere el cálculo de variables en

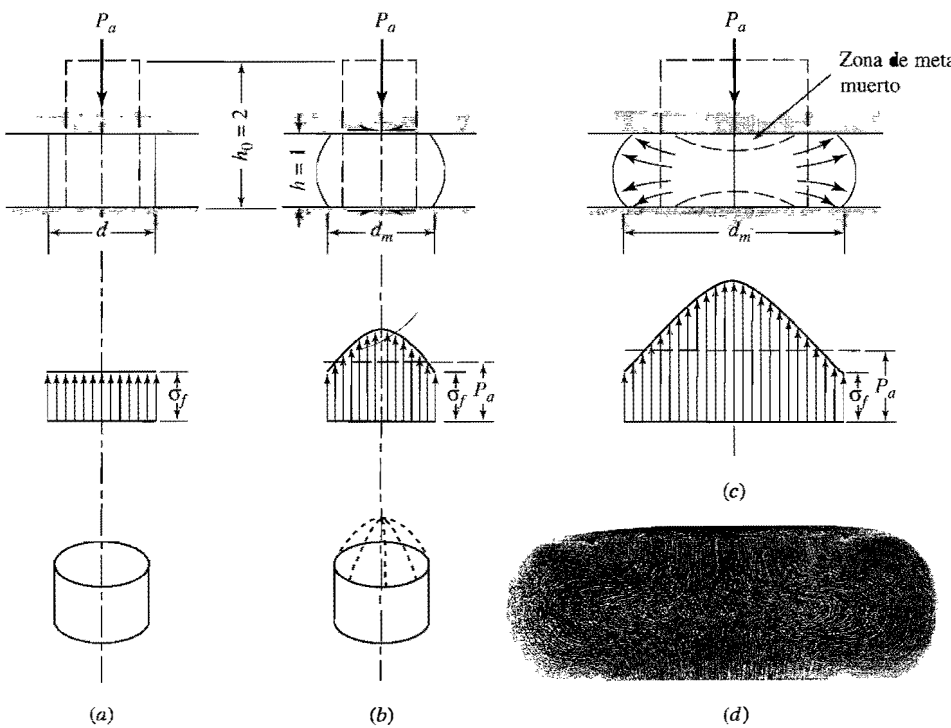


Figura 9-4 Las presiones en la interfaz son (*a*) iguales al esfuerzo de fluencia en la compresión sin fricción pero (*b*) la fricción genera una colina que (*c*) es mayor para uno razón d/h elevada. (*d*) Lo adhesión en la cara extrema, causada por fricción alta o por enfriamiento, conduce al pliegue de los lodos.

varios puntos durante la carrera de la prensa. En los cálculos repetitivos, lo mejor es seguir una secuencia fija de operaciones, como aquí se muestra, paso a paso. Estas actividades, adaptadas a procesos específicos, se tendrán presentes en la totalidad de este capítulo.

Paso 1: Encuentre el volumen de la parte. En este caso,

$$V = \left(d_0^2 \pi / 4\right) h_0 \tag{9-2a}$$

Paso 2: En la práctica, sólo se define una de las dimensiones finales. De la invariabilidad del volumen, se pueden determinar el área final de la cara extrema A_1 y el diámetro d_1

$$A_1 = A_0 \frac{h_0}{h_1} = \frac{V}{h_1} \tag{9-2b}$$

y

$$d_1 = \sqrt{\frac{4A_1}{\pi}} \tag{9-2c}$$

Paso 3: La deformación por compresión de ingeniería únicamente se necesita para propósitos de conversación. Usualmente se calcula por medio del cambio de altura [ecuación (4-16)] pero, dado que el volumen permanece constante, también se pueden usar las áreas de las caras extremas:

$$e_c = \frac{A_1 - A_0}{A_1} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \tag{9-3}$$

Paso 4: Para calcular el esfuerzo de fluencia en el trabajo en frío, la deformación real es

$$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h_1} \tag{8-5b}$$

Paso 5: Para el trabajo en caliente, también es necesaria la tasa de deformación

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{h} \tag{8-10}$$

Paso 6: Ahora estamos listos para calcular el esfuerzo de fluencia relevante. En el trabajo en frío

$$\sigma_f = K\varepsilon^n \tag{8-4}$$

En el trabajo en caliente

$$\sigma_f = C\dot{\varepsilon}^m \tag{8-11}$$

(Note que la tasa de deformación siempre se debe expresar en unidades de segundos recíprocos, s^{-1}.)

Paso 7: Para calcular la presión de la matriz (también llamada *presión en la interfaz*, p_a, donde el subíndice se refiere a la simetría axial) se deben verificar los efectos de

(*a*) el estado de esfuerzos, (*b*) la fricción y (*c*) la no homogeneidad de la deformación (Secc. 8-2).

a. El estado de esfuerzos es uniaxial, de ahí que el esfuerzo de fluencia es σ_f.

b. Como no hay fricción, no se eleva en la presión.

c. La platina rebasa la pieza de trabajo, por lo que no es posible el efecto de indentación y no hay preocupación por la razón *h*/*L*.

De esta manera, p_a es simplemente el esfuerzo de fluencia uniaxial σ_f. Ésta es la presión que tendrán que soportar las herramientas (Fig. 9-4*b*).

Paso 8: La fuerza de presión P_a es la presión en la interfaz multiplicada por el *área de contacto* [ecuación (9-2*b*)], el *área sobre la cual actúa la presión.* Si se considera el punto final, donde las fuerzas son mayores, se encuentra el tamaño necesario de la prensa:

$$P_a = p_a A_1 \tag{9-4}$$

Paso 9: Para algunos equipos de forjado también es necesario conocer la energía total que se gasta al deformar la pieza de trabajo. Se puede obtener repitiendo los cálculos para la fuerza de la prensa P_a en varios puntos (disminuyendo progresivamente h) en la carrera. De esta manera se define la curva fuerza-desplazamiento (Fig. 9-5). La fuerza se incrementa porque el área A_1 aumenta rápidamente. El área bajo la curva tiene dimensiones del trabajo (trabajo = fuerza × distancia). Así, el trabajo o energía E_a que deben ser suministrados por la prensa o por el martinete se puede obtener por medio de la integración gráfica o numérica de esta área.

Paso 10: La energía absorbida por la pieza de trabajo se convierte en calor. En la ausencia de enfriamiento, el incremento adiabático de temperatura ΔT es

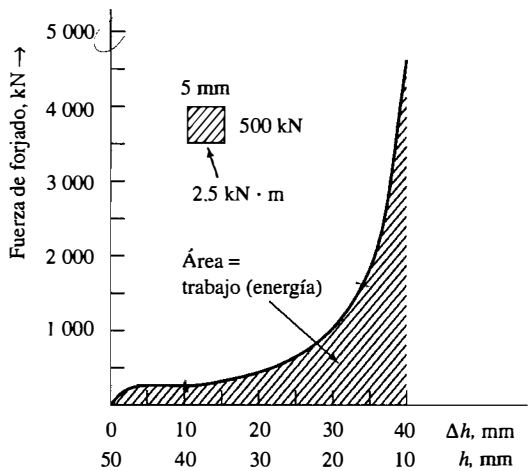


Figura 9-5 Las fuerzas de recalcado se elevan mucho con la progresión de la deformación; el área bajo la curva representa el trabajo.

$$\Delta T = \frac{E_a}{V\rho\, c} \tag{9-5}$$

donde V es el volumen, ρ la densidad y c el calor específico (de manera más correcta, el contenido de calor por unidad de volumen) de la pieza de trabajo. En la práctica, la deformación ocurre en un tiempo finito, y se pierde un poco de calor a través de la conducción hacia las matrices y por radiación y convección hacia la atmósfera circundante. Por lo tanto, el aumento real de la temperatura es menor pero puede ser significativo. En el trabajo en caliente es posible que se incremente la temperatura por arriba de la solidus y que cause fragilidad en caliente; en el trabajo en frío puede darse la descomposición del lubricante.

Recalcado con fricción deslizante En la práctica es muy improbable obtener una fricción cero, aun con el mejor lubricante (tabla 8-4). La deformación del cilindro requiere que sus caras extremas se deslicen sobre las superficies de la herramienta, por lo que siempre está presente un esfuerzo cortante mensurable por fricción τ_i, el cual se opone a la expansión libre de las caras extremas, con dos consecuencias (Fig. 9-4*b*):

1. El cilindro adopta una forma de *barril*. Esto se puede ignorar calculando el nuevo diámetro (paso 2) simplemente al tomar un diámetro medio d_m por la invariabilidad del volumen [ecuación (9-2*c*)].

2. Con objeto de vencer el esfuerzo de fricción, se debe ejercer una presión normal cada vez más elevada a medida que nos movemos hacia el centro del cilindro. En el borde libre, la presión es igual a σ_f y de aquí crece como una colina. Con fricción mayor (de la Secc. 8-2-3, expresada como un coeficiente de fricción μ, o factor de cortante por fricción m^*), la *colina de fricción* será más aguda. Esto se toma en cuenta en el paso 7*b*, al calcular la presión promedio en la interfaz p_a. Una comparación entre las figuras 9-4*b* y 9-4*c* demuestra que, para la misma magnitud de la fricción, un cilindro de la misma altura pero de diámetro mayor da origen a una colina de fricción más alta y, por lo tanto, a una presión p_a mayor. De esta manera, la razón d/h o *factor de forma*, el cual caracteriza la cuadratura del cilindro, determina junto con la fricción el grado de intensificación de la presión. Entonces la presión promedio en la interfaz p_a se expresa convenientemente como un múltiplo del esfuerzo uniaxial de fluencia σ_f. El *factor de multiplicación de la presión* Q_a (donde el subíndice significa simetría axial) debe tomar en cuenta los efectos tanto de la fricción (μ o m^*) como de la geometría de la pieza de trabajo (razón d/h). De la teoría, si se usa m^*,

$$p_a = \sigma_f Q_a = \sigma_f \left(1 + \frac{m^*}{3\sqrt{3}} \frac{d_1}{h_1}\right) \tag{9-6}$$

Alternativamente, si se emplea μ, Q_a se puede tomar de la figura 9-6 y

$$p_a = \sigma_f Q_a \tag{9-7}$$

El esfuerzo máximo $P_{a\ \text{máx}}$ es importante para el material de la matriz. Se calcula más fácilmente con m^*

$$p_{a\ \text{máx}} = \sigma_f \left(1 + \frac{m^*}{\sqrt{3}} \frac{d_1}{h_1}\right) \tag{9-8}$$

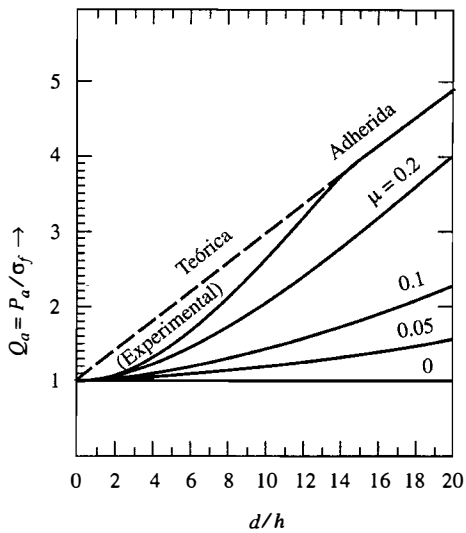


Figura 9-6 Las presiones promedio en el recalcado de un cilindro se incrementan con el aumento de la fricción y de la cuadratura del cilindro. [*Según J.A. Schey, T.R. Venner y S.L. Takomana, J. Mech. Work. Tech.* **6**: *23-33 (1982). Con permiso de Elsevier Science Publishers.*]

Recalcado con fricción adherida En el caso extremo, cuando la superficie de la platina es rugosa y no se usa lubricante, el esfuerzo cortante en la interfaz τ_i puede alcanzar o exceder el esfuerzo de fluencia por cortante τ_f del material de la pieza de trabajo (Secc. 8-2-3), y el movimiento de la cara extrema se impide totalmente. Ahora toda la deformación ocurre por el cortante interno en el cilindro; el material adyacente a las platinas no se mueve (*se forman zonas de metal muerto*) y los lados del cilindro se pliegan (Fig. 9-4*d*). En el forjado no isotérmico, el enfriamiento de las caras extremas agrava la situación, como muestran las líneas de fluencia en la probeta de la figura 9-4*d*.

Éste es un caso poco común de la deformación no homogénea en que la presión en la interfaz disminuye. Como las fibras exteriores del cilindro se deforman por cortante superpuesto sobre compresión, el esfuerzo de compresión necesario se reduce (véase la Fig. 8-14*b*) y la presión en la interfaz permanece baja. El factor de multiplicación de la presión permanece cerca de la unidad siempre y cuando $d/h < 2$. La teoría simple no puede enfrentarse a esta complejidad, y los valores limítrofes del factor de multiplicación de la presión dados en la figura 9-6 se determinaron experimentalmente. El análisis por elementos finitos proporciona resultados similares.

Ejemplo 9-2

Una palanquilla de acero AISI 1045 de $d_0 = 50$ mm y $h_0 = 50$ mm se recalca en frío hasta una altura de $h_1 = 10$ mm, en una prensa hidráulica que opera a $v = 80$ mm/s. El lubricante es aceite mineral con aditivos EP. Calcule la fuerza de la prensa y el gasto de energía.

El esfuerzo de fluencia se da en la tabla 8-2, la fricción en la tabla 8-4. Para obtener la fuerza de la prensa sería suficiente realizar cálculos sólo para la altura final; sin embargo, la fuerza se requiere en varios puntos de la carrera de la prensa si también se va a determinar la energía. Es mejor preparar una hoja de cálculo. El resultado es:

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Acero 1045 en frío						d0 =	50	mm	h0 =	50	mm	V =	98 175	mm^3	
Esfuerzo de fluencia			K =	950	MPa	n =	0.12								
Punto	mu	v	h	d1	A1	ec	épsilon	épsilon punto	sigma f	d/h	Qa	pa	pa	Pa	Pa
Núm.		mm/s	mm	mm	mm^2			1/s	N/mm^2			N/mm^2	kpsi	kN	tonf
				Ec. (9-2c)	Ec. (9-2b)	Ec. (9-3)	Ec. (8-5b)	Ec. (8-10)	Ec. (8-4)		Fig. 9-6	Ec. (9-7)		Ec. (9-4)	
0	0.1	80	50	50.0	1 963	0	0	1.60	0	1	1.00	0	0	0	0
1	0.1	80	40	55.9	2 454	0.20	0.223	2.00	794	1.4	1.10	873	127	2 142	241
2	0.1	80	30	64.5	3 272	0.40	0.511	2.67	876	2.2	1.25	1 096	159	3 585	403
3	0.1	80	20	79.1	4 909	0.60	0.916	4.00	940	4.0	1.30	1 222	177	5 999	674
4	0.1	80	15	91.3	6 545	0.70	1.204	5.33	971	6.1	1.40	1 360	197	8 901	1 001
5	0.1	80	10	111.8	9 817	0.80	1.609	8.00	1 006	11.2	1.80	1 810	263	17 774	1 998

Note el rápido incremento en la fuerza a medida que disminuye la altura.

Ejemplo 9-3

Ahora la palanquilla del ejemplo 9-2 se recalca en caliente a 1 000°C sin lubricante. Vuelva a calcular la fuerza de la prensa.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Acero 1045 en caliente		T=	1 000		d0=	50	mm	h0=	50	mm	V=	98 175	mm^3
Esfuerzo de fluencia			C=	120	MPa	m=	0.13						
Punto	mu	v	h	d1	A1	ec	épsilon	épsilon punto	sigma f	d/h	Qa	pa	Pa
Núm.		mm/s	mm	mm	mm^2			1/s	N/mm^2			N/mm^2	kN
				Ec. (9-2c)	Ec. (9-2b)	Ec. (9-3)	Ec. (8-5b)	Ec. (8-10)	Ec. (8-11)		Fig. 9-6	Ec. (9-7)	Ec. (9-4)
0	adherida	80	50	50	1 963	0	0	1.60	127.6	1	1.00	128	250
1	adherida	80	40	55.90	2 454	0.2	0.223	2.00	131.3	1.40	1.10	144	355
2	adherida	80	30	64.55	3 272	0.4	0.511	2.67	136.3	2.15	1.15	157	513
3	adherida	80	20	79.06	4 909	0.6	0.916	4.00	143.7	3.95	1.40	201	988
4	adherida	80	15	91.29	6 545	0.7	1.204	5.33	149.2	6.09	1.80	269	1 757
5	adherida	80	10	111.80	9 817	0.8	1.609	8.00	157.2	11.18	3.00	472	4 631

Los resultados se grafican en la figura 9-5. Note la gran caída de la presión y de la fuerza en relación con el ejemplo 9-2. Para obtener el requerimiento de energía, se integra el área bajo la curva fuerza-desplazamiento. Un cuadrado corresponde a (500 kN)(5 mm) = 2 500 N · m; el área total es casi de 14.5 cuadrados o 36 250 N · m (= 26 700 lb · ft o 320 000 lb · in).

Note que con respecto al forjado en frío, la fuerza de la prensa disminuyó 74%. Normalmente se utilizaría un lubricante (con $\mu = 0.1$ de la tabla 8-4). Repitiendo los cálculos, ahora la fuerza de la prensa sería de 2 470 kN; es decir, un séptimo de la fuerza para el recalcado en frío.

9-2-2 Forjado de piezas rectangulares de trabajo

Se distinguirán dos casos fundamentalmente distintos: el forjado con *platinas sobresalientes* y el forjado con la *pieza de trabajo sobresaliente.*

Recalcado con platinas sobresalientes Cuando se recalca una plancha rectangular entre dos platinas que son más grandes que la pieza de trabajo en todas direcciones (Fig. 9-7*a*), la situación es similar a la del recalcado axial de un cilindro, al menos en lo que se refiere a la deformación en la sección transversal *más angosta.* Sin embargo, en general, las condiciones son diferentes, sobre todo si una de las dimensiones de la plancha es mucho mayor. *El material siempre fluirá en dirección de la resistencia menor.* La resistencia a la fricción es proporcional a la distancia sobre la cual tiene lugar el deslizamiento. Por lo tanto, el flujo en la dirección más larga (el cual llamaremos, para propósitos de análisis, la dirección del *ancho w*), se restringe mucho y se aproxima la condición de deformación plana (Fig. 8-15*a*). La *mayoría del flujo del material ocurre en la dirección corta,* y para propósitos de estudio lo llamaremos *longitud de contacto L* entre la pieza de trabajo y la superficie de la herramienta; evidentemente, al recalcar con yunques sobresalientes *el área de la sección transversal permanece constante, mientras que L se incrementa a medida que progresa la compresión* (Fig. 9-7*a*).

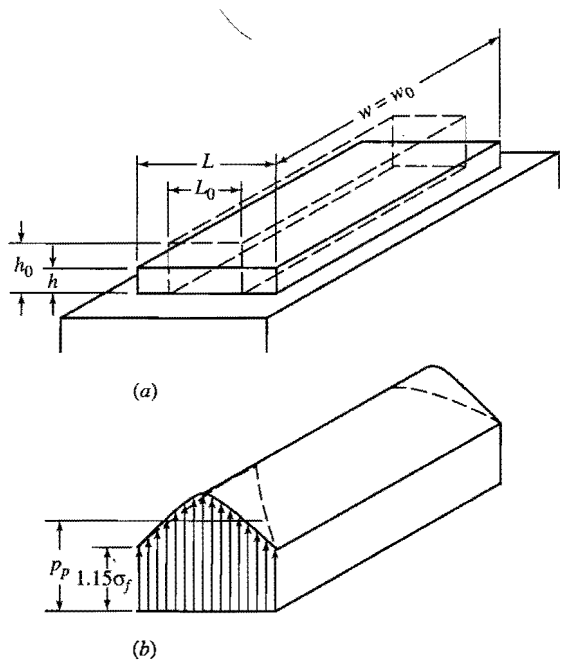


Figura 9-7 Al recalcar una pieza rectangular de trabajo, (*a*) el material fluye en dirección de la menor resistencia, marcada como *L*; (*b*) ahora la colina de fricción tiene forma de cresta.

Como ambas platinas son paralelas, el material fluye lejos de la línea central, donde no hay flujo de material. Por lo tanto, la línea central se llama *línea neutra* (la que divide las direcciones del flujo).

En el proceso del cálculo, los pasos 1 al 6 son los mismos que en el recalcado de un cilindro. Sin embargo, existen diferencias en el paso 7:

a. Primero, el material comienza a fluir sólo al alcanzar el esfuerzo de fluencia de deformación plana $1.15\sigma_f$ (puntos 4 en la Fig. 8-14*b*).

b. Segundo, la colina de fricción parecía una tienda de campaña de un poste en el recalcado axial (Fig. 9-4*b*), pero ahora es más bien como un risco de montaña (Fig. 9-7*b*). La sección transversal de la colina de fricción todavía se puede calcular por analogía con el recalcado axial, siempre y cuando se entienda claramente que la colina se define por la dimensión de la pieza de trabajo, que se mide *en dirección del flujo principal del material*, es decir, la longitud de contacto L. Entonces, la colina de fricción será mayor para cualquier μ o m^* dados y para un factor mayor de forma (razón L/h). La presión promedio p_p (donde el subíndice se refiere a la deformación plana) es

$$p_p = 1.15\sigma_f\left(1+\frac{m^*}{4}\frac{L}{h}\right) \tag{9-9}$$

Cuando la fricción se expresa como μ, el factor multiplicador de la presión Q_p se toma de la figura 9-8 y la presión promedio es

$$p_p = 1.15\sigma_f Q_p \tag{9-10}$$

Por analogía con el recalcado de un cilindro [ecuación (9-8)], el pico de la colina de fricción será

$$p_{p\ \text{máx}} = 1.15\sigma_f\left(1+\frac{m^*}{2}\frac{L}{h}\right) \tag{9-11}$$

Este pico se desarrolla en la línea neutra.

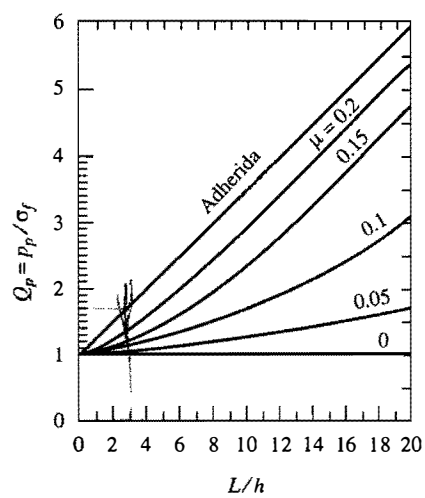


Figura 9-8 Las presiones promedio al recalcar una plancha rectangular se incrementan con la fricción y con la razón L/h. [*Según J.F.W. Bishop, Quart. J. Mech. Appl. Math.* **9**: *236-246 (1956). Se reproduce con autorización de Pergamon Press.*]

En el paso 8, la fuerza P_p en cualquier punto en la carrera de la prensa o del martinete se obtiene de nuevo multiplicando p_p por el *área de contacto* A_1 sobre la que actúa esta presión

$$P_p = p_p A_1 = p_p L w \qquad \textbf{(9-12)}$$

Las piezas de trabajo rectangulares se forjan con frecuencia, y los elementos forjados más complejos a menudo se pueden considerar como rectangulares.

Ejemplo 9-4

Un pasador de acero inoxidable 302 se va a fabricar a partir de un alambre cuadrado. Un extremo está aplanado y el centro está estrechado. Calcule la fuerza y la presión de la matriz, suponiendo que no se usa lubricante.

La operación de aplanado se puede considerar como el recalcado de una pieza rectangular de trabajo. Debido a la fricción, la longitud de 100 mm del pasador se incrementa muy poco durante el aplanado, y esta dimensión se debe tener por el ancho w durante la compresión en

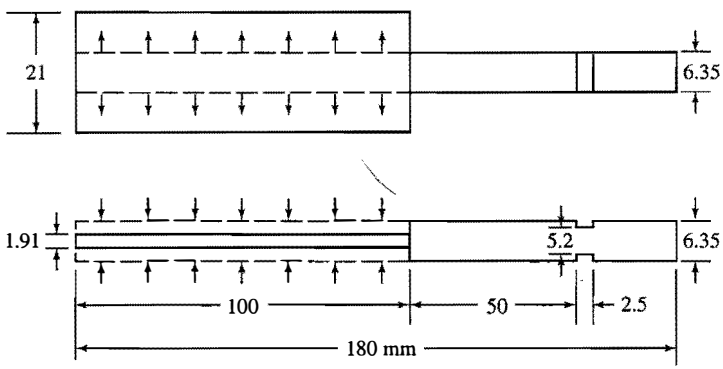


Figura ejemplo 9-4

deformación plana (Fig. 9-7*a*). La mayoría del material se desplaza hacia el ancho del pasador; en términos del análisis, esto se convierte en L (= $h_0 L_0 / L_1$ = (6.35)(6.35)/1.91 = 21.1 mm). De nuevo, una hoja de cálculo acelera la tarea

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Acero inoxidable 302 en frío SS														
Esfuerzo de fluencia				K=	1 300	MPa	n=	0.3						
						Sección transversal							Área de contacto	
Pasada	mu	v	h	L	w	A (crítica)	ec	épsilon	sigma f	L/h	Qp	pp	A (contacto)	Pp
Núm.		mm/s	mm	mm	mm	mm^2			N/mm^2			N/mm^2	mm^2	kN
							Ec. (9-3)	Ec. (8-5b)	Ec. (8-4)		Fig. 9-8	Ec. (9-10)		Ec. (9-12)
0	adheri.	80	6.3	6.	100	40.3				1		0	645	0
1	adheri.	80	1.91	21.1	100	40.3	0.7	1.2039	1 374.4	11.1	3.8	6 006	2 117	12 713

Note la gran fuerza que se requiere para deformar esta parte relativamente pequeña.

Ejemplo 9-5

Para reducir la presión de la matriz y la fuerza de forjado, se aplica un lubricante de aceite mineral compuesto. Establezca su efecto sobre la fuerza total.

La repetición del cálculo con $Q_p = 1.8$ resulta en $p_p = 2\,845$ N/mm^2 y $P_p = 6\,022$ kN. Vea que es necesaria una prensa de gran tamaño para esta operación aparentemente menor, aún con la aplicación de un lubricante. Las presiones y fuerzas en la matriz se podrían reducir por medio del aplanado en dos pasos, con un recocido intermedio.

Forjado de una pieza de trabajo sobresaliente Existe una situación muy diferente cuando la platina es angosta (que suele llamársele *yunque*). Como ahora la parte forjada sobresale del yunque, no se puede esperar que se deforme toda la masa de la pieza de trabajo, por lo que este proceso quizá sea no homogéneo, incluso dentro de la zona de trabajo. Para juzgar el grado de no homogeneidad, debemos regresar a la figura 8-17. Cuando la pieza de trabajo es ancha, la deformación es de nuevo plana (Fig. 8-15*b*). El *mayor flujo ocurre en la dirección de la dimensión corta del yunque*, de ahí que ésta ahora se convierte en L para propósitos de análisis. Existen tres posibilidades distintas:

1. Cuando $h/L > 8.7$ (Fig. 8-17*b*), la situación es la misma que en la indentación de un cuerpo semiinfinito (Fig. 8-17*a*). Se puede demostrar que la presión requerida para la indentación $p_{i\ \text{máx}}$ es aproximadamente 3 veces el esfuerzo fluencia uniaxial σ_f del material

$$p_{i\ \text{máx}} = \sigma_f Q_{i\ \text{máx}} = 3\sigma_f \qquad \textbf{(9-13)}$$

Ejemplo 9-6

Se reconocerá que aunque la situación que se muestra en la figura 8-17 parece físicamente muy diferente a un ensayo de dureza (Fig. 4-12), el estado de deformación en realidad es muy similar. En el ensayo de dureza la probeta es, para todos los intentos y propósitos, infinita en las direcciones del ancho, de la longitud y del espesor; de esta manera, el indentador tiene que empujar el material hacia fuera, como en la figura 8-17*a*. Por lo tanto, la *dureza a la indentación* de un material es aproximadamente 3 veces su resistencia uniaxial a la fluencia (de compresión). Como la deformación muy localizada causa un endurecimiento por deformación muy severo, la dureza a la indentación es 3 veces el esfuerzo de fluencia medio σ_{fm} que prevalece en las zonas de cortante y, por las razones dadas en la sección 9-1-3, la TS es una buena aproximación de este valor. Por ello la dureza a la indentación se establece con frecuencia como 3 × TS (recuerde que la dureza se da en kg/mm^2). Para un material endurecible por deformación, se obtiene una mejor concordancia cuando la dureza se determina como 3 veces el esfuerzo de fluencia para 7% de trabajo en frío.

2. Cuando $8.7 > h/L > 1$, ambas zonas de deformación interactúan gradualmente y requieren cada vez menos fuerza para mantener la deformación plástica (Fig. 8-17*b*). Por lo tanto, el factor de multiplicación de la presión también disminuye, y se puede tomar de la figura 9-9. La presión de indentación es

$$p_i = 1.15\sigma_f Q_i \qquad \textbf{(9-14)}$$

Se debe recordar que la penetración de las dos cuñas establece esfuerzos de tensión secundarios que, en $h/L > 2$, pueden conducir a la fractura interna (*estallido central*) en un material menos dúctil.

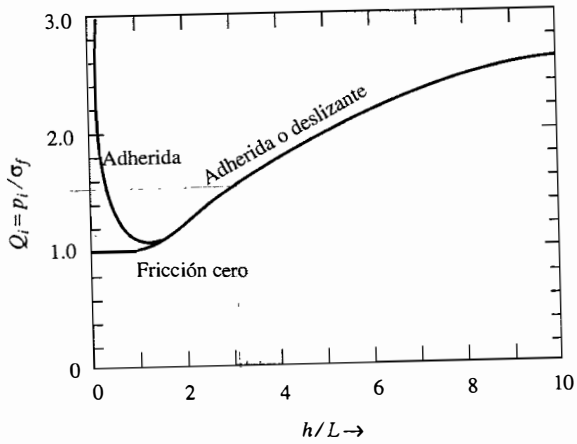


Figura 9-9 Las presiones necesarias para indentar una pieza de trabajo se elevan con h/L, pero son independientes de la fricción. (*Según R. Hill, The Mathematical Theory of Plasticity, Clarendon Press, Oxford, 1950. Con permiso.*)

3. En una razón de $h/L = 1$ ambas zonas de deformación cooperan por completo (Fig. 8-17*c*) y el material fluye a una presión mínima (a $1.15\sigma_f$).

4. Cuando $h/L < 1$ (o de manera más conveniente, $L/h > 1$), la fricción es significativa y el factor de multiplicación de la presión se debe obtener de acuerdo con la ecuación (9-9) o con la (9-10). La colina de la fricción se recorta en sus lados y el factor de multiplicación de la presión baja cuando $w/L < 8$; su valor es de Q_a cuando $w/L = 1$.

Ejemplo 9-7

El pasador del ejemplo 9-4 está estrechado en el centro. Considere la geometría de la operación: el parecido con la figura 8-17*b* es obvio; $L = 2.5$ mm, $w = 6.35$ mm.

Paso 4: $\varepsilon = \ln (6.25/5.2) = 0.2$.

Paso 6: $\sigma_f = 1\ 300(0.2)^{0.3} = 802$ N/mm^2.

Paso 7*c*: $h/L = 5.2/2.5 = 2$, así la deformación es en efecto no homogénea. De la figura 9-9, $Q_i = 1.3$ para el final de la carrera. De esta manera, $p_i = (1.15)(802)(1.3) = 1\ 200$ N/mm^2. Note que, debido a la no homogeneidad de la deformación, hay incertidumbre acerca del valor adecuado de la deformación y del esfuerzo de fluencia. Sin embargo, usualmente el error está dentro de márgenes prácticamente permisibles.

5. La deformación no homogénea se induce en forma intencional en el *granallado con perdigones*. Se hacen muchas indentaciones superpuestas con perdigones de alta velocidad, causando la deformación localizada por compresión de la superficie. Como el volumen de la pieza de trabajo no se afecta, hay dos posibles consecuencias:

a. Si todas las superficies de la parte se granallan, se desarrollan esfuerzos equilibrados residuales de compresión y se incrementa la vida a la fatiga (Secc. 4-7, Fig. 4-18).

b. Si sólo se granalla una superficie, los esfuerzos residuales desequilibrados causan curvatura (Fig. 4-19). El *granallado* bien controlado resulta útil para corregir la forma de recipientes grandes y de carcasas de propulsores de cohetes, así como para desarrollar la forma de las superficies de las de una aeronave.

9-2-3 Forjado en matriz abierta

Además del recalcado y de la indentación, el forjado en matriz abierta emplea otros procesos que se pueden analizar por analogía con los procesos estudiados en las secciones 9-2-1 y 9-2-2. Se puede producir una gran variedad de formas con matrices relativamente sencillas, aunque a menudo por medio de una secuencia compleja de pasos de deformación: *la sencillez de las herramientas se logra a costa del complejo control del proceso.* Las piezas con un grado sustancial de complejidad se pueden forjar mediante una secuencia planeada de pasos de forjado en matriz abierta.

Debastado El área de la superficie A_1 de una pieza de trabajo rectangular puede ser muy grande, resultando en una fuerza total irracionalmente elevada; por lo tanto, se acostumbra deformar sólo una parte de la gran pieza de trabajo a la vez. Las *compresiones* individuales secuenciadas de manera apropiada reducen poco a poco la altura de toda la longitud de la pieza de trabajo por medio del proceso de *forjado de debaste* o *estirado por forja* (Fig. 9-10). Las compresiones sucesivas se deben espaciar lo suficientemente cerca para producir una superficie pareja, pero una compresión demasiado

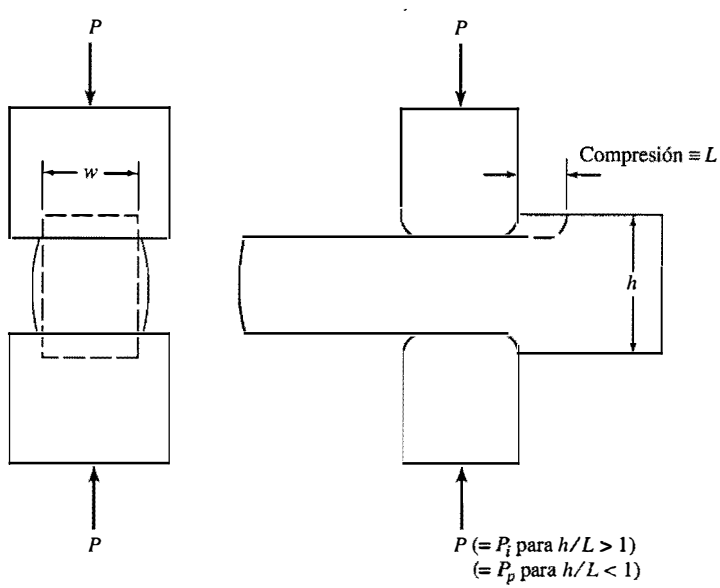


Figura 9-10 Las barras se pueden reducir en altura por medio de una secuencia de carreras en el proceso de desbaste o estirado por forja.

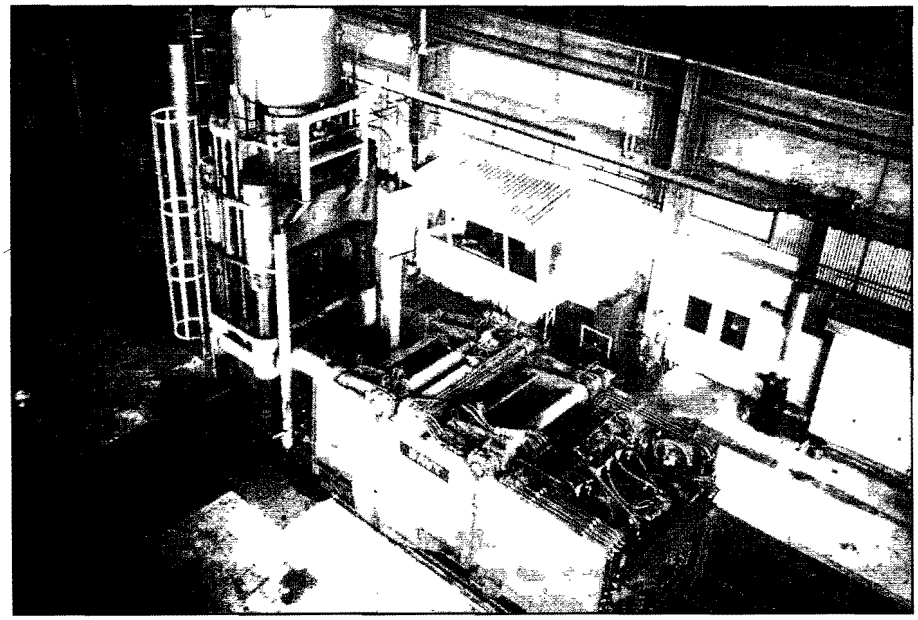


Figura 9-11 Un lingote de acero aleado está sostenido por un manipulador para estirarlo en una prensa hidráulica. (*Cortesía de Atlas Specialty Steels, Welland, Ontario.*)

corta ($b < h_0/3$) sólo doblará hacia abajo el material, en vez de deformar toda la sección transversal.

El estirado por forja se emplea algunas veces como sustituto de la laminación cuando las cantidades son pequeñas o el material es propenso al agrietamiento en caliente. Con frecuencia la pieza se sostiene con brazos mecánicos (*manipuladores*), cuyos movimientos se deben coordinar de manera estrecha con los del yunque (Fig. 9-11); de ahí que el control por computadora sea de amplio uso.

El cálculo de los esfuerzos y de las fuerzas sigue los principios descritos en la sección 9-2-2. La longitud de contacto L de nuevo se mide en dirección del flujo mayor del material, de esta manera es igual a la compresión (Fig. 9-10*b*). Para obtener un factor de multiplicación apropiado para la presión, se debe encontrar la razón h/L. Cuando su valor es mayor que la unidad, prevalece la deformación no homogénea y la presión en la interfase se obtiene de la figura 9-9; cuando su valor es menor que la unidad, predomina la fricción y se deberá emplear la figura 9-8 [o la ecuación (9-9)]. Las condiciones de deformación plana son aproximadas sólo cuando $w/L > 10$. Para piezas más angostas, el factor de multiplicación es menor.

Bataneo y rebordeado Muchas partes tienen secciones gruesas y delgadas, así que es necesario redistribuir el material. El forjado entre yunques planos es ineficiente porque algunos materiales se mueven en dirección del ancho (*se extienden*), y cuando L/h es grande, las presiones y las fuerzas son elevadas. El forjado con *superficies inclinadas* resuelve estos problemas porque existe una componente de presión que actúa en

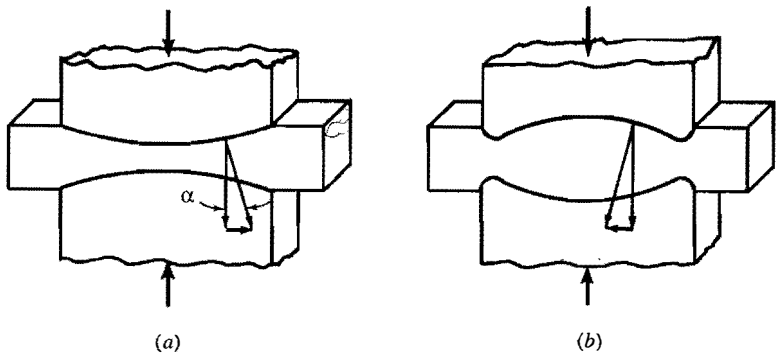


Figura 9-12 El material se puede mover (a) alejándolo o (b) hacia el centro por las superficies inclinadas de la matriz, en los procesos de bataneo y rebordeado, respectivamente.

dirección del flujo del material (Fig. 9-12). Esto tiene dos efectos. Primero, contrarresta la retardación por fricción (cuando tan $\alpha = \mu$, el efecto de la fricción se neutraliza) y de esta manera disminuye la presión de la matriz. Segundo, mueve el material perpendicular a la dirección de la aplicación de la carga. El efecto se puede explotar para alejar el material del centro (*bataneo*, Fig. 9-12*a*) o acercarlo (rebordeado, Fig. 9-12*b*). Las carreras repetidas, con la pieza de trabajo girada respecto a su propio eje entre ellas, permite una sustancial redistribución del material.

Recalcado de anillos Cuando un anillo se comprime entre placas planas con fricción cero, se expande como si fuera un cilindro sólido. La fricción se resiste a la expansión, por lo que el agujero se expande menos y, a mayor fricción, en realidad se hace más pequeño. En consecuencia, el *ensayo de compresión de anillos* se ha convertido en un método favorito para la evaluación del lubricante. Normalmente se usan los anillos con una razón DE:DI:Altura = 6:3:2. Una contracción menor del DI indica un mejor lubricante para operaciones de recalcado. Se pueden obtener valores aproximados de μ y m^* de las curvas de la figura 9-13.

Ejemplo 9-8

Unos anillos de aleación de aluminio de 30.0 mm de DE, 15.0 mm de DI y 10.0 mm de altura (razón 6:3:2) se comprimieron a una velocidad de prensa de 50 mm/s. El lubricante fue ácido esteárico (un sólido a temperatura ambiente; se puede depositar a partir de un solvente orgánico o fusionar arriba de 60°C) o un destilado de petróleo (algunas veces se emplea un adelgazador de pintura como un lubricante muy ligero). Los anillos se redujeron hasta una altura de 5 mm; el diámetro interior fue 15.5 mm con ácido esteárico y 10.5 mm con el destilado de petróleo.

El diámetro de 15.5 mm corresponde a (15 – 15.5)/15 = –3% de *decremento* del diámetro interno. En la figura 9-13*a* se dibuja una línea horizontal con este valor y una vertical en el (10 – 5)/10 = 50% de reducción en la altura; las dos líneas se intersecan en $\mu = 0.05$ para el ácido esteárico. Repitiendo para (15 – 10.5)/15 = 30% *decremento* en el diámetro interno, $\mu = 0.18$ para el destilado de petróleo.

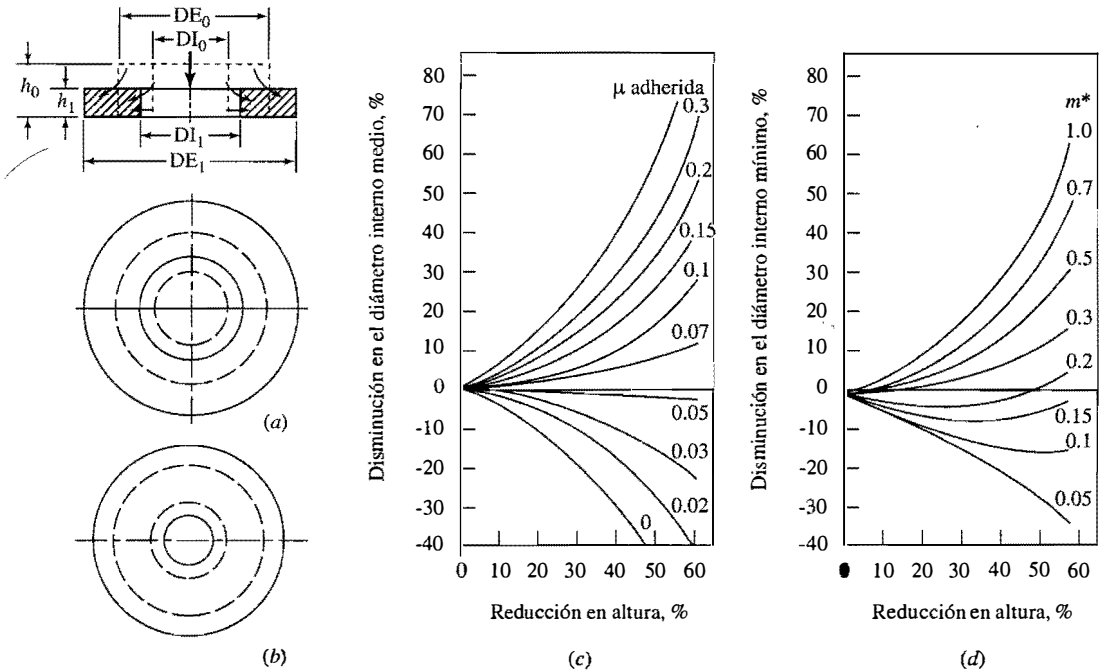


Figura 9-13 En el recalcado de anillos (*a*) con fricción cero el anillo se expande como lo haría un cilindro sólido, pero (*b*) la expansión del diámetro interior se reduce e incluso se invierte cuando la fricción previene la expansión libre. (*c*) El coeficiente de fricción se puede determinar a partir de las curvas experimentales de calibración y (*d*) el factor de cortante en la interfaz se puede deducir de la teoría. [(*c*) *Según A.T. Male y M.G. Cockroft, J. Inst. Metals* **93**: *38-46 (1964-1965); se reproduce con autorización de The Metals Society. (d) Según G.D. Lahoti, V. Nagpal y T. Altan, Trans. ASME, J. Eng. Ind.* **100**: *413-420 (1978). Se reproduce con autorización de la American Society of Mechanical Engineers.*]

Punzonado Las impresiones o agujeros se hacen en una pieza de trabajo mediante el punzonado. Se utilizan muchas variantes del proceso.

1. Para el *punzonado en un recipiente*, la pieza de trabajo se fija en su base y alrededor de sus lados (Fig. 9-14*a*). Por lo tanto, la pieza de trabajo se comporta como un cuerpo semiinfinito y la presión del punzón es al menos $3\sigma_f$ [ecuación (9.13)]. Cuando el punzón penetra hasta profundidades significativas en un material endurecible por deformación, la presión se eleva a $4\sigma_{fm}$ o $5\sigma_{fm}$. El material desplazado por el punzón fluye en dirección opuesta al movimiento de éste. La fricción sobre el punzón y en las superficies del recipiente se debe minimizar; de otra manera, la presión de punzonado se elevará aún más. Miles de millones de cabezas de pernos previamente recalcadas se indentan para fabricar tornillos de cabeza hueca y con recesos formados de manera variada.

2. La presiones se reducen en gran medida cuando la barra no llena el recipiente y un agujero se perfora con *expansión radial* (Fig. 9-14*b*). El pandeo es un problema, a menos que la forma de la pieza proporcione soporte.

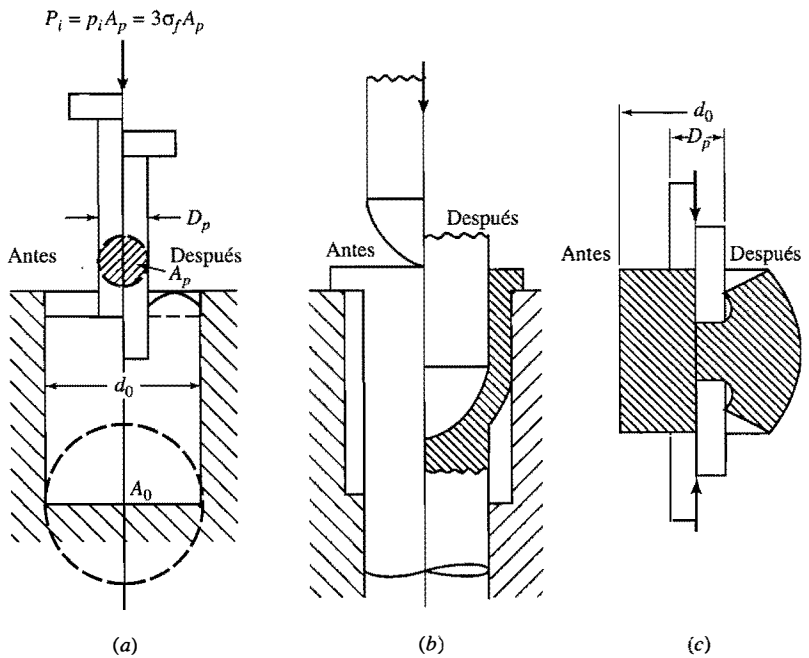


Figura 9-14 Las palanquillas se pueden perforar (a) en un recipiente con flujo inverso o (b) expansión radial, o (c) sin restricciones con dos punzones en oposición.

3. Cuando la pieza de trabajo está *sin restricciones* (Fig. 9-14*c*), el patrón de deformación depende de la razón del diámetro de la pieza de trabajo d_0 respecto al punzón D_p. Cuando $d_0/D_p > 3$, la pieza de trabajo se comporta como un cuerpo semiinfinito y se aplica la ecuación (9-13). En razones d_0/D_p menores (Fig. 9-14*c*) ocurre una deformación compleja y las presiones bajan en forma casi lineal hasta alcanzar el valor del esfuerzo de fluencia uniaxial en $d_0/D_p = 1$

$$p_{\text{perforación}} = \sigma_f \frac{d_0}{D_p} \qquad \textbf{(9-15)}$$

Una pieza de trabajo cilíndrica se puede perforar con dos punzones desde extremos opuestos para preparar un agujero de lado a lado; el material remanente se remueve en una operación separada.

La aplicación más frecuente del punzonado es en la indentación de cabezas de tornillos y pernos. Como esto se hace sobre todo en frío y en un recipiente, las presiones sobre la herramienta de indentación pueden ser excesivas. Otra limitación se impone por el agrietamiento, resultante ya sea de esfuerzos de tensión secundarios desarrollados por la expansión de una cabeza sin restricción, o por el agotamiento de la ductilidad en la operación de encabezamiento previa.

Ejemplo 9-9

Un tornillo de cabeza hueca hexagonal M10 se fabrica con acero 1045 recalcando la cabeza de 16 mm de diámetro de una varilla de 10 mm de diámetro. La cavidad hexagonal de 8 mm de dimensión, plana de lado a lado (a = 4 mm), está indentada. Determine la fuerza de indentación.

La indentación ocurre en el material de la cabeza ya endurecido por deformación.

Deformación de recalcado $\varepsilon = \ln(A_f/A_0) = \ln(16^2/10^2) = 0.94$

Esfuerzo de fluencia $\sigma_f = 950(0.94^{0.12}) = 943$ N/mm^2

Presión de indentación $p_i \simeq 3 \times 943 = 2\,830$ N/mm^2 (!)

Área indentada = $3.464a^2 = (3.464)(4^2) = 55.5$ mm^2

Fuerza de indentación $P_i = 157$ kN

Note la muy elevada presión que actúa sobre el punzón indentador.

9-2-4 Capacidades del proceso y aspectos del diseño

El forjado en matriz abierta es uno de los pocos procesos capaces de producir partes con muy amplio intervalo de tamaño (tabla 9-1). Las limitaciones de la fuerza se pueden superar con deformación incremental, así que la presión de la matriz es crítica sólo en la indentación o en la perforación.

Dimensiones y tolerancias Para compensar por el ovalamiento y el arqueamiento, se aplican generosas holguras de maquinado a las forjas de matriz abierta (por ejemplo, 10 mm en el diámetro de una forja de 200 mm de diámetro y 1500 mm de longitud). La precisión se mejora en gran medida con la forja controlada por computadora, de modo que las holguras y la tolerancia suelen decidirse de acuerdo con el fabricante. Las tolerancias son mucho más estrechas para partes producidas en matrices de recalcado (Fig. 9-15*c* y *d*), y son muy justas en el forjado en frío (Fig. 3-22).

Defectos de forma Las partes deber estar *libres de defectos* atribuibles al flujo imperfecto del material. Se deben observar varios límites en la producción:

1. Un cilindro muy esbelto puede *pandearse* en vez de recalcarse de manera uniforme. Por lo tanto, es aconsejable limitar la razón h_0/d_0 a 2 cuando la fricción es elevada (Fig. 9-15*a*). Cuando la fricción es muy baja, h_0/d_0 debe ser menor que 1.5 para prevenir el sesgado de la palanquilla. Los mismos límites se aplican en el recalcado de palanquillas rectangulares, tomando la dimensión más angosta como d_0.

2. Cuando el recalcado se hace en una operación de *formación de cabezas* (*cabeceado*), sólo el extremo de la pieza de trabajo se recalca. La parte más larga de ella, firmemente sujeta en las mitades de las matrices, se hace fija, así que la resistencia incrementada al pandeo permite longitudes libres un poco mayores (Fig. 9-15*b*).

3. Se puede recalcar una longitud aún mayor cuando la deflexión de la pieza de trabajo está limitada en el *recalcado progresivo* a formas cónicas y cilíndricas (Fig. 9-15*c*).

Tabla 9-1 Características generales de los procesos de deformación volumétrica

	Proceso de deformación							
	Forjado en caliente							
Características	**Matriz abierta**	**Impresión**	**Isotérmico**	**Extrusión en caliente**	**Forjado en frío, extrusión**	**Estirado de formas**	**Laminado de formas**	**Laminado transversal**
Pieza								
Aleaciones forjadas	Todas	Todas	Todas	Todas	Todas	Todas	Todas	Todas
Forma*	R0-3; B; T1; F0; Sp6	R; B; S; T1, 2, 4; (T6, 7); Sp	Como la impresión	Todas 0	Como en caliente	Todas 0	Todas 0	R1,2,7; T1,2; Sp
Masa, kg	0.1-200 000	0.1-100	0.1-100	50-1 000	0.01-50	10-1 000	10-1 000	0.001-10
Sección mínima, mm	5	3	1	(0.2) 1	(0.005) 1	0.1	0.5	1
Detalle superficial	E	C	B	B-C	A-B	A	A-B	A-C
Costo								
Equipo†	A-D	A-B	A	A-B	A-C	B-D	A-C	A-C
Matriz†	E	B-C	A	A-D	A-B	C-D	A-C	A-C
Trabajo†	A	B-D	A-C	B-C	C-E	C-E	C-E	C-E
Acabado†	A	B-C	C-D	C-D	E	E	E	D-E
Producción								
Habilidad del operador†	A	B-C	B-C	C-E	C-E	D-E	B-D	B-C
Tiempo de entrega†	Horas	Semanas	Semanas	Días-semanas	Semanas	Días	Semanas	Semanas
Velocidad (piezas/hora)	1-50	10-300	5-20	10-100	100-10 000	0.2-30 m/s	0.5-10 m/s	100-1 000
Cantidad mínima	1	100-1 000	100-1 000	1-10	100 000	1 000 m	50 000 m	1 000-10 000

* De la figura 3-1.

† Clasificaciones comparativas, A indica el valor más alto de la variable, E el más bajo (por ejemplo, la extrusión en frío produce excelente detalle superficial, implica un costo del equipo de alto a moderado, un precio de la matriz elevado, bajo costo de trabajo, precio de acabado muy bajo, y una habilidad de media a baja del operador. Se puede usar para velocidades de producción altas y requiere una cantidad mínima de 100 000 para justificar el costo de la matriz).

4. En los llamados *cabeceadores en frío* y *recalcadores horizontales*, la parte larga que sobresale del alambre o de la barra se soporta en la cavidad de una matriz, y la cabeza se forma de manera progresiva por un punzón que difunde el material en el espacio disponible en esta matriz (Fig. 9-15*d*). Como la pieza de trabajo se guía en ambos extremos, se suprime el pandeo y se pueden formar grandes cabezas de un solo golpe.

Fractura Un segundo grupo de defectos incluye la fractura de la pieza de trabajo. Si la deformación es en verdad homogénea (Fig. 9-4*a*), la mayoría de los materiales dúctiles pueden presentar una deformación relativamente grande en el recalcado, antes de que su ductilidad se agote y ocurra la fractura por cortante a 45° respecto a la aplicación del esfuerzo de compresión (Fig. 9-16*a*).

En muchos casos, la fricción conduce al abarrilamiento (Fig. 9-4*b* a 9-4*d*). Es fácil ver que el material en la protuberancia no se comprime de manera directa; en vez de

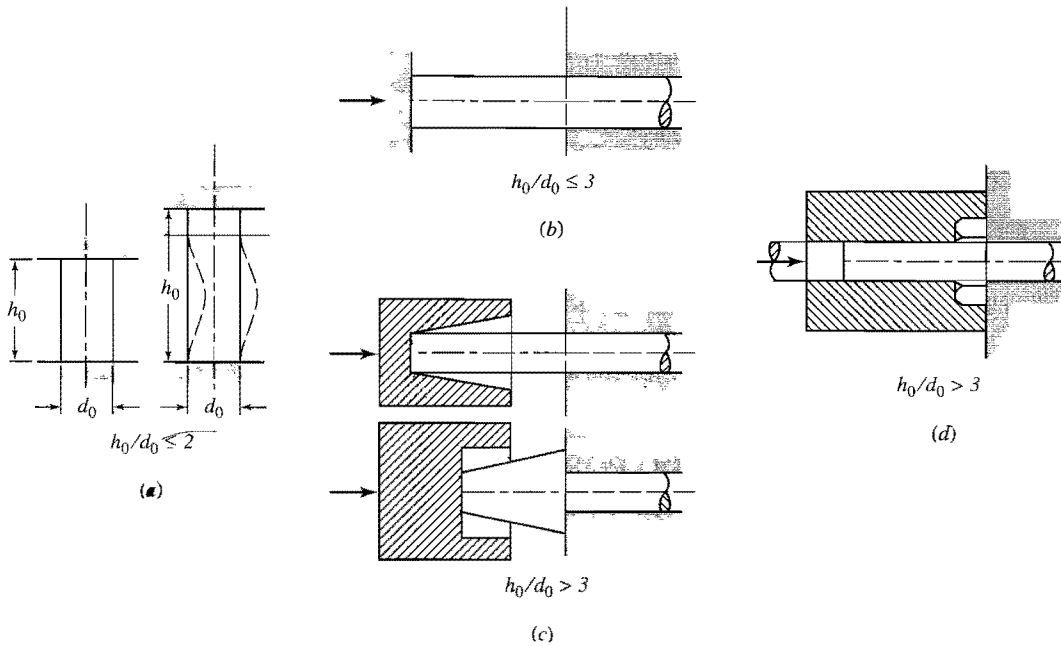
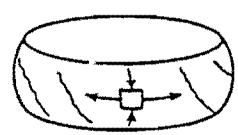


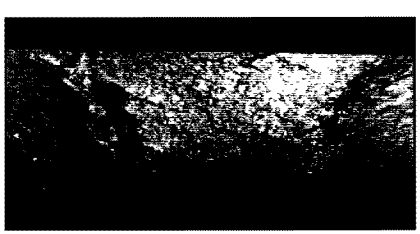
Figura 9-15 La razón inicial entre altura y diámetro está (a) limitada por el pandeo y se puede incrementar (b) recalcando el extremo de una barra sujetada, (c) limitanda la deflexión en cavidades cónicas, o (d) expandiendo la barra en la cavidad de una herramienta de cabeceado en frío.



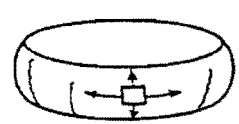
(a)



(c)



(b)



(d)

Figura 9-16 La fractura puede ocurrir al (a) agotar la ductilidad en el trabajo en frío o por (b) fractura intergranular en el trabajo en caliente. (c) y (d) La dirección de las grietas depende de las magnitudes relativas de los esfuerzos secundarios de tensión generados por el abultamiento.

eso, se deforma de modo indirecto, por la acción de empuje radial del material localizado centralmente. Esta acción de expansión crea esfuerzos circunferenciales, así como esfuerzos axiales secundarios de tensión sobre la superficie libre (abarrilada) y puede causar *agrietamiento* (Fig. 9-16*b*). La dirección de las grietas depende de las magnitudes relativas de los esfuerzos secundarios de tensión (Fig. 9-16*c* y *d*). Un abarrilamiento y una fractura similares también ocurren en el recalcado de una plancha. Como el abarrilamiento es el responsable primario, la lubricación mejorada (que reduce la fricción y de esta manera el abarrilamiento) alivia el problema.

Es muy común que se deba aceptar una deformación limitada en un solo golpe. El recalentamiento en el trabajo en caliente y el recocido de proceso en el trabajo en frío restauran la ductilidad y permiten una deformación posterior. El modelado matemático y los sistemas expertos son útiles en el diseño concurrente de la forma de la pieza.

9-3 FORJADO POR MATRIZ DE IMPRESIÓN Y MATRIZ CERRADA

No se pueden crear formas complejas con gran precisión por medio de técnicas de forjado en matriz abierta. Se requieren matrices especialmente preparadas que contienen la forma negativa de la forja que se va a producir: *el proceso se simplifica hasta una secuencia de carreras sencillas de compresión, a costa de una forma compleja de la matriz.*

9-3-1 Forjado por matriz de impresión

En una variante del proceso (Fig. 9-17) la forma se obtiene llenando la cavidad definida por las mitades superior e inferior de la matriz. Se permite que el exceso de material escape en forma de *rebaba*; como la matriz no está por completo cerrada, se llama adecuadamente *matriz de impresión*. No obstante, algunas veces se aplica el término *matriz cerrada*, así que el de *forja por martinete* se ha empleado para denotar el forjado conducido en un martinete; sin embargo, esta distinción no tiene mérito técnico en particular.

Flujo del material La primera preocupación es que el material debe llenar en su totalidad la matriz sin defectos en su flujo, como podrían ocurrir cuando las partes del material de la pieza de trabajo se pellizcan, se doblan o se cortan por completo. Así, la forma del componente debe rediseñarse para promover un flujo uniforme del material (en éste, el proceso es similar al fundido de formas, Cap. 7).

1. Un *plano de separación* se elige al considerar adecuadamente la estructura de la fibra de la forja terminada. Las fibras (Secc. 8-1-7) deben seguir el contorno de la forja tanto como sea posible (Fig. 9-18), ya que esto asegura la máxima tenacidad, resistencia a la fatiga y ductilidad en el producto terminado. En el plano de separación, las fibras se cortan de modo inevitable cuando se recorta la rebaba, por lo tanto, éste debe colocarse donde se originan los esfuerzos mínimos en el servicio de la forja (Fig. 9-19).

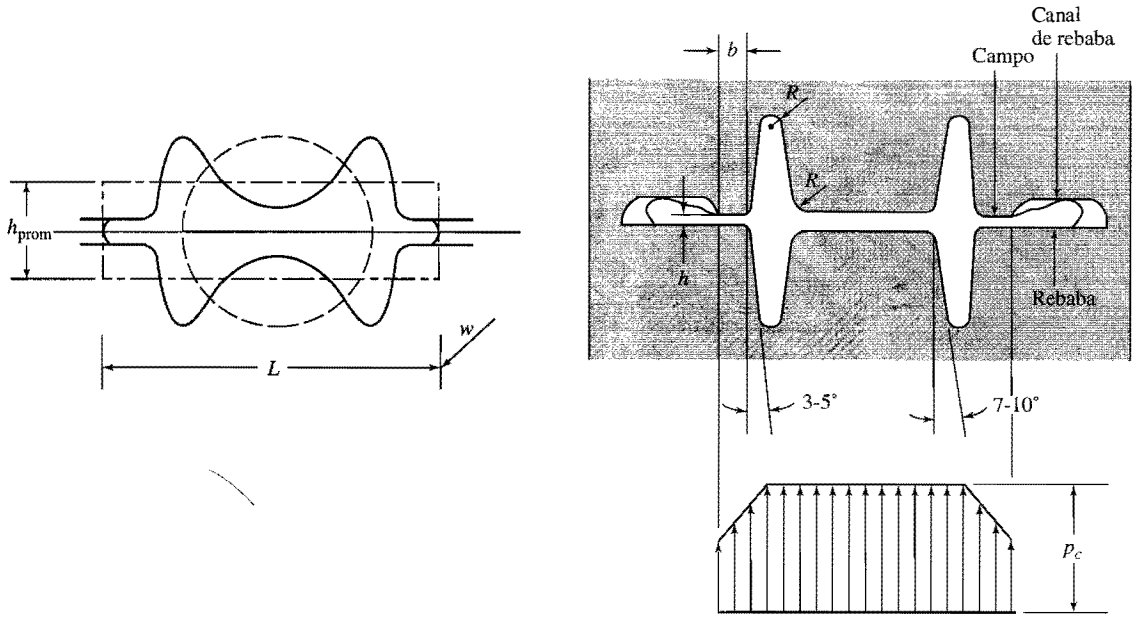


Figura 9-17 Las partes con almas delgadas y nervaduras altas se pueden forjar por (*a*) conformación aproximada seguida de (*b*) un acabado en una matriz acondicionada con un canal de rebaba.

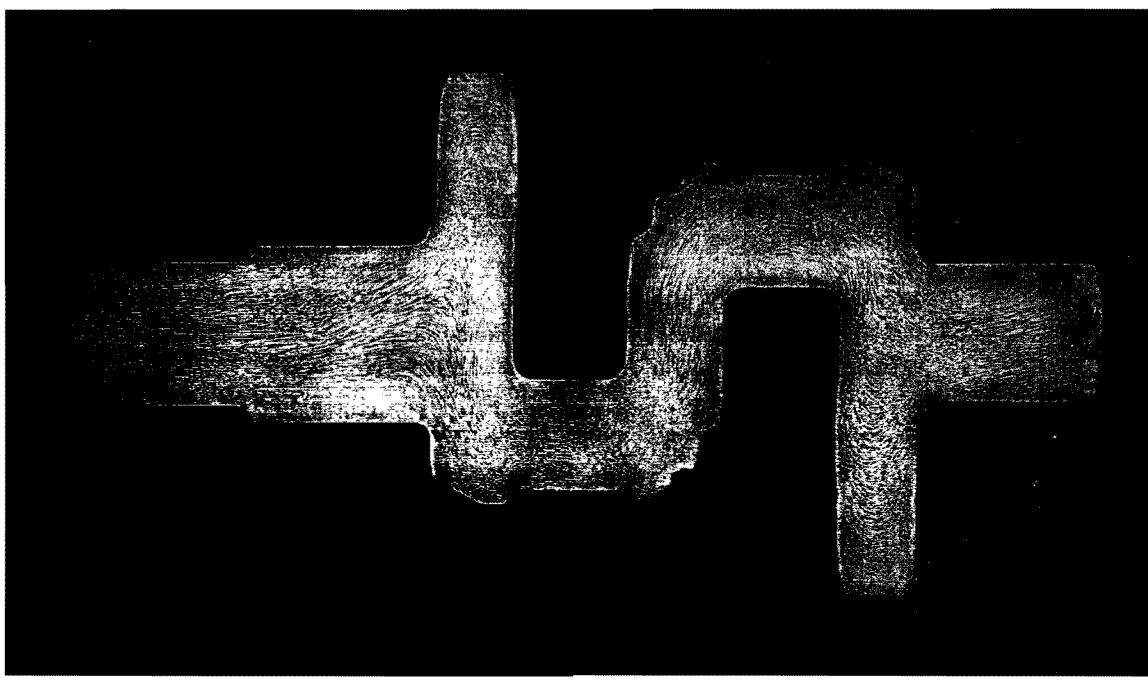


Figura 9-18 El flujo de grano (líneas de flujo) en una pieza de trabajo de acero forjado se puede exponer a través de un macroataque químico. (*Cortesía de la Forging Industry Association, Cleveland, Ohio.*)

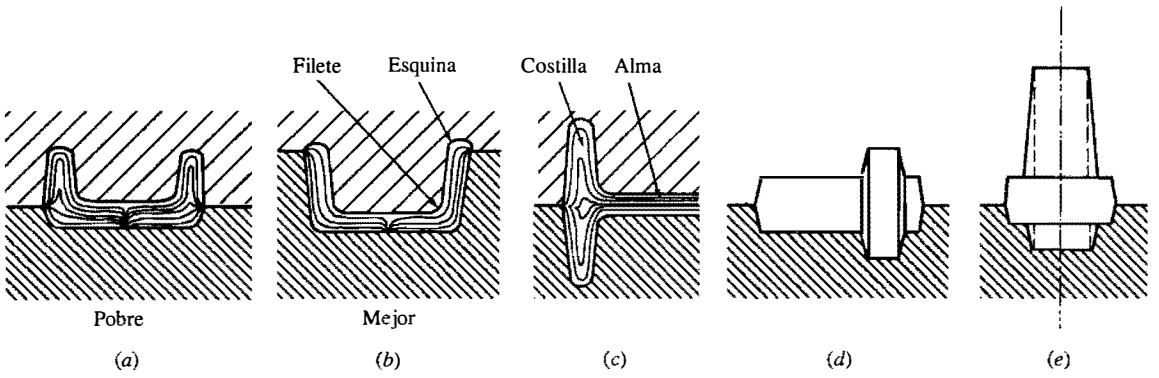


Figura 9-19 Los planos de separación y los ángulos de salida deben proporcionar un buen flujo del material y permitir el retiro de la forja de la matriz.

2. Los filetes que presente la pieza deben tener el radio apropiado para facilitar el flujo uniforme del material y a las *esquinas* se les debe proporcionar un radio (Fig. 9-19*b*) que evite concentraciones de esfuerzos que reducirían la vida de la matriz.

3. Las paredes de la cavidad de la matriz deben tener un ángulo de retiro suficiente para retirar la forja.

4. Las formas complejas, los ángulos de retiro cero y los cortes sesgados son posibles cuando la matriz se construye de varias piezas móviles (*matrices segmentadas*).

Secuencia de forjado Una forma compleja no se puede llenar sin defectos (y desgaste excesivo de la matriz) simplemente forjando la barra de inicio en la cavidad de la matriz terminada. Son precisos varios pasos intermedios:

1. El primer objetivo es distribuir el material en forma correcta, de manera que cambie poco el área de la sección transversal en la matriz de acabado. Para este fin, se deben realizar operaciones de *forjado libre* (en matriz abierta) en superficies formadas especialmente en los bloques de la matriz (Fig. 9-20), en equipo de forjado separado o incluso por otros métodos de separación como la laminación. Estas operaciones suelen relacionarse con el bataneo, el rebordeado y el recalcado.

2. La preforma se puede acercar más a la configuración final forjando en una *matriz de bloques*, lo cual asegura la distribución adecuada del material pero no proporciona la forma final (Fig. 9-17*a*). Se permite que el exceso de material salga entre las superficies planas de la matriz, y luego esta *rebaba* se remueve algunas veces (*recorta*) antes del forjado posterior.

3. La forma final se imparte en la *matriz de acabado.* De nuevo se permite que el material en exceso escape en forma de rebaba, la cual ahora debe ser delgada para ayudar al llenado de la matriz y producir tolerancias cerradas. Como regla general, el espesor de la rebaba es $h = 0.015(A)^{0.5}$ (mm), donde A es el área proyectada de la forja (mm^2). Una rebaba delgada que sale entre superficies paralelas de la matriz conduce a razones elevadas L/h y a grandes presiones de la matriz (Fig. 9-8). Por lo tanto, L se

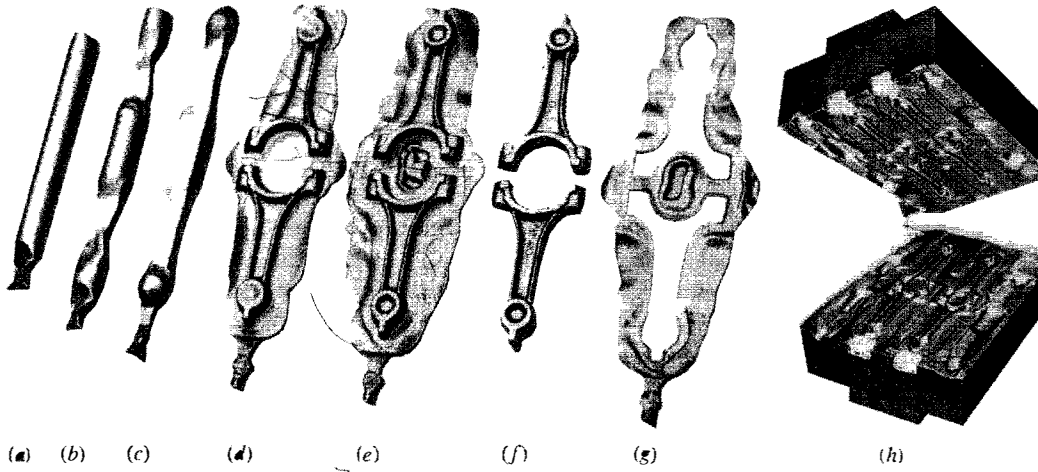


Figura 9-20 Forjado en martinete de dos bielas: (*a*) material en barra; después de (*b*) batanear, (*c*) "laminado," (*d*) conformación aproximada, (*e*) terminado, (*f*) recortado; (*g*) la rebaba; y (*h*) las matrices de forjado. (*Cortesía de la Forging Industry Association, Cleveland, Ohio.*)

reduce cortando un *canal para rebaba* (Fig. 9-17*b*); esto permite su libre flujo y limita su espesor mínimo a sólo un ancho pequeño, el *campo de la rebaba* (generalmente, con un ancho de $3h$ a $5h$). La rebaba se recorta ya sea en caliente o en frío, en una matriz separada que parece una matriz para blancos (Secc. 10-3).

El arte del *diseño de matrices* tiene como objetivo determinar el número mínimo de pasos necesarios desde el material de inicio (por lo general una barra redonda o rectangular) hasta la forma terminada. Los buenos diseñadores de matrices juzgan el llenado de la matriz a partir de principios básicos y de su propia extensa experiencia, pero el modelado puede ser de gran ayuda. Las probetas de plastilina o cera se pueden deformar en matrices de plástico transparentes; éste es un medio poderoso de modelado físico y, si se interpreta en forma adecuada, los resultados son relevantes. Se han hecho grandes avances en técnicas numéricas que permiten el modelado matemático del flujo del material, y actualmente se dispone de una buena cantidad de programas comerciales. El desembolso involucrado en el diseño de muchas matrices se puede minimizar adoptando la tecnología de grupos para partes formadas de manera similar (Secc. 3-1-2).

Presiones y fuerzas de las matrices No hay un método sencillo y a la vez satisfactorio para calcular las presiones y las fuerzas de las matrices de impresión, en parte porque la tasa de deformación varía mucho en las distintas partes de la pieza de trabajo. Se puede obtener un estimado muy aproximado por analogía con el forjado de formas simples, al dividir la forja en partes (cilindros, planchas, etc.) que se puedan analizar por separado. Alternativamente, toda la forja se considera como una forma simplificada (Fig. 9-17):

Paso 2: Calcular la *altura promedio* a través del volumen V y del área total proyectada A_r de la pieza de trabajo (completa con el área del canal de rebaba)

$$h_{\text{prom}} = \frac{V}{A_t} \tag{9-16}$$

Paso 4: La *deformación promedio* se determina a partir de

$$\varepsilon_{\text{prom}} = \ln \frac{h_0}{h_{\text{prom}}} \tag{9-17}$$

Paso 5: La *tasa promedio de deformación* es

$$\dot{\varepsilon}_{\text{prom}} = \frac{v}{h_{\text{prom}}} \tag{9-18}$$

Paso 7: La *presión promedio de la matriz* se establece multiplicando el esfuerzo de fluencia por un factor Q_c que tiene en cuenta la complejidad de la forma. Su valor se extrae de la tabla 9-2; nóte que la presión pico se desarrolla muy rápido cuando se llenan los detalles de la matriz. Para forjas achatadas, siempre se debe volver a comprobar contra las ecuaciones (9-7) y (9-10). (Como regla básica, las presiones de la matriz usualmente se mantienen hasta 350 MPa al forjar aleaciones de aluminio, y por debajo de 700 MPa al forjar aceros.)

Paso 8: La fuerza de forjado que se requiere es

$$P = \sigma_f Q_c A_t \tag{9-19}$$

Paso 9: El requerimiento de energía se puede estimar con la ayuda de un factor de multiplicación Q_{fe} de la tabla 9-2

$$E = \sigma_f Q_{fe} V \varepsilon_{\text{prom}} \tag{9-20}$$

Los cálculos más complejos requieren un esfuerzo computacional mayor, porque la configuración óptima de la matriz se determina sólo por iteraciones. Se establecen las presiones locales de la matriz, y si las presiones de ésta son demasiado elevadas, se cambia la forma y se repiten los cálculos. Están disponibles programas de cómputo que realizan estas tareas, así como el modelado del flujo del material.

Una de las tareas más difíciles es determinar el esfuerzo de fluencia relevante, sobre todo a la tasa de deformación elevada que prevalece en los martinetes. Debido a un enfriamiento reducido, las fuerzas del martinete son sólo 25% mayores que las de forjado con prensa.

Tabla 9-2 Factores de multiplicación para estimar las fuerzas Q_c y los requisitos de energía Q_{fe} en el forjado en matriz de impresión

Forma forjada	Q_c	Q_{fe}
Sencilla, sin rebaba	3-5	2.0-2.5
Con rebaba	5-8	3
Compleja (costillas altas, almas delgadas), con rebaba	8-12	4

Las deflexiones elásticas de la matriz pueden representar una proporción significante de los límites de tolerancia en forjas tales como la sección aerodinámica de los álabes de ventiladores o de turbinas. Para forjar partes con tolerancias estrechas, se calcula la distribución de la presión y se diseña la cavidad de la matriz para compensar sus deflexiones elásticas.

Ejemplo 9-10

Una biela pequeña se forja de acero AISI 1020 a 1 200°C. Calcule la fuerza de prensa para forjar en una prensa mecánica, que viaja a 250 mm/s cuando la matriz hace contacto con la pieza de trabajo. El volumen de la biela se calcula como 28 680 mm^3 y se espera que 20% del material inicial se convierta en rebaba. En la matriz de acabado el área proyectada es 3 500 mm^2 sin considerar el campo de la rebaba. El ancho de éste es de 7.6 mm alrededor de toda la circunferencia de 300 mm, sumando 300(7.6) = 2 280 mm^2 al área proyectada. De esta manera, A_t = (3 500) + (2 280) = 5 780 mm^2.

Paso 2: $h_{prom} = (28\ 680)/(0.8 \times 5\ 780) = 6.2$ mm.

Paso 5: $\dot{\varepsilon}_{prom} = 250/6.2 = 40\ s^{-1}$

Paso 6: En la tabla 8-2 sólo se dispone de información para el acero 1015. Sin embargo, en el intervalo de temperatura austenítica el contenido de carbono difiere poco (compare los aceros 1015 y 1045). Para 1 200°C, C = 50 MPa y m = 0.17. De aquí que $\sigma_f = 50(40^{0.17}) = 93.6\ N/mm^2$ (note que en las tablas 8-2 y 8-3 los valores de C y m se dan para $\varepsilon = 0.5$, así representan valores medios apropiados para una forja como ésta).

Paso 7: Las costillas y las almas fueron de aproximadamente 3 mm de espesor, haciendo la parte de mediana complejidad (se necesita un poco de experiencia para este juicio), y $Q_c = 8$.

Paso 8: $P = 96.3(8)(5\ 780)/1\ 000 = 4\ 328$ kN = 486 tonf. (Los datos para este ejemplo se tomaron del material del curso *Basic Principles of Forging Die Design* de la Forging Industry Association, Cleveland, Ohio. La fuerza de forjado en realidad se midió en los Battelle Columbus Laboratories y se encontró que es de 430 tonf).

Prácticas de forjado La secuencia de forjado en caliente que se muestra en la figura 9-20 es usual de la forja con martinete. Los tiempos cortos de contacto y los golpes repetidos en la misma cavidad permiten la forja de partes con costillas y almas delgadas y detalles intrincados. En el forjado con prensa la pieza de trabajo ingresa a la cavidad sólo una vez; se pueden requerir más cavidades de preformado y el diseño de la matriz es más crítico. En la figura 9-21 se muestra una secuencia característica del forjado en caliente en una prensa de propósito especial (*recalcadora horizontal*).

El enfriamiento —y en consecuencia la pérdida de calor de la pieza— en el forjado en caliente se reduce con matrices calentadas. En la forja no isotérmica, las matrices se precalientan hasta alrededor de 200°C; esto sirve también para reducir el impacto térmico sobre la matriz. En la *forja isotérmica* (con la matriz a la temperatura de la pieza de trabajo) se permiten velocidades muy lentas y se pueden forjar partes complejas de pared delgada a presiones bajas, en formas que tienen un ángulo de retiro muy pequeño o cero y que requieren poco o ningún maquinado (*forja de forma casi neta* y *de forma neta*, Fig. 9-22). La temperatura baja de la forja de las aleaciones de aluminio permite el forjado isotérmico en matrices de acero. Las aleaciones de titanio requieren matrices de superaleación o TZM, en las cuales se pueden formar las superaleaciones superplásti-

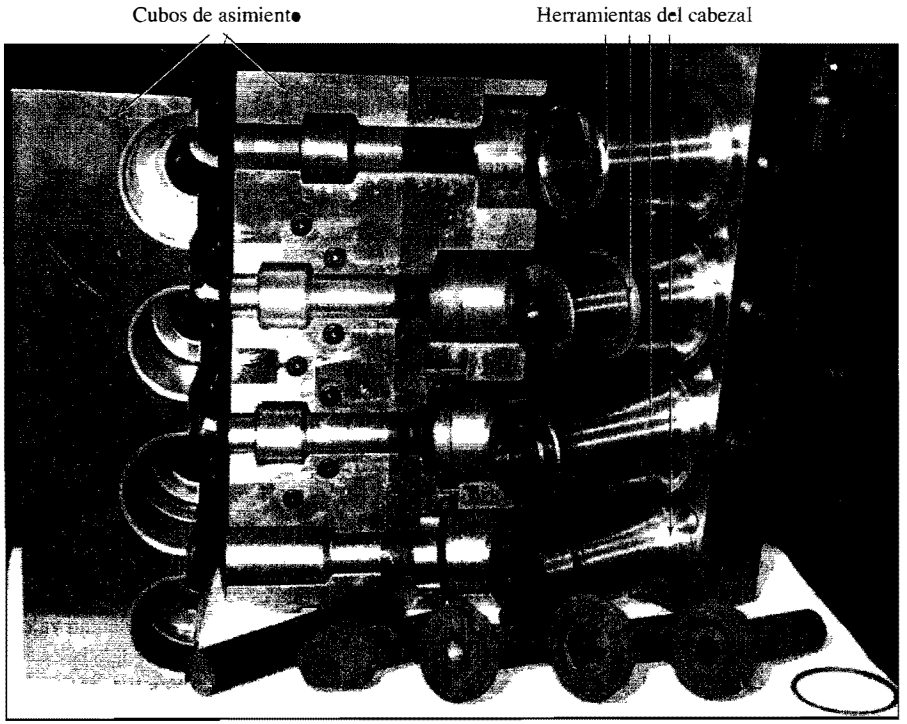


Figura 9-21 Una secuencia típica de recalcado en caliente muestra el desarrollo de la pieza de trabajo desde la barra y las herramientas asociadas. (*Cortesía de la National Machinery Co., Tiffin, Ohio.*)

cas. Para evitar la oxidación de las matrices de aleación de molibdeno se construyen prensas especiales con espacios de trabajo al vacío. La lubricación es vital en la forja isotérmica y en la mayoría de las no isotérmicas.

Ejemplo 9-11

Los álabes del compresor de los motores de reacción tienen una forma algo similar a la fundición que se muestra en la figura 7-16, pero son mucho más grandes. Algunos se fabrican por forjado isotérmico de una aleación de Ti como Ti-6Al-4V.[1] Suponga que para un álabe dado, el plano aerodinámico es el equivalente de una plancha de 120 mm de ancho, 6 mm de espesor y 350 de longitud. Obtenga el esfuerzo de fluencia relevante a 900°C para una velocidad de la prensa hidráulica de (*a*) 250 mm/s y (*b*) 2.5 mm/s.

De la tabla 8-3, $C = 140$ MPa, $n = 0.4$.

a. $\dot{\varepsilon} = 250/6 = 41.7\ s^{-1}$; $\sigma f = 140(41.4^{0.4}) = 622$ MPa.

b. $\dot{\varepsilon} = 2.5/6 = 0.417\ s^{-1}$; $\sigma f = 98.7$ MPa.

Note el poderoso efecto de la tasa de deformación cuando m es alta.

[1] T. Watmough y J.A. Schey, U.S. Patente No. 3, 635, 068.

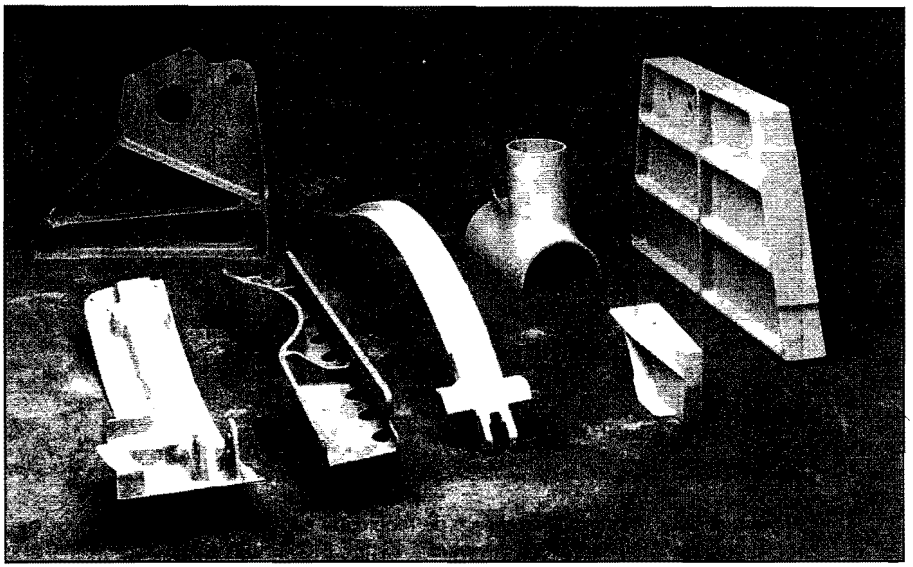


Figura 9-22 Las forjas de precisión de aleaciones de aluminio se hacen con almas y costillas delgadas y con poco o nulo ángulo de retiro. (*Cortesía de Aluminum Precision Products, Inc., Santa Ana, California.*)

Las presiones de la matriz son elevadas en la forja en frío, y por lo general la deformación se distribuye en varias cavidades (Fig. 9-23). La lubricación es crucial para el éxito, en parte para reducir las presiones de la matriz y también para evitar su agarre (adhesión), y la subsiguiente estriación de las piezas de trabajo.

Forjado de precisión El concepto se aplica a los procesos que tienen como objetivo producir partes de forma neta o casi neta. La forja en frío y la mayoría de la forja en tibio y de la forja isotérmica están en esta categoría. Cuando se aplica a la forja no isotérmica, el término indica prácticas que producen tolerancias mucho más altas, mejor acabado superficial, ángulos de retiro más pequeños y mejor definición de la forma, respecto a las prácticas convencionales.

9-3-2 Forjado por matriz cerrada

En el *forjado por matriz cerrada* verdadero la pieza de trabajo se atrapa por completo en la matriz y no se genera rebaba. De esta forma, el forjado es más económico, pero se deben controlar muy cuidadosamente el diseño de la matriz y las variables del proceso. Al final de la carrera, la cavidad está llena en su totalidad con un sólido incompresible, y las presiones de la matriz se elevan de manera pronunciada; esto se convierte en un factor crítico en la preparación del equipo (Secc. 9-5). Las fuerzas se calculan como en el forjado por matriz de impresión. Se obtiene una reducción drástica en las fuerzas en el tixoformado, con el material en estado semisólido (Secc. 7-5-6).

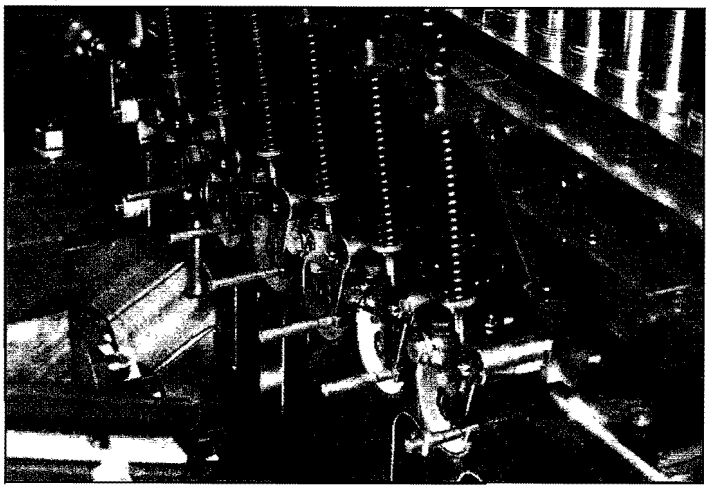


Figura 9-23 Una secuencia típica de recalcado en frío que indica el desarrollo y transferencia de la parte en seis estaciones de formado a una velocidad de 300 partes/min. (*Cortesía de la National Machinery Co., Tiffin, Ohio.*)

Un caso especial del forjado por matriz cerrada es el *acuñado*, en el cual se imparte un detalle superficial tridimensional a una preforma. La aplicación más grande es, por supuesto, para la acuñación de monedas, pero el acuñado es útil para mejorar la precisión dimensional, el acabado superficial o también el detalle de otras partes. La presión de forjado es al menos $p_i = 3\sigma_f$, pero el llenado de los detalles finos requiere presiones de $5\sigma_f$ o incluso de $6\sigma_f$.

9-3-3 Laminado con forjado y estampado rotatorio

Éstos son dos de los procesos de forjado más especializados.

El *laminado con forjado* hace una operación de forjado por matriz de impresión, pero esta vez los contornos de la mitad de la matriz se maquinan en las superficies de los dos rodillos. El movimiento recíproco del rodillo es adecuado para el laminado de piezas cortas, mientras que la rotación unidireccional se usa en líneas de alta producción. Con frecuencia el laminado con forjado reemplaza la forja en matriz abierta para el preformado, pero también es apropiada para terminar forjas más o menos planas, como cuchillería y tijeras.

Una forma especial de martillo es la *estampadora rotatoria.* Usualmente la pieza de trabajo es estacionaria, mientras que el martinete gira. La construcción se parece a la de un cojinete de rodillos (Fig. 9-24*a*): los yunques son libres de moverse en una ranura de la flecha rotatoria y así se lanzan contra los rodillos, los cuales a su vez los golpean de regreso. Se obtiene una secuencia rápida de golpes y la pieza de trabajo, alimentada axialmente, se reduce en diámetro por un proceso de estirado longitudinal. Aunque hablando de modo estricto, el estampado se debe considerar (y algunas veces

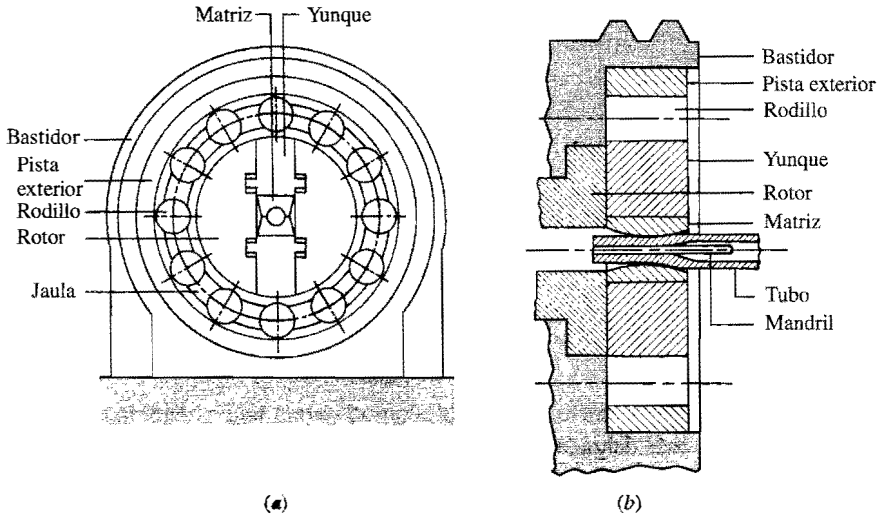


Figura 9-24 Una estampadora rotatoria reduce las piezas de trabajo (*a*) sólidas o (*b*) huecas con golpes rápidos.

se usa) como un proceso de forjado por matriz cerrada; no obstante, es capaz de producir superficies excepcionalmente lisas para tolerancias cerradas. El proceso se puede emplear para afilar, ensamblar una barra y un collar, o formar el contorno interno de un tubo en un mandril (Fig. 9-24*b*).

En el forjado por matriz de impresión de formas con razones *d*/*h* grandes, las presiones elevadas de la matriz se reducen reemplazando la matriz superior con una *herramienta orbital* que sólo hace contacto sobre una parte de la superficie. Muchos diseños patentados explotan este principio.

9-3-4 Capacidades del proceso y aspectos del diseño

El forjado de impresión y por matriz cerrada son muy versátiles, pero se originan limitaciones en la forma a partir de la necesidad de liberar la forja de la matriz (tabla 9-1). El diseño tiene como objetivo facilitar el buen flujo del material con una presión mínima de la matriz.

Dimensiones y tolerancias La parte está diseñada para requerir un maquinado mínimo; las tolerancias de maquinado son por lo general de 1.5 mm en el forjado convencional, y de menos de 0.5 mm en el forjado de precisión. En la figura 3-22 se muestran las tolerancias. Las dimensiones máximas están gobernadas por la capacidad del equipo disponible. Las dimensiones mínimas dependen en gran medida de la temperatura de la matriz y del material forjado. El espesor mínimo del alma está regido por la presión de la matriz; aun con el mejor diseño de la matriz y con la mejor lubricación, sólo se puede lograr una razón máxima *d*/*h* o *L*/*h*. En la figura 9-25 se proporciona una guía

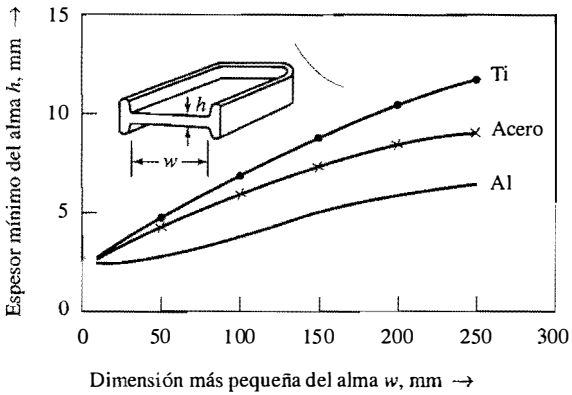


Figura 9-25 La presión de la matriz es una función de los valores d/h o L/h; por lo tanto, el espesor mínimo del alma en la forja común depende de la dimensión más pequeña del alma.

general. Almas aún más delgadas pueden fabricarse si se forman para sacar el material (Fig. 9-26*a*), como se hace en el bataneo (Fig. 9-12*a*). Ya sea que el alma sea plana o ahusada, es importante el preformado adecuado; de otra forma, el material en exceso que se expulsa de ella crea un *pliegue* (*se abre paso*, Fig. 9-26*b*) en la costilla.

Características de forma Además de las limitaciones generales de la forma (tabla 9-1), el diseño de una parte puede ayudar al forjado.

1. Los ángulos de retiro (Fig. 9-16*a*) dependen del material y del método de forjado. Los ángulos menores son permisibles cuando se construyen expulsores en la matriz, así que el ángulo de retiro interno se puede reducir cuando la diferencia de temperatura entre la forja y la matriz es pequeña. Abajo se proporciona una guía muy general (ángulos en grados):

	Tipo de bloqueo		**Convencional**		**Precisión**	
	Exterior	Interior	Exterior	Interior	Exterior	Interior
Aleación de aluminio	7	7	5	5	1	1
Acero, aleación de Ti	7	9	5	7	2-4	3-5
Aleaciones resistentes al calor	7	10	7	10	5	7

2. Los radios de esquina y de filete en la forja (Fig. 9-26*b*) dependen del tamaño de ésta y de la altura de las costillas. El llenado de los radios de esquinas muy agudas requiere una presión excesiva de la matriz; los radios agudos del filete conducen a defectos como los pliegues. Algunos valores usuales se dan en seguida (dimensiones en mm):

	Convencional		**Precisión**	
	Esquina	Filete	Esquina	Filete
Aluminio	3-5	6-15	1.5-3	3-9
Acero	3-12	10-16		

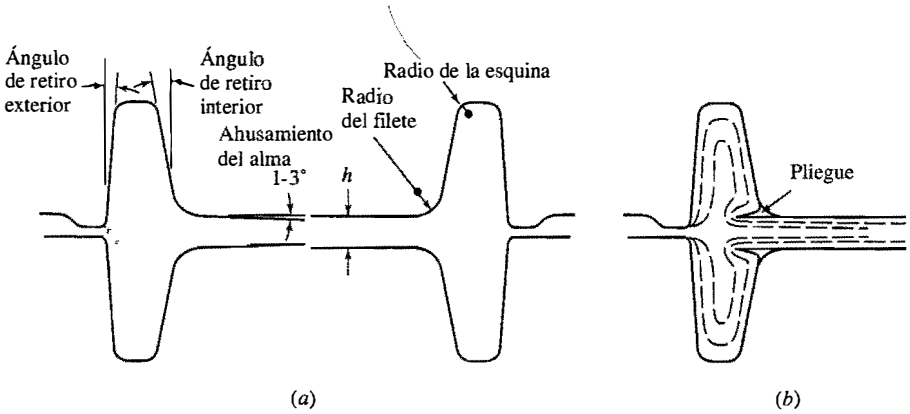


Figura 9-26 La configuración de la costilla y del alma se puede forjar si (a) se aplican radios y ángulos de retiro apropiados y (*b*) se hace un preformado para evitar la salida del material del alma.

3. Puede obtenerse una mayor complejidad de la forma si la matriz está hecha de más de dos partes. De esta manera, un *recalcador horizontal* tiene, además del ariete principal (similar al cabezal móvil de una prensa), un movimiento auxiliar que cierra una matriz dividida (Figs. 9-21 y 9-27*a*). Así, las formas sesgadas con respecto al movimiento del ariete pueden forjarse. Algunas prensas tienen tres o cuatro arietes, de manera que se pueden forjar piezas como los cuerpos de las válvulas (Fig. 9-27*b*).

Defectos Ya se mencionó que se deben evitar los dobleces y los pliegues. Además, la deformación debe ser tan homogénea como sea posible para evitar la generación de defectos internos. Esta condición suele satisfacerse en el forjado por matriz de impresión, pero las razones elevadas h/L se pueden desarrollar en el estampado; así que, el centro se puede abrir (*defecto de estallido central*). Los componentes manufacturados de forma compleja con frecuencia se producen por una combinación de forjado y extrusión; por lo tanto, los procesos de extrusión se analizan en seguida.

9-4 EXTRUSIÓN

Como lo sugiere la raíz latina (*extrudere*: empujar hacia fuera), en el proceso de extrusión la pieza de trabajo se impulsa contra la matriz de deformación mientras se soporta

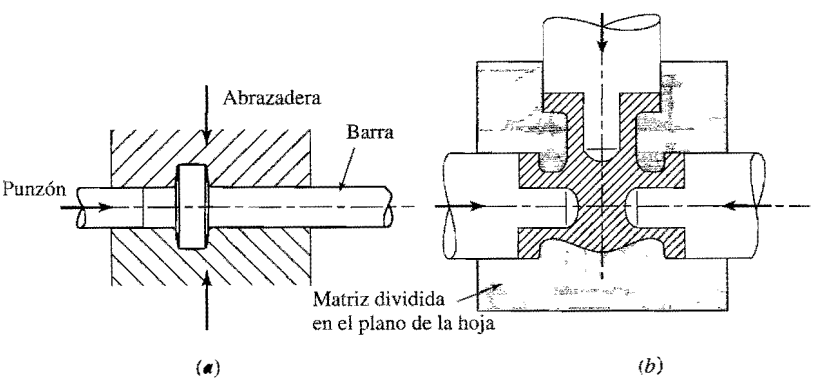


Figura 9-27 Las matrices divididas permiten la liberación de (a) un collarín recalcado y de (*b*) una forja con arietes múltiples.

en un *recipiente* contra la deformación no controlada. Como la pieza de trabajo está en compresión, el proceso ofrece la posibilidad de grandes deformaciones acopladas con una gran elección de secciones transversales extruidas.

9-4-1 Proceso de extrusión

Para iniciar la extrusión, una palanquilla, comúnmente cilíndrica, se carga dentro de un recipiente y se empuja contra una matriz sostenida por un soporte firme. La fuerza de la prensa se aplica al punzón y después que la palanquilla se ha recalcado para llenar el recipiente, el producto emerge a través de la matriz (Fig. 9-28). Al inicio la deformación es de estado no estable, pero una vez que el producto emerge, las condiciones de estado estable prevalecen hasta cerca del final de la extrusión, cuando el flujo continuo del material se altera nuevamente.

Tipos de extrusión Existen dos procesos básicamente diferentes:

1. En la *extrusión directa* o *hacia delante* el producto emerge en la misma dirección que el movimiento del punzón (también llamado *ariete*, Fig. 9-28*a*). El punto verdaderamente importante es que, para que suceda la extrusión, la *palanquilla se debe mover contra una resistencia por fricción* en la pared del contenedor (el esfuerzo cortante por fricción se muestra con medias flechas).

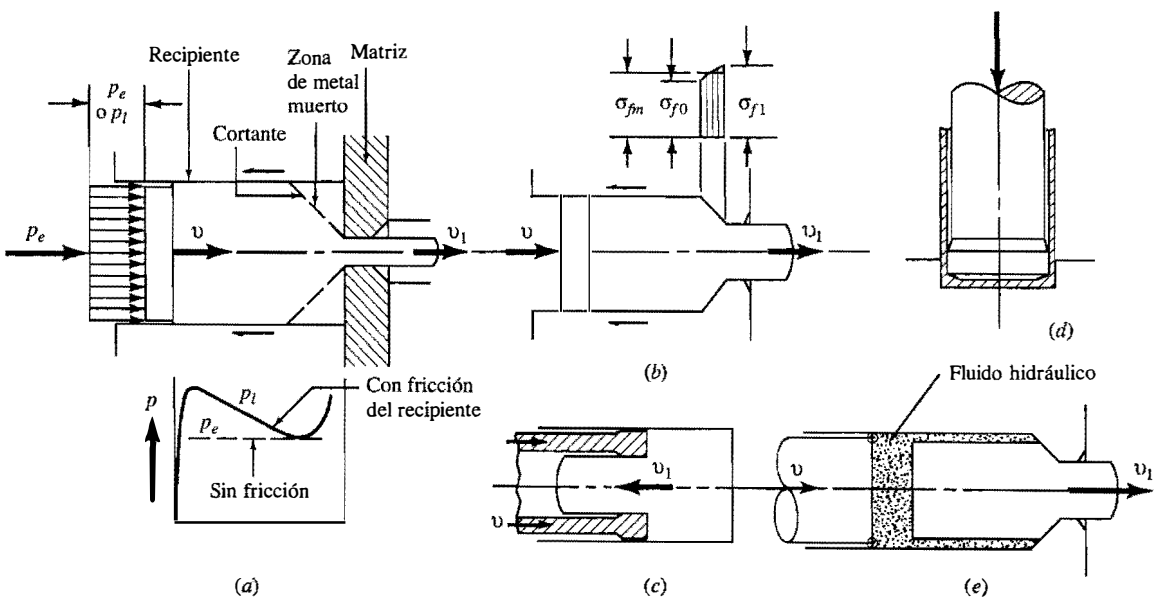


Figura 9-28 Procesos de extrusión: (a) hacia delante o directa sin lubricación (y la curva asociada extrusión-presión/carrera); (*b*) hacia delante con lubricación completa; (c) inversa (o indirecta o hacia atrás); (*d*) inversa de una lata (por impacto); (e) extrusión hidrostática.

2. En la *extrusión indirecta* (*invertida* o *hacia atrás*), el producto viaja contra el movimiento de un punzón (Fig. 9-28*c* y *d*). Lo más importante es que la palanquilla está en reposo en el recipiente; así, la *fricción del recipiente no tiene función alguna.* Por definición, el punzonado en un recipiente (Fig. 9-14*a*) se puede considerar como un caso de extrusión indirecta.

Lubricación Se pueden hacer distinciones adicionales dependiendo de si se usa un lubricante.

1. El material siempre busca un patrón de flujo que tenga un gasto mínimo de energía. Cuando la extrusión se lleva a cabo sin un lubricante y con una matriz de cara plana (abertura de la matriz de 180°), el material no puede seguir los cambios direccionales muy abruptos a que se somete. En vez de eso, la esquina entre la cara de la matriz y el recipiente se llena por una *zona estacionaria de metal muerto*, por lo que el flujo del material ocurre debido al cortante a lo largo de la superficie de esta zona (*extrusión no lubricada*, Fig. 9-28*a*). De esta manera, el producto extruido adquiere una superficie recién formada.

2. Alternativamente, se aplica un lubricante muy efectivo para asegurar el deslizamiento completo sobre la cara de la matriz y a lo largo de la pared del recipiente (*extrusión lubricada*). En consecuencia, ahora la matriz está provista de una zona cónica de entrada que, idealmente, corresponde en forma al patrón del flujo de energía mínima (Fig. 9-28*b*).

3. En una variante del proceso, la palanquilla se extruye presurizando un medio líquido dentro de un recipiente cerrado (*extrusión hidrostática*, Fig. 9-28*e*). Esto reduce la fricción en la pared del recipiente, pero no cambia fundamentalmente el estado de esfuerzos dentro de la pieza de trabajo que se deforma; la fricción reducida de la matriz (y la menor presión hidráulica) puede elevar incluso la tendencia a la formación de grietas internas. Sin embargo, la ausencia de fricción en el recipiente permite la extrusión de palanquillas muy grandes o inclusive de alambres, con lo cual pueden ocurrir grandes reducciones. El proceso se emplea para propósitos especiales como la extrusión en frío de tubos de cobre y de palanquillas compuestas de cobre-aluminio para producir alambres y barras conductoras revestidas de cobre.

Producto extruido El movimiento del punzón debe detenerse antes de tocar la entrada cónica, o en la extrusión sin lubricación, antes de que se mueva el material de la zona muerta, puesto que esto crearía defectos internos. Hay dos métodos básicos de operación:

1. Cuando el propósito de la extrusión es producir una barra larga o un tubo de sección transversal uniforme (*extrusión de productos semifabricados*), el remanente (*tocho*) que permanece en el recipiente es chatarra, la cual se retira sacándola con la matriz. Después que el tocho se corta, la extrusión se puede liberar de la matriz, y ésta se regresa para su inspección, acondicionamiento y reúso.

2. Cuando el propósito es la *extrusión de componentes terminados*, el tocho forma una cabeza integral del componente. La extrusión se expulsa empujándola hacia atrás a través de la matriz de extrusión y se levanta fuera del recipiente. Como la acción del

expulsor se puede sincronizar en forma mecánica con el movimiento del punzón, se logran altas velocidades de producción, a condición de que, por supuesto, el vástago extruido sea lo suficientemente fuerte para resistir la fuerza de expulsión.

Se puede hacer una distinción adicional importante de acuerdo con la temperatura de deformación.

9-4-2 Extrusión en caliente

Aunque la deformación en caliente es típica de los procesos primarios, la extrusión en caliente de formas ofrece un panorama tan amplio para el diseño a la medida, que este proceso se puede considerar de manera justificada como una técnica de manufactura secundaria. Comúnmente las formas se clasifican en tres grupos según su complejidad (Fig. 9-29):

1. Las *formas sólidas* se producen al realizar la extrusión a través de una matriz estacionaria adecuadamente formada.

2. Los *productos huecos* necesitan un inserto en la matriz que forma la cavidad en el producto extruido. Este inserto puede ser un *mandril* fijo al punzón (Fig. 9-30*a*), uno que se mueve dentro del punzón (Fig. 9-30*b*), o una sección en *puente* (*araña*) colocada en la matriz (Fig. 9-30*c*). El último método es factible sólo si el flujo del material se puede dividir y luego reunir antes de dejar la matriz, con soldadura completa por presión de las corrientes separadas. Esto sólo se puede hacer en la extrusión en caliente del aluminio y del plomo; incluso una cantidad diminuta de lubricante evitaría soldar de nuevo.

3. Los *productos semihuecos* parecen ser secciones sólidas, pero su forma hace impráctico el empleo de una matriz de una sola pieza. La lengüeta de la matriz que crea la forma interna está conectada al contorno externo por una sección transversal tan

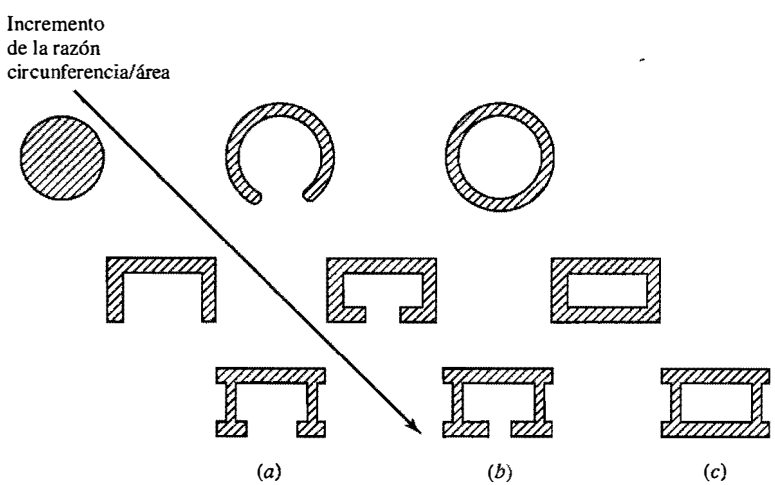


Figura 9-29 En la extrusión de configuraciones (a) sólida, (b) semisólida y (c) hueca, la dificultad del proceso se incrementa al aumentar la razón circunferencia/área.

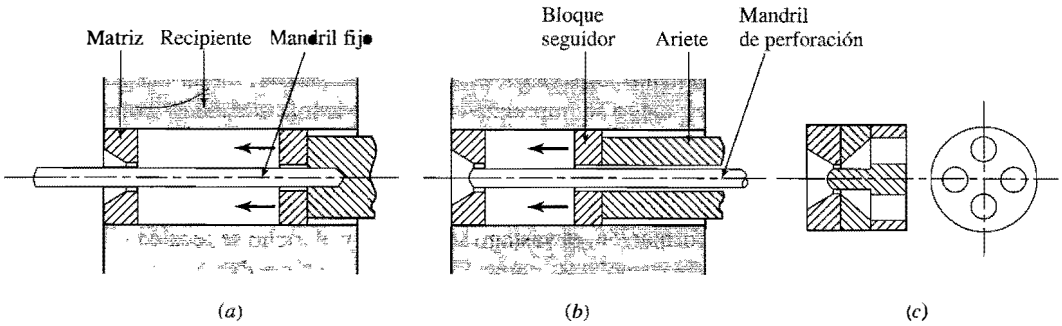


Figura 9-30 Los productos huecos se pueden extruir con mandriles (*a*) fijos o (*b*) de perforación, o con (*c*) matrices en puente o del tipo de araña. [*Según J.A. Schey, en Techniques of Metals Research, R.F. Bunshah (ed.), vol. 1, pt. 3, Interscience, 1968, p. 1494. Se reproduce con autorización.*]

pequeña que se rompería; por lo tanto, se deben usar las técnicas similares a la extrusión de secciones huecas.

Las aleaciones de aluminio se extruyen de manera isotérmica, sin lubricante y con matrices planas hechas de aceros utilizados para matrices para trabajo en caliente. El cortante a lo largo de la zona de metal muerto proporciona superficies nuevas y brillantes. El cobre y el latón se extruyen sobre todo sin lubricación, no isotérmicamente. El enfriamiento del recipiente más frío y de la matriz limita la complejidad y la esbeltez de las formas. Esto también es cierto para la extrusión en caliente del acero, por lo general llevada a cabo con un lubricante de vidrio que cubre la palanquilla y se derrite de una manera controlada para crear una aproximación de forma óptima a la matriz; algunas veces se producen longitudes más cortas y secciones más delgadas con lubricantes de grafito. Con frecuencia las matrices se recubren con un cerámico (por ejemplo, circonia parcialmente estabilizada) para protección.

El material de inicio a menudo es una palanquilla fundida. La razón de extrusión deberá ser al menos 4:1 para asegurar el trabajo adecuado, pero se puede elevar a 400:1 para aleaciones más suaves.

9-4-3 Extrusión en frío

El propósito de la extrusión en frío es principalmente producir una parte terminada, por lo que el residuo (tocho) en el recipiente se convierte en una parte integral del producto terminado (por ejemplo, en la extrusión hacia delante del cuerpo de un perno o de un semieje automotriz, o en la extrusión hacia atrás de un tubo de pasta dental).

La baja resistencia del flujo del estaño y del plomo facilitan su extrusión temprana en frío para tubos colapsables (con frecuencia llamada *extrusión por impacto*, Fig. 9-28*d*). El punto de fusión bajo de estos metales significa que en realidad se extruyen en el régimen de trabajo en caliente o en tibio. La extrusión en frío verdadera sucede con el aluminio, en este caso la lubricación se vuelve crítica (tabla 8-4); no obstante, es posible una deformación severa. Sólo se toleran razones de extrusión más pequeñas con el cobre y el latón; la extrusión en frío del acero sería imposible sin un lubricante que

soporte presiones muy elevadas en el momento en que sigue la extensión de la superficie. La aproximación más exitosa convierte la superficie del acero en un fosfato de zinc e hierro (*recubrimiento fosfatado*); esta superficie porosa, unida íntegramente a la superficie del metal, luego se impregna con un lubricante adecuado, comúnmente un jabón (tabla 8-4). Los aceros con mayor contenido de carbono se pueden extruir después de un recocido de esferoidización. El endurecimiento por deformación ofrece un valioso incremento en la resistencia. Si una pieza de trabajo se va a endurecer de modo uniforme por deformación, el vástago se extruye y el tocho se recalca subsecuentemente. Las partes más complejas, como las flechas escalonadas huecas, pueden requerir varias operaciones de extrusión o de forjado, y la parte puede precisar un recocido de proceso y luego el relubricado. La extrusión en frío ha hecho grandes incursiones en la industria automotriz y de equipo en general, para partes previamente fabricadas por maquinado.

Ejemplo 9-12

Un componente parecido a un perno se fabricaba por maquinado y ahora se hará por deformación plástica. Se desea conservar los beneficios del trabajo en frío; además, la pieza va a tener endurecimiento por deformación igual en las secciones de la cabeza y del cuerpo. ¿Qué procesos se deberán usar?

El endurecimiento por deformación igual sólo se puede obtener si la cabeza se recalca y el cuerpo se extruye (o se reduce de otra forma). Se debe elegir una barra de diámetro intermedio d_0 de manera que la deformación por recalcado $\ln (A_{\text{cabeza}}/A_{\text{●}})$ sea igual a la realizada por extrusión $\ln (A_0/A_{\text{cuerpo}})$.

$$A_{\text{cabeza}} = 20^2\pi/4 = 314 \text{ mm}^2 \qquad A_{\text{cuerpo}} = 10^2\pi/4 = 78.8 \text{ mm}^2$$

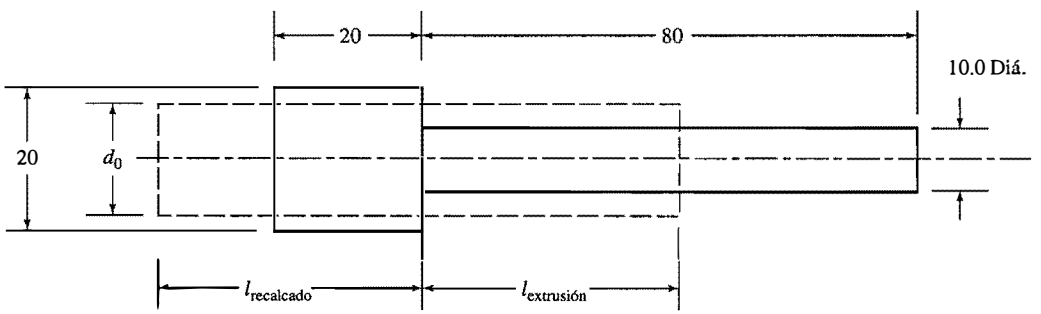


Figura ejemplo 9-12

para deformación igual, $\ln (314/A_0) = \ln (A_0/78.5)$.

$$A_0^2 = (314)(78.5) = 24\,650 \quad \text{y} \quad A_{\text{●}} = 157 \text{ mm}^2$$

El diámetro inicial, de la ecuación (9-2*c*), $d_0 = [4(157)/\pi]^{0.5} = 14.14\text{mm}$.

9-4-4 Fuerza de extrusión

La rutina de cálculo es similar a la que se siguió en el forjado (Secc. 9-2-1), pero hay algunas diferencias significativas en detalle.

Paso 2: Las dimensiones de interés son las áreas de las secciones transversales de la palanquilla A_0 y de la extrusión A_1. También se necesitarán los diámetros d_0 y d_1. Cuando la sección extruida no es una barra redonda, se puede calcular un *diámetro equivalente* por medio del área A_1 [ecuación (9-2*c*)].

Paso 3: La deformación de ingeniería se puede calcular como la reducción del área

$$e_e = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \tag{9-21}$$

Sin embargo, en reducciones grandes, se obtiene una mejor aproximación a partir de la *razón de extrusión*

$$R_e = \frac{A_0}{A_1} \tag{9-22}$$

Paso 4: La deformación es simplemente el logaritmo natural de R_e

$$\varepsilon = \ln R_e = \ln \frac{A_0}{A_1} \tag{9-23}$$

Paso 5: La tasa de deformación es importante en el trabajo en caliente y se puede calcular una *tasa media de deformación* de

$$\dot{\varepsilon}_m = \frac{6vd_0^2 \tan \alpha}{d_0^3 - d_1^3}\varepsilon \tag{9-24}$$

donde v es la velocidad del ariete. El semiángulo α es el ángulo del cono de la entrada de la matriz, o en la extrusión sin lubricación con una zona de metal muerto, puede ser de 45° (a menos que los experimentos o el modelado matemático prueben que es diferente).

Paso 6: En el trabajo en frío, el material de la pieza de trabajo se endurece por deformación durante su paso a través de la matriz, pero se debe obtener un *esfuerzo medio de fluencia* σ_{fm} como se muestra en la figura 9-2 y en la ecuación (9-1). En el trabajo en caliente, la ecuación (8-11) proporciona un esfuerzo medio de fluencia cuando se utiliza la tasa media de deformación [ecuación (9-24)].

Paso 7: La deformación es no homogénea y se necesita trabajo extra para deformar el material hasta su forma final. Este *trabajo redundante* es proporcional a ε, y para cálculos aproximados, la *presión de extrusión* p_e se puede determinar por medio de la siguiente fórmula

$$p_e = \sigma_{fm} Q_e \tag{9-25a}$$

donde

$$Q_e = 0.8 + 1.2\varepsilon \tag{9-25b}$$

Paso 8: La fuerza total de extrusión P_e que actúa en la palanquilla es

$$P_e = p_e A_0 \tag{9-26}$$

Ejemplo 9-13

Una palanquilla de aleación Al 6061 se extruye a 500°C sin lubricación, en una prensa hidráulica a una velocidad del ariete de 0.5 m/s. Encuentre la presión básica para extruir una barra de 15

mm de diámetro, suponiendo que el semiángulo de la zona de metal muerto es 15°, 30°, 45° o 60°.

Para los cálculos repetitivos, se prepara una hoja de cálculo. El resultado es:

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Al 6061 en caliente				T=	500	C								
Esfuerzo de fluencia			C=	37	MPa	m=	0.17							
	alfa	v	d0	A0	d1	A1	ee	Re	épsilon	épsilon punto	sigma f	Qe	pe	Pe
	grados	mm/s	mm	mm^2	mm	mm^2				1/s	N/mm^2		N/mm^2	kN
							Ec. (9-21)	Ec. (9-22)	Ec. (9-23)	Ec. (9-24)	Ec. (8-11)	Ec. (9-25b)	Ec. (9-25a)	Ec. (9-26)
0		500	200	31 416	15	176.7								
1	15	500	200	31 416	15	176.7	0.994	177.8	5.18	20.8	62.0	7.02	435.0	13 667
1	30	500	200	31 416	15	176.7	0.994	177.8	5.18	44.9	70.6	7.02	495.7	15 572
1	45	500	200	31 416	15	176.7	0.994	177.8	5.18	77.7	77.6	7.02	544.2	17 096
1	60	500	200	31 416	15	176.7	0.994	177.8	5.18	134.7	85.1	7.02	597.4	18 769

Vea que un cambio del ángulo dentro de límites razonables (digamos de 45 a 60°) tiene un efecto relativamente pequeño en las fuerzas.

Una palabra de advertencia es precisa aquí. Ya se analizó (Secc. 9-4-1) que la extrusión hacia atrás de una lata es similar a punzonar un recipiente (Fig. 9-14*a*). La fuerza de extrusión, ecuación (9-26) se basa en la presión p_e que actúa sobre el área base A_0; a reducciones bajas, sin embargo, la fuerza en realidad puede estar dada por la fuerza de punzonado. Esto se obtiene multiplicando el área del punzón $A_p = A_0 - A_i$ por su presión p_i (de indentador) la cual, como se analizó en la sección 9-2-3 bajo "punzonado", nunca puede ser menor de $3\sigma_f$ [ecuación (9-13)], aunque es más probable que sea de $4\sigma_f$ a $5\sigma_f$. Por lo tanto, es aconsejable calcular la fuerza de extrusión por medio de la ecuación (9-26) y de la fuerza del punzón *Pi*,

$$P_i = p_i A_p = p_i(A_0 - A_i) \qquad \textbf{(9-27)}$$

y tomar el *menor* de los dos valores. No importa si el punzón de indentación es sólido, como se muestra en la figura 9-14*a*, o hueco, como en la figura 9-28*c*.

Fricción del recipiente En la extrusión directa, la palanquilla se empuja hacia delante contra la resistencia friccional que se desarrolla en la pared del recipiente. En correspondencia, la presión de extrusión es mayor al inicio de la carrera, cuando una longitud grande se frota contra la pared del recipiente (Fig. 9-28*a*). En razones elevadas de extrusión las presiones en la interfaz pueden ser muy altas y el empleo de un coeficiente de fricción podría ser confuso (Secc. 8-2-3). Por lo tanto, es mejor estimar la resistencia

al cortante de la interfaz τ_i y agregar la presión correspondiente a la presión básica de extrusión para obtener la presión del ariete (punzón) p_l en cualquier punto en la carrera

$$p_l = p_e + 4\frac{\tau_i l}{d_0} \tag{9-28}$$

donde l es la longitud de la palanquilla en el punto considerado en la carrera, medida desde el final de ésta. Los datos para τ_i son escasos, pero un límite superior se da por adhesión cuando $\tau_i = \tau_f$ o $0.5\tau_f$. Con un lubricante en verdad efectivo, la presión bajará hacia la presión básica, ecuación (9-25*a*).

Ejemplo 9-14

Una lata de Al 1100 de 50 mm DE y 48 mm DI se va a producir por medio de la extrusión hacia atrás en frío (Fig. 9-28*d*) de blancos recocidos de $d_0 = 50$ mm de diámetro. Se usa lanolina como lubricante. Calcule la fuerza durante la extrusión de estado estable.

De nuevo se prepara una hoja de cálculo, tomando nota de que la extrusión es un tubo hueco. (Note que la hoja de cálculo permite el uso de un material previamente endurecido por deformación y proveer para ε_{total}).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Al 1100 frío													
Esfuerzo de fluencia			K=	140	MPa	n=	0.25						
												Base	
Paso	mu	d0	di	A	ec	Re	épsilon	épsilon	sigma fm	Qe	pe	A0	Pe
Núm.		mm	mm	mm^2				total	N/mm^2		N/mm^2	mm^2	kN
					Ec. (9-21)	Ec. (9-22)	Ec. (9-23)		Ec. (9-1)	Ec. (9-25b)	Ec. (9-25a)		Ec. (9-26)
0		50	0	1 963.5				0					
1	0.1	50	48	153.9	0.92	12.76	2.546	2.55	141.5	3.86	545.4	1 963.5	1 070.9

Con la geometría y el lubricante dados, se puede ignorar la fricción de la pared.

Verifique la fuerza del punzón para la indentación de un material endurecido por deformación:

$$p_i = 141.5(5) = 707.5 \text{ MPa}$$
$$p_i = (1\,963.5 - 153.9)(10^{-3})(707.5) = 1\,280 \text{ kN}$$

De esta manera, el valor calculado para la extrusión es menor y será suficiente para realizar la operación.

9-4-5 Capacidades del proceso y aspectos del diseño

La capacidad de la extrusión para producir grandes productos semifabricados de sección transversal compleja es insuperable. Como las matrices son relativamente baratas (tabla 9-1), el diseño a la medida se justifica para muchas aplicaciones. No es extraño que se diseñen extrusiones de aluminio al gusto para marcos de ventanas y de puertas

para grandes edificios públicos, o para computadoras, equipo médico, sistemas de transporte, robótica y muchas otras aplicaciones. La extrusión en frío y la extrusión combinada con la forja se han convertido en métodos importantes de producción en masa para productos de forma neta y casi neta, como componentes para transmisiones de automóviles, sistemas de dirección y de sujeción.

Dimensiones y tolerancias Existen límites dimensionales: un círculo inscrito alrededor de la sección debe ser en general menor que los diámetros de los recipientes de las prensas disponibles. Las tolerancias pueden ser muy cerradas en la extrusión en frío y son necesariamente mayores en la realizada en caliente (Fig. 3-22). El espesor mínimo de pared que se da en la tabla 9-1 se refiere a materiales de dificultad moderada, como las aleaciones de aluminio de alta resistencia o el latón. El doble de estos valores es usual en los materiales más difíciles (aceros o superaleaciones), pero los valores muy pequeños entre paréntesis son posibles para las aleaciones de aluminio de baja resistencia (1100 o 3003).

Forma Existe muy poca dificultad al extruir secciones con espesor uniforme de pared; las secciones de espesor desigual de pared se curvarían al emerger de la matriz. La razón es que la presión de extrusión se incrementa con la razón de extrusión [ecuación (9-25)]. Una presión común prevalece en el recipiente; como para una presión de extrusión dada la tasa de extrusión disminuye con el aumento de la reducción, el material sale a una velocidad menor en la sección delgada de la extrusión (Fig. 9-31*a*). Con el fin de acelerar la sección angosta (o para restringir el flujo en la más gruesa), las superficies friccionales (*apoyos*) se reducen para dicha sección (Fig. 9-31*b*).

La complejidad incrementada a menudo se expresa como un *factor de forma* perímetro/peso o perímetro/área de la sección transversal; entre mayor sea su valor, se requerirá más habilidad para producir la pieza. Puede utilizarse el diseño asistido por computadora de la matriz, con frecuencia con programas expertos que concentran el conocimiento de los diseñadores experimentados de matrices. Las localizaciones de las aberturas de la matriz de las longitudes de los apoyos y de sus deflexiones se obtienen fácilmente; así se minimizan el tiempo y los costos de prueba de la matriz. Con un diseño adecuado de la matriz, se pueden producir formas muy complejas (Fig. 9-32).

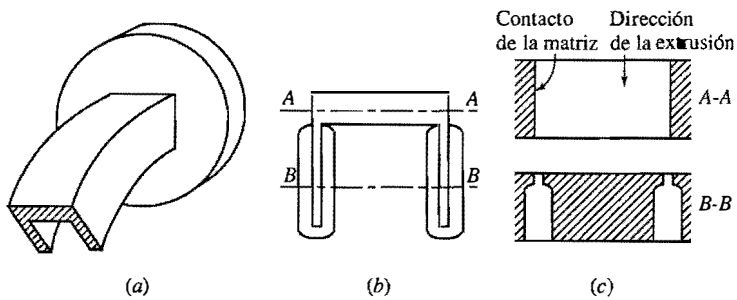


Figura 9-31 Para evitar el curvado de la extrusión emergente, la rapidez del flujo se equilibra incrementando la longitud de contacto de la matriz para retardar el flujo en las secciones más gruesas.

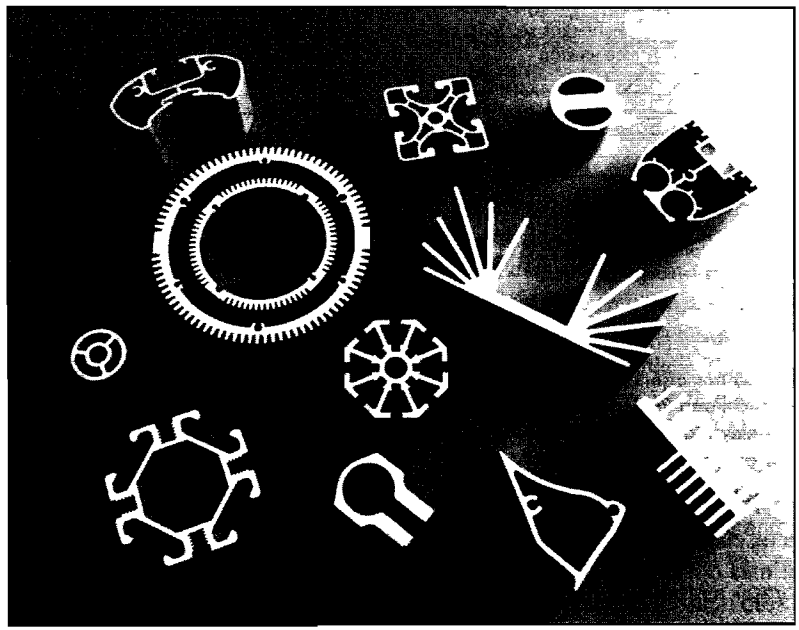


Figura 9-32 La extrusión en caliente del aluminio es capaz de producir una gran variedad de formas a menudo muy complejas, incluyendo secciones con agujeros múltiples, engranes y tubos, con paredes delgadas y variaciones significativas del espesor de la pared. (*Cortesía de Almag Aluminum Inc., Brampton, Ontario.*)

Defectos Aunque el material se mantiene en compresión general y la componente hidrostática del esfuerzo es alta, el proceso de extrusión no está libre de problemas.

1. La deformación tiende a ser no homogénea, sobre todo en razones de extrusión debajo de 4. La no homogeneidad (Secc. 8-2-5) es, en general, una función de la razón h/L (altura media h sobre la longitud comprimida L). En la figura 8-17 la razón h/L se refiere a una plancha rectangular, mientras que la extrusión se conduce usualmente con simetría axial. No obstante, los mismos principios se aplican (Fig. 9-33), excepto que el diámetro medio $(d_0 + d_1)/2$ ahora se sustituye por h.

Igual que antes, la deformación es no homogénea cuando la razón h/L es grande (Fig. 9-33*b*); en otras palabras, cuando la razón de extrusión es pequeña y el semiángulo α de la matriz es grande. Como en toda la deformación no homogénea, existe trabajo redundante necesario para crear la deformación interna que no se muestra en la forma externa. Puesto que ahora la deformación se concentra en las zonas exteriores, éstas se alargan de modo directo, mientras que el centro de la extrusión no se deforma directamente sino que lo arrastra el material de la superficie. Esto genera esfuerzos de tensión secundarios en el núcleo, el cual finalmente sufre una *fractura en punta de flecha* característica (también se describe como *defecto de estallido central*, Fig. 9-33*b*). El peligro es mayor cuando $h/L \geq 2$. La situación se puede remediar disminuyendo la razón h/L, lo cual implica un semiángulo α de la matriz menor o una reducción más grande; de esta manera h menor y L mayor (Fig. 9-33*c*). Con un componente de geometría fija,

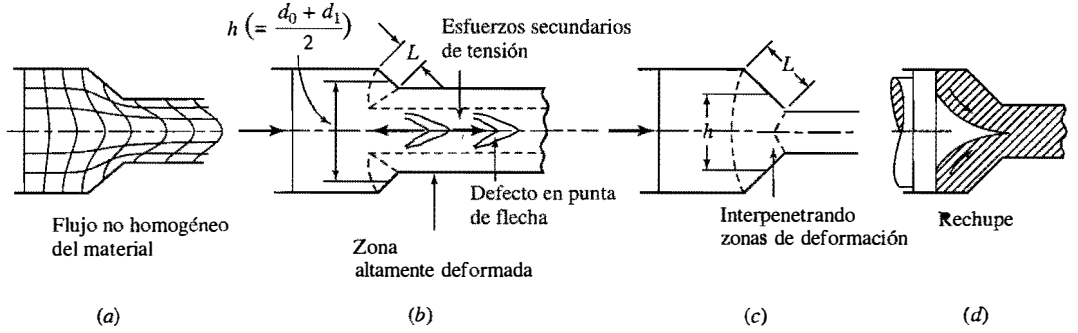


Figura 9-33 La deformación no homogénea en la extrusión resulta en (a) la aceleración del centro y, si el material tiene ductilidad limitada, puede conducir a (b) defectos internos (en punta de flecha) en razones h/L elevadas. (c) El desarrollo de presión hidrostática asegura un buen producto en razones h/L bajas. (d) Un rechupe se forma si la extrusión se lleva demasiado lejos.

ninguna de estas soluciones es permisible; entonces, la única esperanza es el uso de un material más dúctil. Los defectos de estallido central son en particular problemáticos cuando sólo ocurren de manera periódica, afectando la integridad de un número desconocido de piezas. En circunstancias muy especiales, el estado compresivo de esfuerzos se mantiene, incluso en razones de extrusión críticamente bajas, al extruir en un espacio presurizado, un proceso que suele describirse como *extrusión contra la contrapresión* (no se debe confundir con la extrusión hidrostática).

2. En la extrusión en caliente, el calor que se genera durante el proceso puede causar que la temperatura de la pieza de trabajo se eleve [ecuación (9-5)] por arriba de la temperatura solidus del material. La fragilidad en caliente entonces conduce a la aparición de grietas superficiales circunferenciales (*agrietamiento por velocidad*), las cuales se pueden eliminar aminorando la rapidez de la prensa, reduciendo de esta manera la tasa de deformación y la rapidez de la generación del calor (pero también perdiendo producción).

3. Cuando la carrera de extrusión se lleva demasiado lejos, el flujo no homogéneo del material conduce a la generación de un *rechupe* concéntrico (Fig. 9-33*d*).

4. Cuando hay huellas de lubricante en la extrusión no lubricada, o la lubricación se descompone en extrusión lubricada de manera que se forma una zona parcial de metal muerto, el lubricante atrapado en la frontera de dicha zona se extruye en el producto para formar *defectos subsuperficiales*. Con el calentamiento subsecuente, los gases causan ampollamiento en estas localizaciones.

9-5 EQUIPO DE FORJADO Y DE EXTRUSIÓN

El forjado y la extrusión son procesos estrechamente relacionados. Algunas veces es difícil distinguirlos (por ejemplo, punzonar un recipiente en comparación con su extrusión trasera); en otras ocasiones se combina un proceso característico de forja con la

extrusión (por ejemplo, al hacer un perno extruyendo el cuerpo y luego recalcando la cabeza). También comparten muchos tipos de herramientas y equipo.

9-5-1 Herramientas y matrices

Los procesos de deformación volumétrica se caracterizan por presiones elevadas en la interfaz y, en el trabajo en caliente, también por temperaturas elevadas. Los *materiales de las herramientas y de las matrices* se seleccionan y manufacturan con el mayor cuidado. En general, la ductilidad se sacrifica en las matrices de trabajo en frío, pero se debe concertar un compromiso entre la dureza y la ductilidad para las matrices de trabajo en caliente que también están expuestas al impacto térmico (tabla 9-3).

Al calcular las presiones de forjado y de extrusión, el esfuerzo de fluencia relevante fue σ_f porque el material de la pieza de trabajo tenía que deformarse. En contraste, las presiones en la interfaz se deben mantener lo suficientemente bajas para no causar ninguna deformación permanente de la matriz. Por lo tanto, dependiendo del modo de carga, las presiones no deben exceder una fracción segura (o en la indentación, un múltiplo) del límite elástico $\sigma_{0.2}$ del material de la matriz. A partir de los valores HRC proporcionados en la tabla 9-3, la resistencia a la tensión se puede estimar como sigue:

HRC	TS, MPa	TS, kpsi
30	960	140
40	1 250	185
50	1 700	250
60	2 400	350

Con un margen de seguridad, 80% de los valores arriba mostrados se pueden tomar como $\sigma_{0.2}$. El esfuerzo permisible depende de las configuraciones relativas de la herramienta y de la pieza de trabajo, así que pueden estimarse las presiones permisibles de la matriz *considerando la herramienta como una pieza de trabajo*, cuya deformación debe evitarse.

1. Punzón largo (Fig. 9-34*a*). Una palanquilla cilíndrica se alabea cuando la razón l/d es demasiado grande, así sucede con un punzón. La fórmula de Euler es pertinente para los punzones muy grandes; para los cortos, más usuales en el trabajo de metales, la fórmula de Johnson resulta adecuada:

$$p \leq \sigma_{0.2}\left[1 - \frac{4\sigma_{0.2}}{\pi^2 E}\left(\frac{L_p}{D_p}\right)^2\right] \qquad \textbf{(9-29)}$$

donde L_p es la longitud del punzón, D_p su diámetro y E es el módulo de Young para el material del punzón (210 GPa para el acero, 350 GPa para el carburo de tungsteno).

2. Punzón corto (Fig. 9-34*b*). Es igual al recalcado axial de un cilindro y $p = \sigma_{0.2}$. Los punzones de acero están limitados a aproximadamente 1 200 MPa en compresión

Tabla 9-3 Materiales típicos de matrices para procesos de deformación*

	Material de la matriz† y dureza HRC para el trabajo			
Proceso	**Aleaciones de Al, Mg y Cu**		**Aceros y aleaciones de Ni**	
Forjado en caliente	6G	32-40	6G	35-45
	H12	48-50	H12	40-56
Extrusión en caliente	H12	46-50	H12	43-47
Extrusión en frío				
Matriz	W1, A2	56-58	A2, D2	58-60
	D2	58-60	WC	
Punzón	A2, D2	58-60	A2, M2	62-65
Estirado de formas	O1	55-65	O1, M2	55-65
	WC		WC	
Laminado en frío	O1	55-65	O1, M2	55-65
Blanqueado	W1	62-66	Igual que para Al, y	
	O1, A2	57-62	M2	60-66
	D2	58-64	WC	
Embutido profundo	Aleación de Zn		Igual que para Al, y	
	W1	60-62	M2	60-65
	O1, A2	57-62	WC	
	D2	58-64		
Formado en prensa	Epóxico/polvo metálico		Igual que para Al	
	Aleación de Zn			
	Acero dulce, hierro fundido			
	O1, A2, D2			

* Compilado del *ASM Handbook, vol. 2*, ASM International, Materials Park, Ohio, 1991.
† Los materiales de la matriz que se mencionan primero son para trabajos más ligeros, corridas más cortas.
Composiciones del acero de herramienta, porcentaje:
G6 (acero preendurecido para matrices): 0.5C-0.8Mn-0.25Si-1Cr-0.25Mo-0.1V
H12 (acero para matrices trabajado en caliente): 0.35C-5Cr-1.5Mo-1.5W-0.4V
W1 (acero endurecido por agua): 0.6-1.4C
O1 (acero endurecido por aceite): 0.9C-1Mn-0.5Cr
A2 (acero endurecido por aire): 1C-5Cr-1Mo
D2 (acero para matriz trabajado en frío): 1.5C-12Cr-1Mo
M2 (acero al Mo de alta velocidad): 0.85C-4Cr-5Mo-6.25W-2V
WC (carburo de tungsteno)

simple. Algunos punzones de WC cementados con cobalto operan a presiones hasta de 3 300 MPa.

3. Platina plana (Fig. 9-34*c*). Cuando una matriz plana es mayor que la pieza de trabajo, ésta se convierte, en efecto, en un punzón. Así, por analogía con el punzonado (Secc. 9-2-3)

Cuando $D > 3d$ en la platina, $p = 3\sigma_{0.2}$ [ecuación (9-13)]

Cuando la placa es más pequeña, $p = \sigma_{0.2}(D/d)$ [ecuación (9-15)]

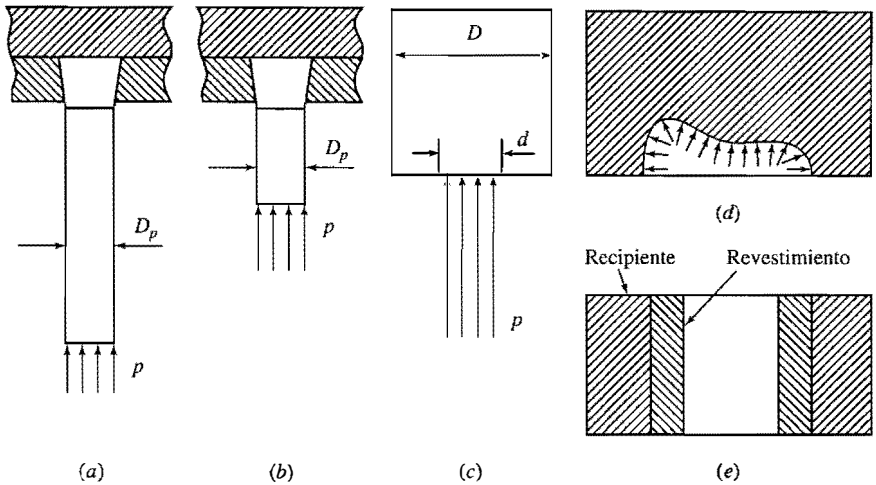


Figura 9-34 Las herramientas y las matrices fallan por varios mecanismos: (*a*) los punzones largos por pandeo; (*b*) los punzones cortos por recalcado; (*c*) las platinas planas por indentación; las cavidades de la (*e*) matriz o del (*e*) recipiente por presión interna.

4. Cavidad (Fig. 9-34*d*). Éste es un caso mucho más delicado que el de la matriz plana, porque la pieza de trabajo desarrolla una presión interna, la cual puede reventar la matriz. Esto también es cierto para los recipientes de extrusión. El diseño de recipientes es un tema especializado; como una guía muy burda, $p = \sigma_{0.2}/2$ cuando $D \geq 3d$. De esta manera, un recipiente de una sola pieza hecho de acero de matriz de alta resistencia puede soportar una presión de hasta 1 000 MPa. La parte interna del recipiente (*revestimiento*) se puede ensamblar por encogimiento (Fig. 9-34*e*) dentro de un anillo exterior mayor (*recipiente*) o puede envolverse con una banda de acero o con alambre bajo tensión elevada. Así la superficie interior del recipiente está en compresión y puede soportar hasta 1 700 MPa de presión interna. Las construcciones especiales permiten presiones de hasta 2 700 MPa.

Las matrices se terminan con una rugosidad superficial específica, que se controla con una rugosidad aleatoria para el trabajo en caliente con lubricantes sólidos, y por lo general con un acabado altamente pulido para el trabajo en frío con lubricantes líquidos o de tipo de jabón. En la actualidad muchas matrices se tratan superficialmente para mejorar su resistencia al desgaste (Cap. 19).

Todas las herramientas altamente esforzadas se deben rodear con un blindaje pesado porque una parte de la matriz fracturada se convierte en un proyectil mortal.

Ejemplo 9-15

En el ejemplo 9-5 se determinó una presión en la matriz de 2 845 N/mm² para el aplanamiento lubricado de un pasador de acero inoxidable. ¿Es permisible esa presión tan elevada para una matriz de acero para herramienta?

La presión excede el límite elástico de los mejores aceros. Sin embargo, si la matriz está hecha con un ancho al menos de 3(21.1) = 64 mm, su parte no cargada proporcionará el soporte

(Fig. 9-34*c*), así una herramienta de HRC 60 será segura. Después de forjar varios miles de partes, a la larga se puede desarrollar una indentación.

Ejemplo 9-16

En el ejemplo 9-7 se determinó una presión de 1 200 N/mm² que actúa sobre la herramienta usada para estrechar el pasador. ¿Es permisible esta presión?

Si la herramienta se fabrica en forma de un punzón corto (o una extensión corta se aplica sobre un punzón más grande pero también más ancho), estará segura (porque se carga como un punzón corto, Fig. 9-34*b*).

9-5-2 Martinetes

Los *martinetes* son dispositivos de impacto limitado por la energía, en los cuales una masa (el ariete) se acelera por gravedad y/o por aire comprimido, gas, vapor o fluido hidráulico (Fig. 9-35*a*). Para una masa M del ariete y una velocidad de impacto v la energía del martinete E_h es

$$E_h = \frac{Mv^2}{2} = \frac{Wv^2}{2g} \tag{9-30}$$

donde W es el peso del ariete y g la aceleración gravitatoria. La velocidad de choque v se incrementa con la carrera (altura de caída) H_d y la aceleración ξ

$$v^2 = 2\xi\ H_d = 2H_d\left(g + \frac{Ap_m}{M}\right) \tag{9-31}$$

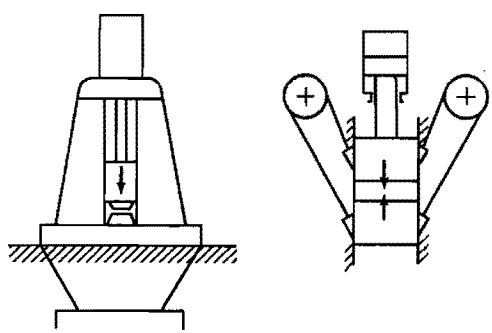


Figura 9-35 La fuerza y la energía de deformación se pueden suministrar por medio de dispositivos de impacto como (a) martinetes o (*b*) martinetes de contragolpe. [*Según J.A. Schey, como Fig. 9-30, p. 1474. Se reproduce con autorización.*]

donde A es el área de la sección transversal del émbolo de impulso, p_m la presión media indicada del medio presurizado y M la masa acelerada. Los martinetes están disponibles en un gran intervalo de tamaños (tabla 9-4) y con controles cada vez más complejos para dosificar la energía por golpe.

La energía de impacto la absorbe principalmente la energía E requerida para deformar la pieza de trabajo [Fig. 9-5 y ecuación (9-20)]. Sin embargo, parte de la energía se transmite a la matriz, a los cimientos, al suelo y también a los componentes del martinete, provocando ondas de choque en el aire y el suelo. La vibración de éste y el ruido resultan desagradables y reducen la eficiencia de la forja. La energía total del martinete E_h que se debe suministrar es

$$E_h = \frac{E}{\eta} \qquad \textbf{(9-32a)}$$

donde E es la energía que se requiere para la forja (Fig. 9-5) y la eficiencia es

Tabla 9-4 Características de martinetes y las prensas*

Tipo de equipo	Masa del ariete, kg (o energía)	Fuerza,† kN	Velocidad, m/s	Golpes/ min	Carrera, m	Área de la cama, m × m	Eficiencia mecánica
Martinetes							
Mecánico	30-5 000		4-5	350-35	0.1-1.6	0.1 × 0.1 a 0.4 × 0.6	0.2-0.5
Vapor y aire	75-17 000		3-8	300-20	0.1-1.2	0.3 × 0.4 a 1.2 × 1.8	0.05-0.5
Contragolpe	(5-1 000 kN · m)		3-5	60-7		1.8 × 5	0.2-0.7
HERF	(15-750 kN · m)		8-20	< 2			0.2-0.6
Prensas hidráulicas							
Forjado		100-80 000 (800 000)	< 0.5	30-5	0.3-1	0.5 × 0.5 a 3.5 × 8	0.1-0.7
Trabajo de lámina		10-40 000	< 0.5	130-220	0.1-1	0.2 × 0.2 a 2 × 6	0.5-0.7
Extrusión		1 000-50 000 (200 000)	< 0.5	2	0.8-5	0.06 a 0.6 diá. del recipiente	0.5-0.7
Prensas mecánicas							
Forjado		10-80 000	< 0.5	130-10	0.1-1	0.2 × 0.2 a 2 × 3	0.2-0.7
Trabajo de lámina		10-40 000	< 1	180-10	0.1-0.8	0.2 × 0.2 a 2 × 6	0.3-0.7
Recalcador horizontal		500-30 000 (25-230 mm diá.)	< 1	90-15	0.05-0.4	0.2 × 0.2 a 0.8 × 1.2	0.2-0.7
Tornillo		100-80 000	< 1	35-6	0.2-0.8	0.2 × 0.3 a 0.8 × 1	0.2-0.7

* De varias fuentes, incluidos A. Geleji, *Forge Equipment, Rolling Mills and Accessories*, Akademiai Kiado, Budapest, 1967.

† Divida el número entre ~10 para obtener toneladas fuerza. Los números entre paréntesis indican los tamaños más grandes, disponibles sólo en algunos lugares en el mundo.

$$\eta = 0.9\left[1-\left(\frac{P}{10^3 Mg}\right)\right] \qquad \textbf{(9-32b)}$$

si P está en newtons y M es la masa del ariete en kilogramos. El impacto al suelo se evita en los *martinetes de contragolpe* (Fig. 9-35*b*).

Las velocidades elevadas de impacto y los tiempos cortos de contacto minimizan el enfriamiento; por lo tanto, los martinetes se usan sobre todo para la forja por matriz abierta y por matriz de impresión de formas intrincadas. Excepto en los martinetes de contragolpe y los martinetes de *velocidad de alta energía* (HERF, que se impulsan por presión de gas), la forja se produce por medio de varios golpes en cualquiera de las cavidades de la matriz; así la energía total requerida [ecuación (9-20)] puede suministrarla un martinete relativamente pequeño. Sin embargo, la forja por martinete requiere una habilidad considerable del operador y es menos adecuada para materiales de sensibilidad elevada a la tasa de deformación.

9-5-3 Prensas

Las prensas se propulsan mecánica o hidráulicamente.

Las *prensas hidráulicas* (Fig. 9-36*a*) se atascan cuando alcanzan su límite de carga y se pueden usar con matrices que hacen contacto (*besan*) al final de la carrera. Las prensas hidráulicas son en particular adecuadas para la forja isotérmica, donde se requiere una tasa de deformación muy baja.

Las *prensas mecánicas* son de varios tipos de construcción (en la Fig. 9-36*b* y *c* se muestran dos ejemplos). Tienen una carrera prefija y desarrollan una fuerza infinita al

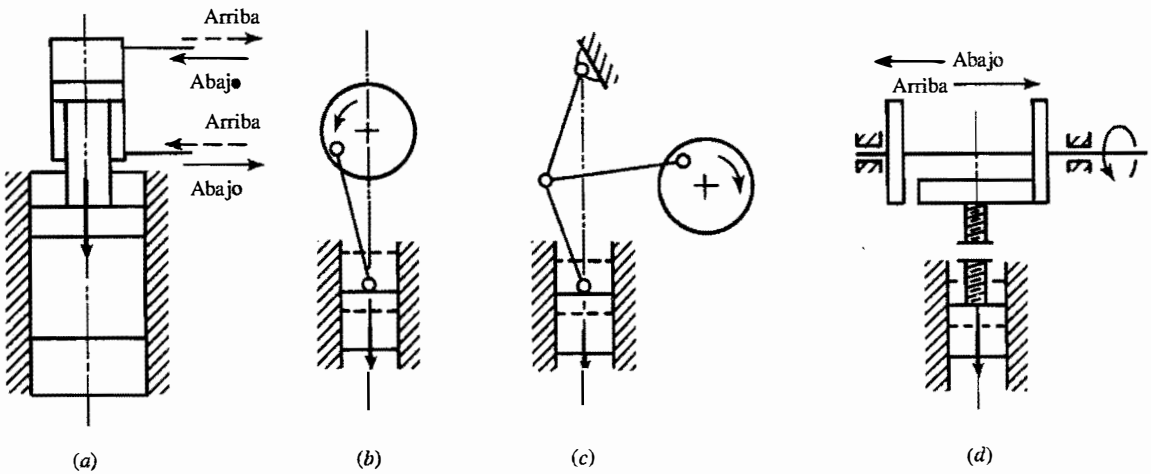


Figura 9-36 Las prensas pueden ser (*a*) hidráulicas limitadas por fuerza o mecánicas limitadas por carrera tales como (*b*) de cigüeñal, (*c*) de rodillera o (*d*) prensas de tornillo. [*Según J.A. Schey, como Fig. 9-30, pp. 1475-1476. Se reproduce con autorización.*]

final de ella. Por lo tanto, en el forjado en matriz cerrada verdadera, ésta debe permitir el escape de material en exceso, o se debe fijar con extremo cuidado su separación. Al configurar la prensa, se debe tomar en cuenta la extensión elástica del bastidor, como se analizó en la sección 4-1-2. Las constantes de resorte de las prensas rara vez exceden 4 MN/mm; de esta manera, se debe fijar una prensa sometida a una fuerza de 20 MN, en la condición sin carga, 5 mm más cerca que la dimensión final deseada con carga. Debido a las velocidades menores y a los tiempos de contacto mayores, las piezas de trabajo se deben preformar de manera cuidadosa si se van a fabricar partes complejas a través del forjado en caliente en prensa.

Las *prensas de tornillo* (Fig. 9-36*d*) reducen la marcha a medida que la energía almacenada se agota en el golpe, de ahí que sus características estén entre las de las prensas mecánicas y los de los martinetes.

Como regla básica, un martinete equipado con un ariete de 1 Mg puede hacer el trabajo de una prensa de 10 MN (ariete de 1 ton y prensa de 1 000 tonf), porque suministra la energía total requerida en varios golpes. En la tabla 9-4 se proporciona información sobre el equipo usual.

Las *prensas de arietes múltiples* y los manipuladores asociados a ellas se pueden controlar por computadora para formar el núcleo de un sistema flexible de forjado.

Los *recalcadores horizontales* para el trabajo en caliente y en frío y los *cabeceadores fríos* para el trabajo en frío componen una clase especial de prensas. Ambos empiezan con tramos rectos de barra o de alambre. Para los cabeceadores fríos el material se alimenta mediante rodillos posicionadores de agarre, algunas veces a través de un enderezador de rodillos múltiples o incluso de una matriz de estirado que suministra una barra de tolerancias cerradas. El extremo de la barra o del alambre se deforma en pasos sucesivos que varían desde el recalcado simple hasta la operación más compleja combinada de forjado-extrusión. Los movimientos auxiliares se sincronizan con el del ariete principal y se emplean para abrir y cerrar las matrices de mordaza de sujeción, accionar los punzones auxiliares y las matrices de corte y transferir la pieza de trabajo de una cavidad de la matriz a otra. El material de la pieza de trabajo se corta de la barra o del alambre, ya sea al inicio o al final de la secuencia, y las piezas pueden ir a través de toda la secuencia de la matriz o bien puede tenerse una pieza en cada paso de la matriz durante cada carrera. En las figuras 9-21 y 9-23 se proporcionan ejemplos de las secuencias de recalcado en frío y en caliente, y en la 9-37 se muestra uno de la extrusión en frío. La construcción y mecanización de estas máquinas con frecuencia son muy ingeniosas, pero su rapidez de producción es difícil de igualar con otras técnicas.

Ejemplo 9-17

Estime el tamaño de la prensa o del martinete que se necesita para fabricar la pieza del ejemplo 9-3.

El tamaño de la prensa está dado por la carga máxima; note que esta pieza relativamente pequeña requiere una prensa de 4 600 kN (520 tonf) debido a la razón d/h elevada. El enfriamiento incrementa aún más el requerimiento de fuerza.

La estimación del tamaño del martinete es más difícil porque la velocidad varía de un valor elevado en el impacto a cero al final de la carrera. Sin embargo, este acero en particular no es sensible a la tasa de deformación ($m = 0.13$), y la alta tasa de deformación en realidad incrementará la temperatura de la pieza de trabajo, de manera que el cálculo del requerimiento de energía no será muy impreciso.

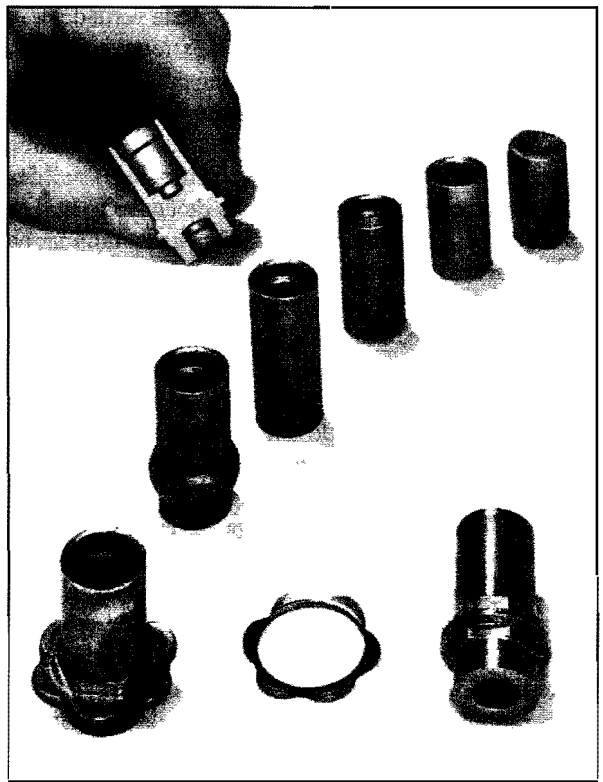


Figura 9-37 Una secuencia típica de forja en frío en un formador en frío de siete estaciones, que produce conectores para manguera por medio de la extrusión hacia delante y hacia atrás y por forja, a una rapidez de 160 por minuto. (*Cortesía de la National Machinery Co., Tiffin, Ohio.*)

Si la velocidad de choque de la ecuación (9-31) es, digamos, 6 m/s, entonces la energía disponible es, de la ecuación (9-30):

Masa del ariete, kg	Energía, N · m
500	9 000
1 000	18 000
1 500	27 000
2 000	36 000
4 000	72 000

Para fabricar la pieza de un solo golpe, hasta un martinete de 2 000 kg sería suficiente. Tal vez para mayor economía, se podría utilizar un martinete de 1 000 kg para suministrar varios golpes.

9-6 ESTIRADO

Muchos componentes de sección transversal uniforme se pueden producir no sólo por extrusión, sino también por *estirado*. En vez de ser empujado, ahora el material se *afila* (su extremo se reduce, usualmente por estampado) y luego se jala a través de una matriz estacionaria de sección transversal que disminuye en forma gradual. La mayor parte del *alambre* es de sección transversal circular, pero también se trefilan los alambres de sección cuadrada, rectangular y conformados (*perfiles*). Además de las aplicaciones directas, como en la conducción de electricidad, el alambre es el material de partida para muchos productos, incluyendo las estructuras de marcos de alambre (desde ganchos para ropa hasta carros de supermercado), clavos, tornillos y pernos, remaches, cercas de alambres, etc.

Los *tubos sin costura* se hacen por medio de una variedad de técnicas de trabajo en caliente, pero por debajo de un tamaño mínimo se deben reducir aún más en frío. Una de las opciones es estirarlos, de modo que esos tubos estirados en frío realizan funciones importantes en sistemas hidráulicos de vehículos, aeroplanos, barcos, maquinaria industrial, sistemas de distribución de agua y en aplicaciones como agujas hipodérmicas.

9-6-1 Proceso de estirado

El material se deforma en compresión, pero la fuerza de deformación ahora se suministra jalando el extremo deformado del alambre (Fig. 9-38*a*). Por lo tanto, es común decir que el modo de deformación es el de *compresión indirecta.*

Las *matrices* estacionarias *de estirado* están hechas de acero para herramientas, de WC cementado, o para diámetros pequeños, de diamante. El alambre se afila, por lo general mediante estampado (Fig. 9-24), se alimenta a través de la matriz y se trefila en un tambor (*bloque macho*, Fig. 9-38*c*). Se verá (Secc. 9-6-3) que el rompimiento del alambre fija un límite a la reducción obtenible y que se realizan varias reducciones sucesivas. La tarea se acelera con *máquinas múltiples para trefilado múltiples*, en las que el alambre se pasa a través de distintas matrices (Fig. 9-38*d*). La invariabilidad del volumen se aplica de nuevo y se impulsan tambores individuales a velocidades cada vez más elevadas para compensar la reducción del área. La velocidad de los motores individuales se controla para proporcionar la tensión adecuada para el trefilado; en máquinas antiguas, los tambores se sobreimpulsan de manera que el alambre se desliza sobre el tambor y la fricción desarrolla la fuerza de trefilado. La matriz puede reemplazarse por dos, tres o cuatro *rodillos guía*, todos con sus ejes en un plano común. Una *cabeza de Turco* contiene cuatro rodillos con posiciones ajustables.

Los tubos sin costura algunas veces se estiran simplemente a través de matrices de estirado, ya sea para reducir su diámetro (*entallamiento*, Fig. 9-39*a*) o para cambiar su forma (digamos, de redonda a cuadrada). Si el espesor de su pared se va a reducir, también se necesita una matriz interna, la cual puede ser de tres clases: un *tapón* corto y cónico sujeto por una barra larga desde el extremo alejado (Fig. 9-39*d*); un tapón conformado para permanecer en la zona de deformación (*tapón flotante*, Fig. 9-39*c*); o una *barra* de longitud completa de acero de herramienta (Fig. 9-39*d*).

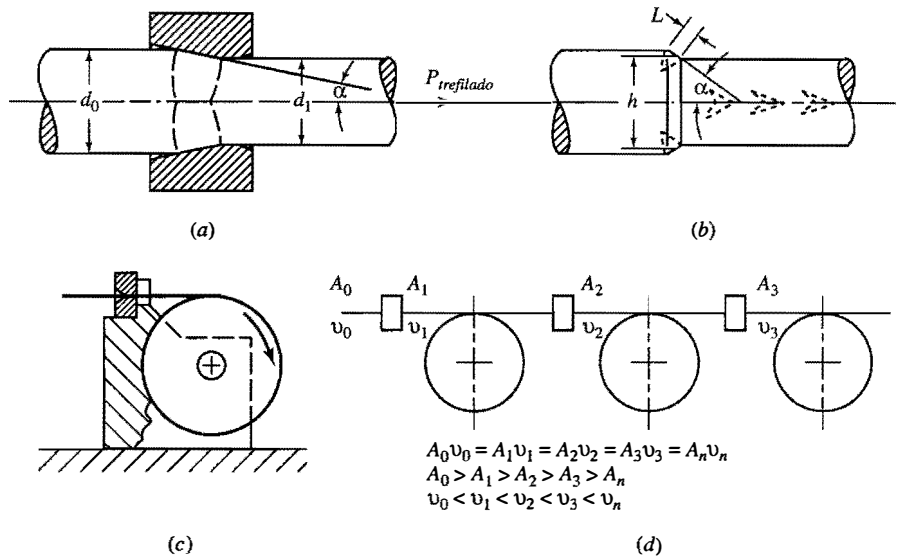


Figura 9-38 (*a*) La deformación en el trefilado de alambre ocurre bajo la compresión indirecta desarrollada por una matriz cónica. (*b*) Las razones h/L elevadas pueden conducir al estallido central en materiales de ductilidad limitada. El alambre se puede trefilar en (*c*) un bloque macho o, para mayor productividad, (*d*) en una máquina de trefilado de alambre con matrices múltiples.

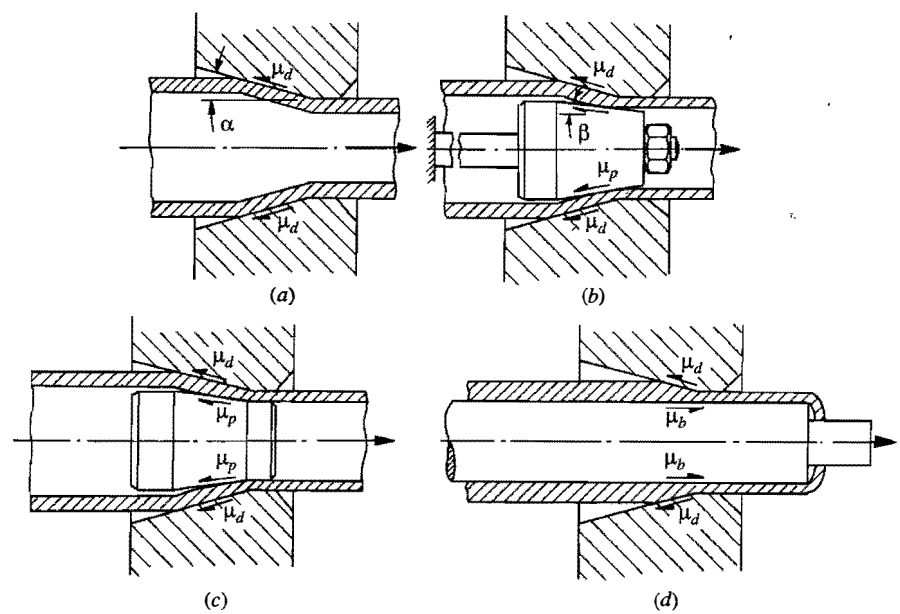


Figura 9-39 Los tubos sin costura se estiran: (a) por entallado, (*b*) con un tapón, (*c*) con un tapón flotante, (*d*) con una barra. Las medias flechas indican esfuerzos de fricción. [*J.A. Schey, Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication and Wear, ASM International, 1983, p. 353. Se reproduce con autorización.*]

Los procesos de trefilado son muy productivos porque tienen velocidades de hasta 50 m/s en el alambre delgado. Las velocidades mucho más lentas, de cerca de 1 m/s, son comunes al estirar barras más pesadas en longitudes rectas en *mesas de estirado*. Las secciones que no se pueden doblar alrededor del tambor de un bloque macho también se estiran en longitudes rectas, en mesas de estirado a velocidades bajas, y debido a la operación del tipo del lote, la rapidez de producción se reduce.

9-6-2 Fuerzas

Con algunas excepciones especiales, el alambre y el tubo se estiran en frío. Los pasos iniciales para calcular la fuerza de estirado siguen la misma rutina de los cálculos de extrusión (Secc. 9-4-4). Aquí también, se usa la deformación de ingeniería [paso 3, ecuación (9-21)] para propósitos de conversión, pero la deformación natural [paso 4, ecuación (9-23)] es relevante para los cálculos. El estirado es un proceso de estado estable, por lo tanto, de nuevo se necesita σ_{fm} [ecuación (9-1)] en el paso 6.

En el paso 7 se deben considerar los efectos de la fricción de la matriz y la no homogeneidad de la deformación:

$$\sigma_{\text{salida}} = \sigma_{fm} Q_{fr} \phi \varepsilon \tag{9-33}$$

donde

$$Q_{fr} = (1 + \mu \cot \alpha) \tag{9-34a}$$

En ésta, μ es el coeficiente de fricción entre la pieza de trabajo y la matriz, y α es el semiángulo de la matriz de estirado (9-38*a*). Por las razones analizadas en las secciones 8-2-5 y 9-4-5, la no homogeneidad de la deformación requiere trabajo extra (redundante), el cual es una función de la razón h/L. Para el trefilado de alambre de sección transversal circular, h se toma como el diámetro medio, L es la longitud de la zona de contacto (Fig. 9-38*b*) y el factor de no homogeneidad (trabajo redundante) es

$$\phi = 0.88 + 0.12\frac{h}{L} \quad (\geq 1) \tag{9-34b}$$

Para la deformación plana (por ejemplo, en el conformado de una sección transversal rectangular), el factor es

$$\phi = 0.8 + 0.12\frac{h}{L} \quad (\geq 1) \tag{9-34c}$$

En el paso 8, la fuerza de estirado es

$$P_{\text{estirado}} = \sigma_{\text{salida}} A_1 \tag{9-35}$$

La potencia que se requiere para el estirado se obtiene de la definición de potencia

$$\text{Potencia} = P_{\text{estirado}} v \tag{9-36}$$

A altas velocidades, la energía de entrada es grande y el calentamiento es significativo; de aquí que, el lubricante debe enfriar con eficacia. Los alambres finos con frecuencia se trefilan sumergidos por completo en un baño.

9-6-3 Capacidades del proceso y aspectos del diseño

1. El estirado es muy limitado en la variedad de formas producidas, pero se compensa en el costo bajo de las matrices y en la alta productividad (tabla 9-1). El límite superior del tamaño se determina por la capacidad del equipo. Las tolerancias son muy altas (Fig. 3-22) si se controla el desgaste de la matriz.

2. Un límite para la reducción obtenible está impuesto por el rompimiento del producto estirado. La fuerza de trefilado [ecuación (9-35)] no debe exceder la resistencia del alambre trefilado, la cual se puede calcular a partir del límite elástico $\sigma_{0.2}$ (si no se conoce, se puede tomar como 80% del esfuerzo de fluencia en la salida de la matriz):

$$P_{\text{trefilado}} < \sigma_{0.2} A_1 \quad \text{o} \quad P_{\text{trefilado}} < 0.8 \left(K\varepsilon_{\text{total}}^{n}\right) A_1 \qquad \textbf{(9-37)}$$

La reducción máxima es por lo general menor al 50% (calculada como la *reducción del área*, no del diámetro). El rompimiento frecuente del alambre limitaría demasiado la productividad, ya que el extremo del alambre se debe reducir (*afilar*) de nuevo de manera que se pueda volver a enhebrar. Es más rentable limitar las reducciones a menos del 30% por matriz (a menudo hasta 20% por matriz en el trefilado por matrices múltiples). Como se ve en la ecuación (9-34*a*), la fricción eleva el esfuerzo de trefilado y limita la reducción; por lo tanto, son esenciales las buenas prácticas de lubricación (tabla 8-4).

3. Una segunda limitación se origina de la posible no uniformidad de deformación. Al igual que en la extrusión (Secc. 9-4-5), la profundidad de la zona de compresión quizá no sea suficiente para asegurar la deformación homogénea. De nuevo esto está gobernado por la razón h/L: cuando $h/L > 2$, los esfuerzos secundarios de tensión tal vez causen el defecto de punta de flecha (estallido central) típico en los materiales menos dúctiles (Fig. 9-38*b*), sobre todo ahora que el esfuerzo axial es de tensión.

4. Los esfuerzos secundarios de tensión también surgen cuando la deformación se limita a una parte de una sección. Este hecho se analiza con más detalle en la laminación de formas (Secc. 9-7-2). Es suficiente decir que el agrietamiento de las secciones estiradas puede ocurrir cuando una parte de la sección transversal no se somete de manera directa a la deformación.

Ejemplo 9-18

Un alambre formado se trefila de un alambre recocido de acero inoxidable 302, de 3 mm de diámetro. El área de la sección transversal de la forma es 5.0 mm^2. Se usa un lubricante comercial con base de aceite (de la tabla 8-4, $\mu = 0.05$), las matrices tienen un ángulo incluido de 12° y la velocidad de trefilado es 2 m/s. Calcule la fuerza de trefilado y la potencia que se requiere. Prepare una hoja de cálculo; para un uso más general, permita trefilados múltiples. Para obtener la corrección de la no homogeneidad de la deformación, se puede hacer una aproximación de la

sección formada a través de una sección transversal circular de diámetro equivalente, ecuación (9-2*c*): $d_1 = 2.52$ mm. De la geometría de una matriz cónica,

$$L = (d_0 - d_1)/2 \text{ sen } \alpha = 2.28 \text{ mm}$$

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
Acero inoxidable 302 en frío																		
Esfuerzo de fluencia			K=	1 300	MPa	n=	0.3											
Pasada	mu	alfa	v	d	A	ec	épsilon	épsilon	sigma fm	h	L	h/L	phi	Qfr	salida	P estirado	P segura	pote
Núm.		grados	m/s	mm	mm^2		pasada	total	N/mm^2	mm	mm				N/mm^2	N	N	kW
						Ec. (9-21)	Ec. (9-23)		Ec. (9-1)				Ec. (9-34b)	Ec. (9-34a)	Ec. (9-33)	Ec. (9-35)	Ec. (9-37)	Ec. (9-36)
0				3	7.069			0										
1	0.05	6	2	2.52	5.000	0.293	0.346	0.34	727.5	2.7	2.28	1.2	1.0252	1.476	381.1	1 905	3 783	3.81

Siempre es necesario verificar si el trefilado es posible. Las columnas Q y R indican que sí lo es.

Ejemplo 9-19

Algunas llantas radiales con cinturón de acero para automóvil están hechas con alambre de acero con 0.8% C, patentado y trefilado pesadamente en frío hasta un diámetro de 0.25 mm. Rodeadas por la matriz de ferrita, las laminillas muy finas de carburo son capaces de deformación, pero la ductilidad del alambre aún está limitada. Después de recubrir el alambre con latón para la adhesión del caucho, se da un trefilado final antes de tejer el cinturón. Algunas llantas habían sufrido falla prematura en la pista de pruebas. El alambre recuperado de ellas presentó una fractura ocasional del tipo de taza y cono. El problema se atribuyó al acero, puesto que no se tomó en cuenta la no homogeneidad al trefilar un alambre tan fino. La investigación demostró que la reducción final fue de un diámetro de 0.27 a 0.25 mm, en matrices con semiángulo de 6°. Compruebe si la deformación fue no homogénea.

$$h = (0.27 + 0.25)/2 = 0.26 \text{ mm}; \quad L = (0.27 - 0.25)/2 \text{ sen } \alpha = 0.0957; \quad h/L = 2.72$$

así, la deformación fue no homogénea. *Solución*: incrementar la reducción o disminuir el ángulo de la matriz.

9-7 LAMINADO

De todos los procesos de deformación volumétrica, la *laminación* ocupa la posición más importante. Más de 90% de todos los materiales que alguna vez se deforman se someten a la laminación (véase la tabla 8-1).

9-7-1 Laminado plano

Al proceso de reducir el espesor de una plancha para producir un producto más delgado y largo, pero sólo ligeramente más ancho comúnmente se denomina *laminado plano*. Es el proceso primario más importante de deformación.

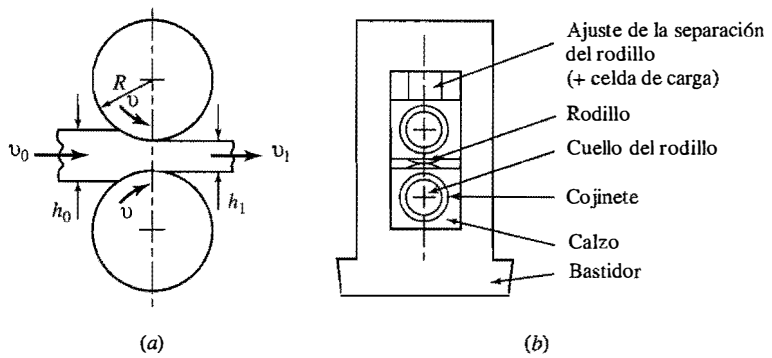


Figura 9-40 La laminación es un proceso en estado estable que (a) reduce el espesor de la pieza de trabajo (*b*) en molinos de rodillos de rigidez considerable.

El proceso de laminado El proceso de laminado plano parece engañosamente simple (Fig. 9-40*a*). Dos rodillos cilíndricos impulsados (*rodillos de trabajo*) reducen la pieza plana de trabajo a un calibre más delgado. Los rodillos se soportan en bastidores y su separación se puede ajustar por medios mecánicos o hidráulicos (Fig. 9-40*b*). La deflexión elástica de los rodillos crearía problemas en el calibre y en la forma; por lo tanto, se incorporan dos rodillos de soporte (*rodillos de apoyo*) en el bastidor de un *molino de laminación de cuatro rodillos* (Fig. 9-41*a*) y 18 más de apoyo en un *molino Sendzimir* (Fig. 9-41*b*). Casi siempre se realizan reducciones sucesivas. Cuando sólo se usa un molino, su sentido se invierte entre pasadas. Después de varias reducciones, la tira se hace muy larga y se enrolla en tambores de acumulación bajo tensión. Para mayor productividad, se colocan varios molinos en línea (*molinos en tándem* o *continuos*, Fig. 9-41*c*). Como se preserva la invariabilidad del volumen, el producto se acelera de bastidor a bastidor en proporción a la reducción de área.

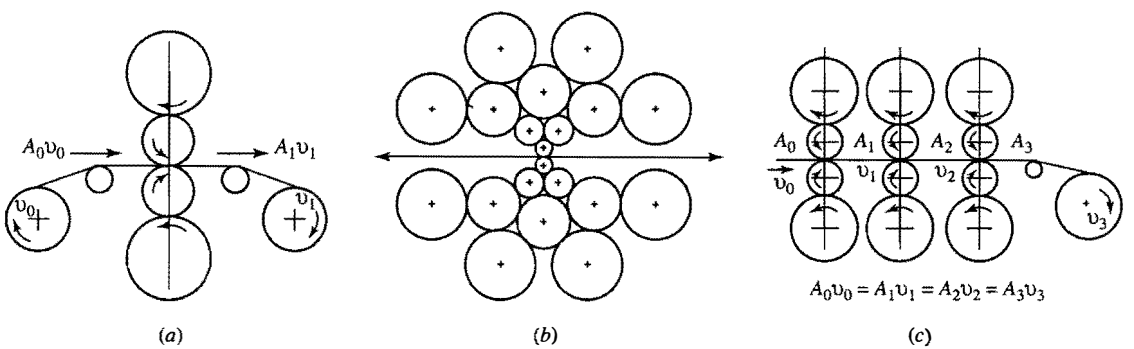


Figura 9-41 La fuerza del rodillo y su aplanamiento se reducen; la deflexión de los pequeños rodillos de trabajo se controla con rodillos de apoyo en (a) un molino cuádruple y (*b*) en molinos Sendzimir. Las reducciones sucesivas en (*c*) molinos en tándem incrementan la productividad en gran medida.

El producto terminado debe tener un espesor uniforme en longitud y ancho, una forma plana, un acabado superficial controlado y uniforme, y propiedades mecánicas reproducibles. La satisfacción de estos requisitos pone a prueba el ingenio del ingeniero de producción, del diseñador del equipo, del especialista de control y del teórico; además, convierte un proceso aparentemente simple en uno de los más complejos (¡considere mantener una tolerancia de ±0.002 mm en kilómetros de tiras de 0.04 mm de espesor mientras se lamina a una velocidad de 40 m/s!). Los modelos más o menos completos del proceso, incluyendo los que predicen la estructura y las propiedades metalúrgicas en el laminado en caliente, tardan mucho tiempo para correr en computadoras, así que los estudios sobre los efectos de los parámetros del proceso se realizan fuera de línea. Los controles en línea se basan en una teoría simplificada y pueden incorporar modelos empíricos basados en la experiencia. El laminado a velocidades elevadas, acoplado con un alto grado de automatización de lazo cerrado, proporciona un material inicial de alta calidad y de tolerancia cerrada para varios procesos secundarios de trabajo de lámina de metal a bajo costo.

Productos laminados planos La terminología del laminado distingue entre:

1. La *placa laminada en caliente*, de más de 6 mm de espesor y de 1 800 a 5 000 mm de ancho; se lamina en molinos reversibles grandes de dos o cuatro rodillos a partir de lingotes fundidos o de planchas gruesas (Secc. 7-5-2) con una masa de hasta 150 Mg (*150 ton métricas N.T.*). La alta deformación pesada asegura que la estructura fundida se destruya y que los defectos se solucionen. El acabado superficial es relativamente áspero y las tolerancias dimensionales no son muy altas (Fig. 3-22); no obstante, la plancha es un material inicial importante en la construcción de barcos, en la fabricación de calderas, en la construcción de edificios de muchos pisos y en la construcción industrial, así como en la manufactura de tubos y varias estructuras soldadas de máquinas.

2. La *lámina* o *banda plana laminada en caliente*, con un espesor usual de 0.8 a 6 mm y hasta 2 300 mm de ancho, se lamina en rodillos tándem. El material inicial a menudo es una plancha o tira fundida continuamente. Las longitudes grandes de lámina que provienen del molino de laminación se enrollan; los rollos pesan hasta 30 Mg (30 ton). La lámina laminada en caliente es un importante material inicial para el prensado en frío de partes estructurales de vehículos, equipo y maquinaria pesados, y también para fabricar tubos soldados.

3. La *lámina laminada en frío* (*tira*) se fabrica repitiendo el proceso en una banda laminada en caliente en molinos reversibles de cuatro rodillos o en molinos en tándem, con frecuencia a velocidades elevadas (hasta 30 m/s para el acero). La banda se puede recocer y su superficie se limpia (o se decapa, para remover la cascarilla residual del acero). De esta manera, la lámina laminada en frío tiene un calibre más delgado, mejor acabado superficial y tolerancias más cerradas (Fig. 3-22). También se enrolla la lámina en rollos, los cuales se pueden *cortar* en anchos más estrechos o en longitudes más cortas, o ambas, dependiendo de las instalaciones para manejo de las plantas de manufactura secundaria. Los acabados superficiales y las tolerancias estándares se proporcionan sin costo extra; sin embargo, también se pueden producir acabados controlados o excepcionalmente lisos, o tolerancias elevadas, a menudo a un precio un poco superior. El costo, por supuesto, se incrementa a medida que el calibre disminuye, sobre

todo si el calibre más delgado necesita pasadas extra a través de un molino de un solo bastidor o tándem. Grandes cantidades de acero se laminan hasta cerca de 0.7 mm para carrocerías de automóviles y cuerpos de artículos electrodomésticos, y hasta 0.15 mm para recipientes de alimentos y de bebidas (latas). El cobre se lamina en varios calibres para techos, contenedores, recipientes de cocina, y hasta 0.04 mm para el material de las aletas de los radiadores. La lámina de aleación de aluminio, de cerca de 1.0 mm de espesor, se usa mucho en fuselajes de aeronaves, en componentes automotores y en la construcción de remolques. La hoja de aluminio se enrolla hasta un calibre de 8 μm, a velocidades de hasta 60 m/s, y se emplea en grandes cantidades para empaque. Las hojas de espesores hasta de 3 μm se producen en molinos especiales (entre ellos, los Sendzimir) en todos los materiales.

9-7-2 Laminado de formas

El laminado de formas tiene una larga historia, comenzando con el laminado de canales de plomo para vitrales (tabla 1-1). Actualmente la aplicación industrial más amplia es en el laminado en caliente de *formas estructurales*, tales como vigas de patín ancho, canales en U y en L y rieles. Éste es un proceso primario de deformación que se practica en molinos de propósito especial. Sin embargo, básicamente se pueden usar las mismas técnicas para el laminado en frío de formas para tolerancias cerradas y excelente acabado superficial; estos procesos especializados de manufactura secundaria están ganando popularidad como alternativas al estirado y al maquinado.

El material inicial para el *laminado de formas en frío* es un alambre de sección transversal cuadrada, rectangular o circular, y la forma terminada se aproxima a través de un número de *pasos* (laminado a través de rodillos conformados) que distribuyen en forma gradual el material en la manera deseada. El punto crucial es evitar siempre la elongación no uniforme. Como se puede ver en el ejemplo sencillo de la figura 9-42*a*, las partes de sección transversal que se comprimen directamente se alargan como se requiere para mantener un volumen constante, mientras que las que no se someten a compresión directa se alargan sólo debido a su contacto físico con la porción que se deforma. La elongación en estas porciones no comprimidas genera esfuerzos secundarios de tensión los que, como se comentó antes, causan con facilidad la formación de grietas. Por lo tanto, el diseño de las pasos del rodillo tiene como objetivo equilibrar las reducciones en todas las partes de la sección transversal. Este fin se puede conseguir moviendo el material hacia los lados, sobre todo en las primeras pasadas y, si es necesario, por medio de rodillos verticales que comprimen la sección desde sus lados. Muchos bastidores de rodillos se pueden colocar en *tándem* (en línea); y después se acostumbra alternar sus ejes de verticales a horizontales.

9-7-3 Laminado de anillos

Los anillos sin costura son elementos importantes de construcción, y varían desde ruedas de acero de ferrocarril y rines de automóviles hasta anillos giratorios de los motores a reacción y pistas de los rodamientos.

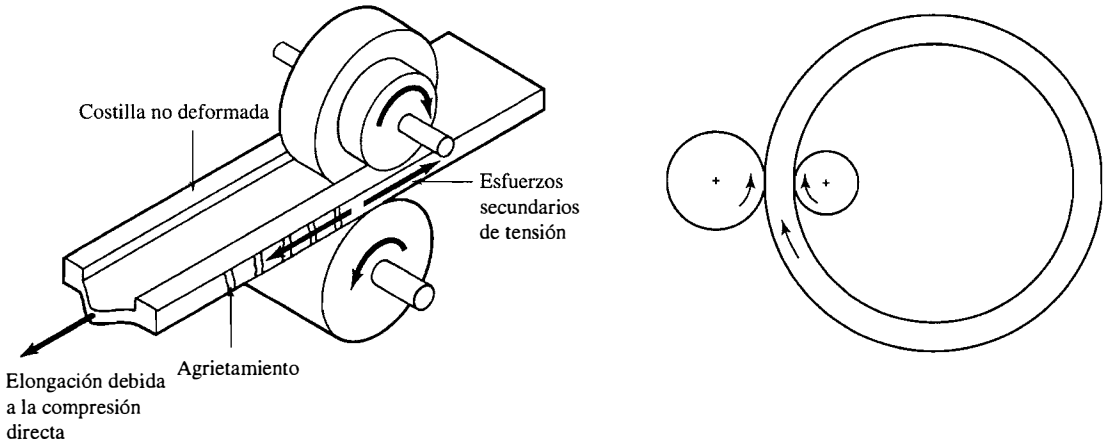


Figura 9-42 (*a*) La elongación no uniforme en el laminado de formas puede conducir al agrietamiento debido a esfuerzos secundarios de tensión. (*b*) El laminado de anillos provoca un incremento en diámetro del anillo, mientras que a menudo se desarrollan secciones transversales muy complejas.

El material inicial para el *laminado de rodillos* es una palanquilla perforada. Después de hacer un agujero por medio de cualquier técnica adecuada, el anillo de pared gruesa se lamina reduciendo su espesor e incrementando su diámetro (Fig. 9-42*b*). Los anillos mayores se laminan en caliente en fábricas especializadas, pero los anillos menores, en especial los de área de sección transversal pequeña, con frecuencia se laminan en frío. Además de perfiles rectangulares simples, se pueden laminar anillos de perfil de sección transversal muy compleja.

9-7-4 Laminado transversal

Cuando una pieza de trabajo se coloca entre dos rodillos que giran en sentido opuesto y el eje de ella es paralelo al de estos últimos, la pieza sufre deformación plástica (esencialmente, compresión localizada) durante su rotación entre los rodillos. Las consecuencias de esta deformación dependen de la forma y de la alineación angular de los rodillos y, como en toda compresión (Secc. 8-2-5), de la razón h/L. La altura h ahora es el diámetro de la pieza de trabajo y L la longitud de contacto con el rodillo (equivalente a L de un indentador en la deformación plana, Fig. 8-17*b*). Se pueden lograr varios propósitos:

1. Cuando $h/L > 1$, la deformación es no homogénea y las zonas plásticas que penetran desde el punto de contacto literalmente tratan de separar en cuñas la pieza de trabajo, en otras palabras, se generan esfuerzos secundarios elevados de tensión en el centro de la pieza de trabajo. Esto se aprovecha en la fabricación de tubos de pared gruesa por medio de métodos de *perforación rotatoria de tubos* (Fig. 9-43). Los rodillos tienen forma de barril (*a*) y un mandril o tapón (*e*) que se coloca contra el centro de la palanquilla (*d*) ayuda a abrir y a alisar la superficie interna. Un tercer rodillo (*b*)

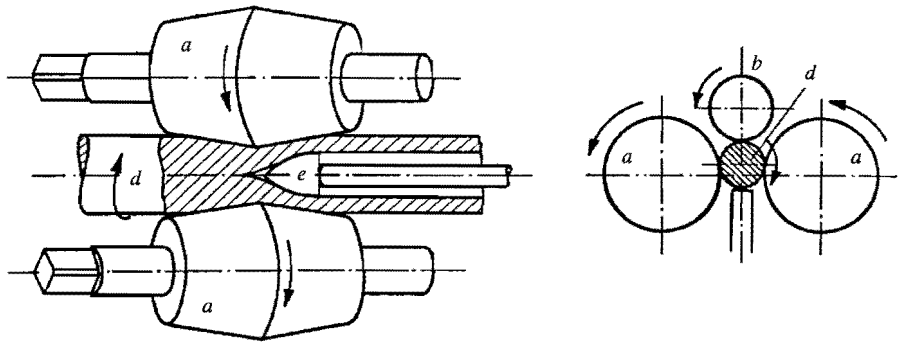


Figura 9-43 La deformación no homogénea en el perforado rotatorio de tubos ayuda a abrir el centro de una palanquilla para fabricar un tubo de pared gruesa.

restringe la palanquilla. La desalineación angular de los rodillos de deformación (oblicuidad) fuerza al tubo a avanzar en una trayectoria helicoidal; de esta manera, toda su longitud se perfora de lado a lado. Esos métodos de perforación de tubos se practican en plantas especializadas equipadas para el trabajo en caliente.

2. Los procesos secundarios de deformación basados en el mismo principio tienen alineados los ejes de los rodillos y la pieza de trabajo gira en el mismo plano (*laminado transversal*, Fig. 9-44). Si los rodillos están conformados para evitar la generación de esfuerzos de tensión internos grandes, se fabrica una buena pieza de trabajo de simetría axial. Por ejemplo, una forma de mancuerna puede servir como pieza terminada o como una preforma para la forja posterior de, digamos, una biela o de una llave de tuercas de

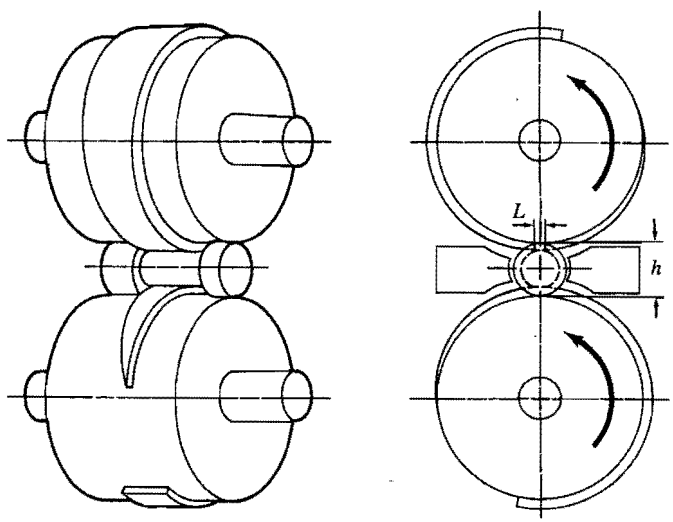


Figura 9-44 Las piezas de trabajo axialmente simétricas se pueden laminar transversalmente, pero la razón h/L se debe mantener baja para no abrir el centro. [*J. Holub, Machinery (London),* **102**: *131 (Ene. 16, 1963). Se reproduce con autorización.*]

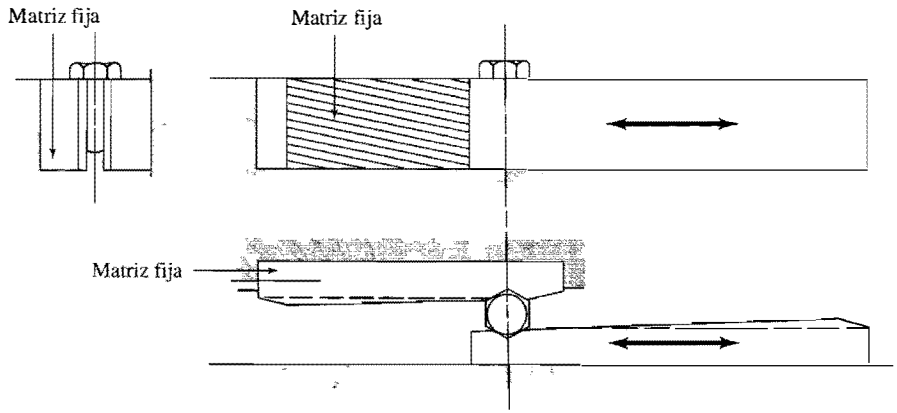


Figura 9-45 Roscas fuertes se laminan a velocidades elevadas en matrices planas recíprocas.

doble extremo. Existe una variedad de otros procesos de forjado/laminado rotarios con aplicaciones especializadas.

3. Los rodillos se pueden conformar para laminar una cuerda en la pieza de trabajo. Las cuerdas grandes se laminan en caliente, pero la mayoría de las operaciones de *laminado de cuerdas* se conducen en frío, con más frecuencia en máquinas equipadas con las llamadas *peines* (Fig. 9-45). Una de las matrices es estacionaria, la otra oscila; en un punto apropiado de la carrera, se coloca una pieza de trabajo (por lo general, una pieza sin terminar de un tornillo cabeceada en frío o extruida) entre ellas; la pieza está sujeta por la matriz móvil, y se gira contra la matriz estacionaria; así el perfil de la cuerda del tornillo se desarrolla gradualmente. Las cuerdas laminadas tienen un flujo continuo del grano y son, por lo tanto, más resistentes a la fatiga que las cortadas en un torno. La productividad del proceso es alta. Incluso las máquinas grandes y lentas laminan 60 tornillos por minuto, mientras que los tornillos menores se producen a una rapidez de 500 por minuto. En las máquinas que contienen varios pares de matrices, se logra una rapidez de producción de 2 000 partes/min. La buena calidad y la alta productividad de la laminación de las cuerdas laminadas han eliminado el corte de éstas como un proceso competitivo para la mayor parte de los propósitos de producción en masa.

Las cuerdas internas grandes se podrían fabricar por laminación, pero además del corte, una forma más práctica es el *formado en frío por machuelo.* La herramienta parece un tornillo, excepto que su diámetro cambia periódicamente dentro de la envolvente de éste, de manera que las porciones sobresalientes desplazan material de las raíces hacia la cuerda (Fig. 9-46).

9-7-5 Requerimientos de fuerzas y potencia

El laminado es, igual que el estirado, un proceso de estado estable. Sin embargo, la situación es más complicada. En el estirado, la fricción podría ser cero y el alambre aún se podría trefilar; en el laminado se necesita alguna fricción para introducir la pieza de

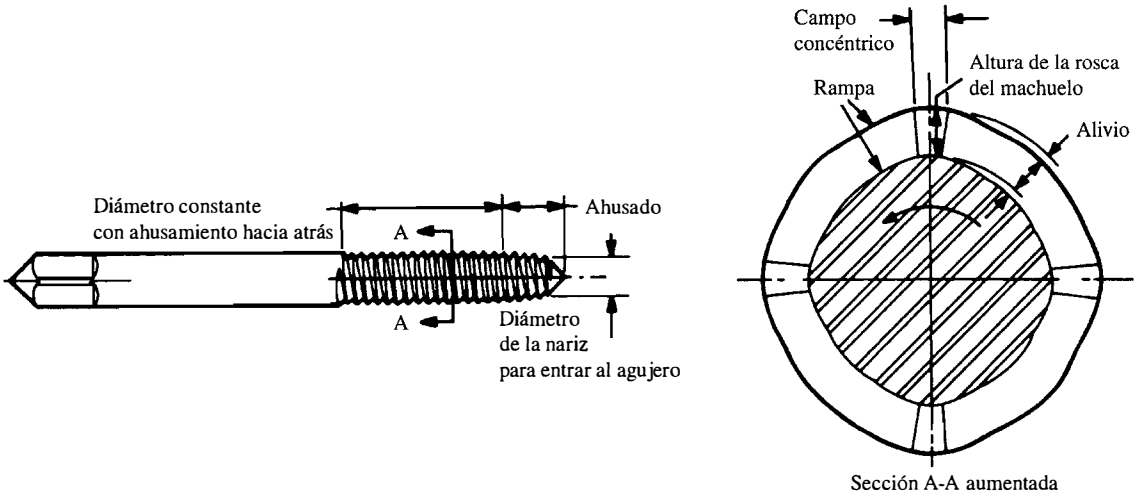


Figura 9-46 Un machuelo para formado en frío crea roscas en un agujero al desplazar el material en vez de removerlo. *(De The Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4a. ed., vol. 1, p. 12.92. Con permiso de la Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan.)*

trabajo entre los rodillos. La componente horizontal de la fuerza de fricción debe ser mayor que la opuesta de la fuerza del rodillo en el punto de entrada (Fig. 9-47*a*); de esta manera, el *ángulo de aceptación* α es

$$\tan \alpha \leq \mu \tag{9-38}$$

y, debido a la geometría del paso, la reducción máxima posible en la pasada es

$$\Delta h_{\text{máx}} = (h_0 - h_1)_{máx} = \mu^2 R \tag{9-38b}$$

(Se puede realizar una reducción más pesada empujando la pieza de trabajo hacia la separación de los rodillos.)

Una vez que la pieza de trabajo (tira) entra a la separación de los rodillos, sólo puede haber un punto (o mejor un plano) donde la tira se mueva a la misma velocidad que el rodillo; desde el punto de entrada hasta este *plano neutral*, la tira se mueve más lentamente y cuando llega a la salida se traslada más rápido (Fig. 9-47*b*). Al disminuir la fricción, el plano neutral se mueve todavía más rumbo a la salida; así que el diferencial de velocidad entre el rodillo y la tira que sale (*deslizamiento hacia delante*) disminuye (con fricción muy baja ocurre el deslizamiento). Como en la compresión por deformación plana (Fig. 9-7), la fricción causa un incremento en la presión en la interfaz, pero ahora el pico no está en medio de la zona de contacto, sino en el plano neutro (Fig. 9-47*b*).

El laminado se presta al análisis y muchas teorías están disponibles. Para nuestro propósito, se puede obtener una estimación aceptable de las fuerzas de laminación por analogía con un proceso de forja continuo (forjado de debaste). La comparación de la figura 9-47*b* con la 9-7 demostrará que la *longitud proyectada del arco de contacto*

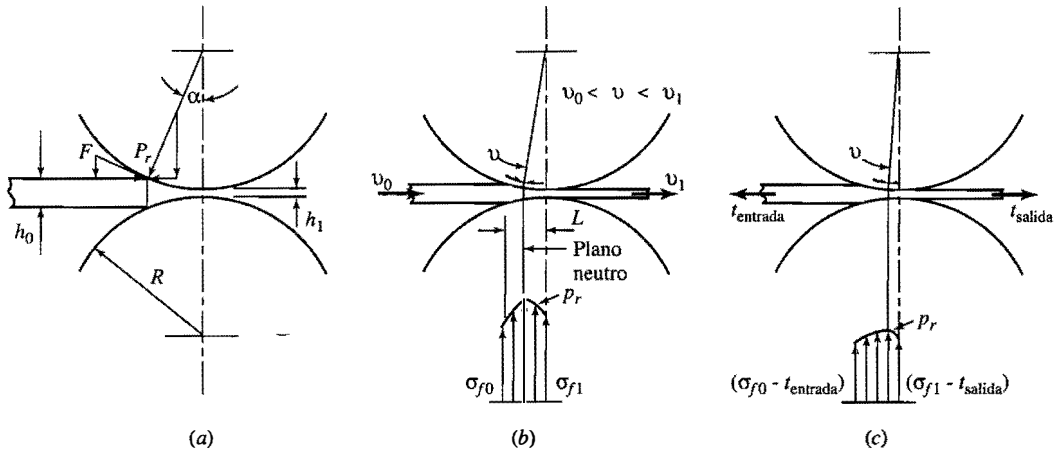


Figura 9-47 En la laminación plana (a) el ángulo de aceptación limita la reducción obtenible; y (b) el plano neutro desarrollado en condiciones de estado estable (c) se puede desplazar y las presiones se reducen por la aplicación de tensiones.

entre el rodillo, así que la pieza de trabajo se puede considerar como la L de la herramienta de forja, porque el flujo principal de material ocurre en dirección de la longitud de la plancha o tira. Se puede calcular la longitud de contacto a partir de

$$L = \sqrt{R(h_0 - h_1)} \quad \text{Ver figura 9-47b} \qquad \textbf{(9-39)}$$

donde R es el radio del rodillo. Los cálculos son como los de la forja de una pieza de trabajo rectangular saliente (Secc. 9-2-2), con algunas diferencias:

Paso 5: $\dot{\varepsilon}$ ahora se debe tomar como la tasa promedio de deformación

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{L} \ln \frac{h_0}{h_1} \qquad \textbf{(9-40)}$$

Paso 6: σ_{fm} [ecuación (9-1)] se necesita porque el laminado es un proceso de estado estable. En el trabajo en caliente, la ecuación (8-11) proporciona automáticamente un esfuerzo medio de fluencia porque en la ecuación (9-40) se calculó una tasa media de deformación.

Paso 7: Para encontrar la presión en la interfaz, primero se debe verificar la homogeneidad de la deformación, calculando la razón h/L. Cuando $h/L > 1$, la no homogeneidad de la deformación predomina y el factor de multiplicación de la presión Q_i se determina a partir de la figura 9-9. Cuando $h/L < 1$, los efectos de la fricción son primordiales, por lo que el factor de intensificación de la presión Q_p se determinan de la figura 9-8 o de la ecuación (9-9).

Paso 8: La fuerza del rodillo se obtiene de

$$P_r = (1.15)\, \sigma_{fm} Q_i L w \qquad \textbf{(9-41a)}$$

o Para La Presión (p) ecuación 9.10

$$P_r = (1.15)\,\sigma_{fm} Q_p L w \tag{9-41b}$$

donde w es el ancho de la tira y Lw el área de la superficie de contacto.

Paso 9: El par de torsión requerido para girar los rodillos se puede obtener suponiendo que la fuerza de éstos actúa en medio del arco de contacto; de esta manera, el brazo de palanca es $L/2$ (Fig. 9-47*b*). Como se deben impulsar dos rodillos, el par de torsión total M_r será

$$M_r = \frac{2P_r L}{2} = P_r L \tag{9-42}$$

El requerimiento de potencia se calcula con facilidad en unidades de watts a partir de

$$\text{Potencia} = P_r L \frac{2\pi N}{60} = P_r L \frac{v}{R} \tag{9-43a}$$

donde P_r es la fuerza del rodillo en newtons, L y R están en metros, v en metros por segundo, y N en revoluciones por minuto. Para obtener el requerimiento de potencia en unidades de caballos de potencia, realice

$$\text{Potencia} = P_r L \frac{2\pi N}{33\,000} \tag{9-43b}$$

donde L está en pies y P_r en libras.

9-7-6 Capacidades del proceso y aspectos del diseño

El proceso de laminado es extraordinariamente indulgente si las exigencias de calidad no son altas, pero requiere un conocimiento sustancial y un control complejo si el producto es crítico en cualquier aspecto. Existe una variedad de limitaciones del proceso:

1. Cuando se laminan secciones delgadas partiendo de materiales duros, la deformación elástica de los rodillos puede limitar el espesor mínimo obtenible. El *aplanamiento* de los rodillos se puede minimizar con un buen lubricante, si su diámetro es pequeño y si están fabricados con un material con un módulo elástico elevado, como el WC cementado. La fuerza del rodillo se reduce si *se tensiona la lámina* con la ayuda de tambores de acumulación o con un molino tándem (Fig. 9-41). En la figura 8-14 se vio que un esfuerzo de compresión (σ_1) requerido por deformación puede reducirse al aplicar un esfuerzo de tensión en la otra dirección (σ_2). Así, en la ecuación (9-41), es posible reemplazar σ_{fm} con $(\sigma_{fm} - t)$, donde $t = (t_{\text{salida}} + t_{\text{entrada}})/2$. El efecto es muy poderoso (Fig. 9-47*c*).

2. Bajo fuerzas impuestas, la *flexión del rodillo* ocurre igual que con cualquier viga cargada centralmente, soportada en dos extremos. Esto hace mayor la separación del rodillo en la mitad, por lo que la pieza de trabajo se reduce menos y se alarga menos en el centro, mientras que las orillas se alargan más y se olanean. Es posible realizar una compensación *arqueando* (*coronando*) los rodillos (al esmerilarlos con una forma ligera de barril) y empleando rodillos de apoyo (Fig. 9-41). En el proceso de laminado se genera calor sustancial y si el lubricante/refrigerante no es completamente efectivo, un

diámetro incrementado del rodillo en medio de éste (*comba térmica*) provoca el olaneo (ondulación) del centro de la tira laminada.

3. Bajo la fuerza impuesta por el rodillo, todo el molino de laminación se alarga, como se analizó en la sección 4-1-2. La constante de resorte de los molinos (*constante elástica del molino*) comúnmente está por debajo de 5 MN/mm; de ahí que la separación de los rodillos se puede abrir varios milímetros (aún si se lamina una tira muy delgada). Para compensar la deflexión elástica, los rodillos se deben aproximar de acuerdo con la cantidad requerida por la fuerza del rodillo. Cualesquiera variaciones de la fuerza del rodillo durante el laminado se deben compensar por medio de un control manual o automático de la configuración de separación de los rodillos.

4. La deformación no homogénea, ya sea a partir de una razón h/L grande o por la ausencia de compresión directa, siempre es dañina. Sin embargo, existe un caso en que la no homogeneidad es inducida a propósito. En el *bruñido por rodillos*, la superficie de una pieza de trabajo gruesa se lamina superficialmente. La zona de deformación es poco profunda y, en ausencia de flujo plástico volumétrico, el material de la superficie se comprime (Fig. 4-18), lo cual hace a la pieza más resistente a la fatiga (como en el laminado de los radios del muñón de los cigüeñales o en el acabado por laminado de engranes).

Ejemplo 9-20

Una plancha de acero AISI 1015 con espesor $h_0 = 300$ mm y un ancho $w_0 = 1\,000$ mm se lamina en caliente a 1 000°C en un molino con rodillos de 600 mm de diámetro. La presencia de cascarilla reduce la fricción hasta $\mu = 0.3$. Se realiza una reducción de 27 mm. La velocidad del rodillo es de 1.2 m/s. Calcule los requerimientos de fuerza y de potencia en los rodillos. La hoja de cálculo verifica la compresión máxima (reducción permisible, identificada como Δh máx).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Acero 1015 en caliente						Rodillo	R=	300	mm	v=	1 200	mm/s	w=	1 000	mm
E. de fluencia		C=	120	MPa	m=	0.1									
					delta h	épsilon							contacto		
Pasada	mu	h	A	ec	máx	punto	sigma f	h (promedio)	L	L/h	Q	p	A	P	potencia
Núm.		mm	mm^2		mm		N/mm^2	mm	mm			N/mm^2	mm^2	kN	kW
				Ec. (9-3)	Ec. (9-38b)	Ec. (9-40)	Ec. (8-11)		Ec. (9-39)		Fig. 9-9	Ec. (9-10)		Ec. (9-41)	Ec. (9-43)
0		300	300 000												
1	0.3	273	273 000	0.09	27	1.2574	122.78	286.5	90.0	0.31	1.50	212	90 000	19 062	6 862

La reducción máxima permisible iguala a los 27 mm deseados. Como L/h es 0.3, Q_i se toma de la figura 9-9. Note los grandes requerimientos de fuerza y potencia en los rodillos.

Ejemplo 9-21

Después de laminarlo en caliente, el material del ejemplo 9-20 se lamina en frío en un molino cuyo diámetro de rodillo es de 400 mm, a una velocidad de 700 m/min. Calcule los requerimien-

tos de fuerza y de potencia para laminar de 1.0 mm a 0.6 mm, si un lubricante reduce el coeficiente de fricción a 0.05. (La hoja de cálculo permite reducciones sucesivas.)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
Acero 1015 en frío						Rodillo	R=	200	mm		w=	1 000	mm			
Esfuerzo de fluencia		K=	620	MPa	n=	0.18										
					delta h									contacto		
Pasada	mu	h	A	ec	máx	épsilon	épsilon	sigma fm	h (promedio)	L	L/h	Q	p	A	P	potencia
Núm.		mm	mm^2		mm	pasada	total	N/mm^2	mm	mm			N/mm^2	mm^2	kN	kW
				Ec. (9-3)	Ec. (9-38b)	Ec. (8-5)		Ec. (9-1)		Ec. (9-39)		Fig. 9-8	Ec. (9-10)		Ec. (9-41)	Ec. (9-43)
0		1	1 000			0	0									
1	0.05	0.6	600	0.40	0.500	0.51	0.51	465.6	0.80	8.94	11.2	1.35	723	8 944	6 465	3 373

Note que $\Delta h_{máx} > \Delta h$. También vea que aunque la reducción es minúscula comparada con la del ejemplo 9-20, la fuerza del rodillo es muy alta debido al esfuerzo de fluencia elevado en el laminado en frío. La potencia es alta debido a la velocidad de laminación mayor.

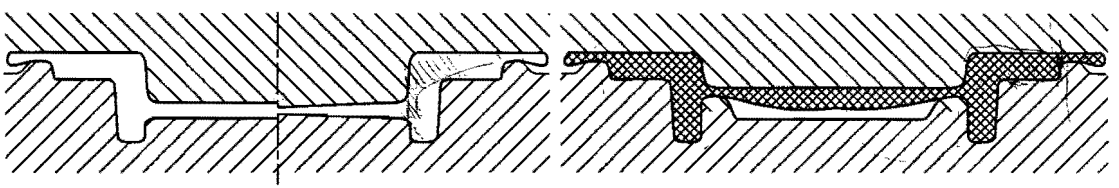
Ejemplo 9-22

Ahora suponga que la tira se lamina en un molino Sendzimir con rodillos de trabajo de 40 mm de diámetro, siendo idénticas las otras condiciones.

Para un rodillo de 20 mm, L disminuye a 2.83 mm, $Q_p = 1.1$, y la fuerza del rodillo reduce significativamente hasta 1 666 kN. La potencia es 2 749 W, una reducción de sólo 18.5%, porque el trabajo de deformación no cambia.

Ejemplo 9-23

La brida del ejemplo 7-9 se puede fabricar por forjado (tabla 9-1); la laminación de anillo no se muestra, pero obviamente también es adecuada. Para la forja, sería atractivo tener la separación en la base de la brida (como en la figura del ejemplo 7-9*b*) debido al bajo costo de una matriz inferior plana. Sin embargo, la localización de la preforma no se definirá, y es mejor forjar en la posición invertida. Para la liberación de la pieza, se debe aplicar un ángulo de retiro en todas las superficies verticales, y ahora el centro del anillo está lleno por material de desecho. Es necesario un preforjado considerable para evitar la salida del material (Fig. 9-26*b*). El espesor mínimo del material de desecho de la figura 9-25 causa una mala utilización del material. También las



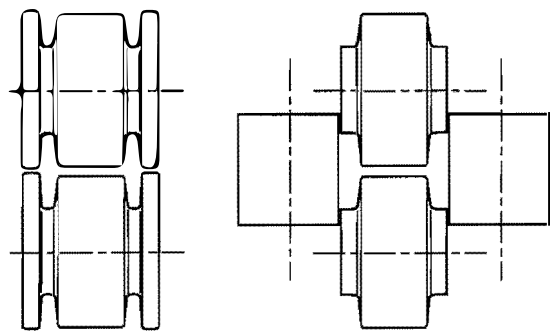
(*a*) (*b*)

Figura ejemplo 9-23

presiones de la matriz son elevadas. El alivio se obtiene ahusando el centro del punzón (*a*) o con un canal interno de rebaba (*b*). El laminado de anillos puede producir un anillo de forma casi neta que necesite cortes de terminado sólo en las superficies SDI y SFT. Sin embargo, la brida es relativamente ancha respecto al collarín y el diámetro interior (DI) es pequeño. Un anillo de diámetro mayor sería más práctico; aun entonces, es necesario un preformado hecho hábilmente.

Ejemplo 9-24

Las partes del ejemplo 7-10 se fabrican rutinariamente por medio de procesos de deformación. La sección recta (Fig. del ejemplo 7-10*a*) se puede cortar a la longitud de una extrusión en caliente o de una en frío, de una forma estirada o laminada (tabla 9-1). La elección del proceso dependerá de las dimensiones, del material y de las tolerancias.



(*a*) (*b*)

Figura ejemplo 9-24

El diseño de la matriz de extrusión es sencillo si el espesor del material de desecho y de la brida es igual. Si WT se reduce, las bridas que emergen más rápido arrastrarían el material de desecho consigo y podrían causar una fractura periódica; por lo tanto, la matriz debe diseñarse para frenar la brida (o acelerar el alma).

El desarrollo de la forma en el estirado de formas requiere una habilidad considerable, pero se mantienen tolerancias altas. El laminado de formas se hace en forma rutinaria, a gran escala, en molinos especializados para secciones estructurales. La sección se lamina partiendo de lingotes rectangulares o preformados de fundición continua, a través de una serie de cavidades del rodillo (*calibres*). Como el material de desecho es mucho más delgado que la altura de la brida, ocurre una deformación desigual y el diseño del paso del rodillo debe minimizar los esfuerzos secundarios de tensión (Fig. 9-42*a*). El plano de separación está en la mitad del material de desecho, y los radios de retiro y del filete se deben aplicar (*a*). El ángulo exterior de retiro se puede eliminar realizando el terminado en un molino universal, que tenga rodillos tanto en el eje vertical como en el horizontal (*b*).

La presencia de una nervadura (Fig. del ejemplo 7-10*b*) limita mucho las opciones; en efecto, sólo el forjado por matriz de impresión o por matriz cerrada es adecuado (tabla 9-1). Hay varias opciones para colocar el plano de separación, pero en todos los casos se debe aplicar un retiro a las bridas y dar un generoso radio del filete RF. De nuevo, el espesor mínimo del material de desecho está dictado por la presión de la matriz y, de esta manera, por la razón L/h (Fig. 9-25); se necesita un preforjado considerable para evitar la salida de flujo (Fig. 9-26*b*).

9-8 RESUMEN

Los procesos de deformación volumétrica han mantenido su importancia durante los miles de años de desarrollo tecnológico. No sólo proporcionan el material inicial para el trabajo de lámina de metal, doblado de alambre y tubo, y para la mayor parte de las aplicaciones de soldadura subsiguientes, sino que también aseguran la disponibilidad de componentes terminados de gran integridad estructural. Los productos incluyen piezas forjadas en caliente, desde álabes de turbina y piezas de inicio para engranes hasta azadones de jardín; piezas forjadas en frío, desde clavos, tornillos y remaches, hasta engranes terminados; piezas extruidas en frío, desde semiejes automotores y cuerpos de bujías, hasta tubos para pasta dental; secciones de construcción extruidas en caliente y cuerpos de válvulas; anillos y secciones para todo uso, laminados en frío y en caliente. En el diseño de componentes y en el control de los procesos se deben considerar varios factores:

1. Casi siempre es posible encontrar un proceso de deformación volumétrica que pueda competir con otros métodos de manufactura, excepto para las piezas con la mayor complejidad de forma (tabla 9-1).
2. El trabajo en frío ofrece productos de resistencia incrementada, tolerancias y acabado superficial buenos, así como paredes delgadas, pero a costa de menor ductilidad y un elevado esfuerzo de fluencia, presión de la matriz y fuerzas de deformación mayores.
3. El trabajo en caliente ofrece esfuerzos de fluencia menores (pero dependientes de la tasa de deformación), así como presiones de la matriz y fuerzas menores, pero a cambio de un consumo de energía extra para el precalentamiento y de tolerancias y acabado superficial del producto más burdas.
4. Las presiones de la matriz se determinan por el esfuerzo de fluencia del material, modificado por los efectos del estado de esfuerzos (como se expresa por el criterio de cedencia), por la fricción y por la no homogeneidad de la deformación. El objetivo del control del proceso es minimizar las presiones y las fuerzas por medio de la lubricación y de la modificación de la geometría del proceso.
5. La supervivencia del material de la pieza de trabajo es una función de la factibilidad, la cual abarca los efectos de la presión hidrostática desarrollada en el proceso, superpuesta sobre la ductilidad básica del material. El fin del desarrollo del proceso es por lo general incrementar la componente de presión hidrostática (excepto para las operaciones de perforación de tubos).
6. La presión que se desarrolla a través del proceso debe ser absorbido por herramientas y matrices de materiales apropiados, en configuraciones diseñadas para proporcionar resistencia máxima a la cedencia plástica. La deformación elástica de las herramientas y de la maquinaria debe compensarse si la forma de las partes se va a mantener dentro de tolerancias estrictas.
7. Los modelos matemáticos del proceso y los sistemas expertos permiten la optimización de la forma de la pieza para el proceso y para las propiedades en servicio.

8. Las temperaturas elevadas, las herramientas altamente esforzadas, la operación rápida, y el ruido y la vibración presentan peligros especiales para el trabajador, por lo que son necesarios el equipo de protección personal, un resguardo adecuado del espacio de trabajo, la prevención de operaciones accidentales y, en muchos casos, un encierro total.

PROBLEMAS 9A

9A-1 Clasifique (bajo, medio, alto) en forma tabular los siguientes atributos del trabajo en frío, en tibio y en caliente: sensibilidad a la tasa de deformación, esfuerzo de fluencia, presión de la matriz, tolerancias dimensionales, acabado superficial, facilidad de lubricación, efectividad para remediar defectos de fundición.

9A-2 Defina el trabajo en caliente (*a*) en sentido lato y (*b*) en sentido estricto.

9A-3 (*a*) Dibuje un cilindro con una razón $h/d = 1$. Superponga en él los perfiles de un cilindro recalcado a $0.5h$ con (*b*) fricción cero y (*c*) fricción adherida. (*d*) En un bosquejo separado, muestre las zonas de deformación dentro del cuerpo de (*c*).

9A-4 (*a*) Dibuje una curva usual del esfuerzo real-deformación real para un material endurecible por deformación. Elija una deformación y marque el esfuerzo de fluencia apropiado para la deformación (*b*) de estado estable y (*c*) de estado no estable.

9A-5 Dibuje un bosquejo que indique las características esenciales de la extrusión de una barra (*a*) hacia delante y (*b*) inversa, mostrando las direcciones del movimiento del punzón y del flujo del material. (*c*) Use medias flechas para indicar la dirección en la cual actúa la fricción.

9A-6 Dibuje dos bocetos que muestre la diferencia esencial entre la forja (*a*) por matriz de impresión y (*b*) en matriz cerrada. (La parte puede ser un cilindro sencillo.)

9A-7 (*a*) Dibuje una sección H. (*b*) Superponga los perfiles de la matriz usada para la forja por impresión. (*c*) Señale las características esenciales de la forma H como sale de forja. (*d*) Identifique el canal de la rebaba de la matriz y establezca su propósito.

9A-8 Dibuje bosquejos que indiquen el flujo del material en la extrusión en caliente hacia delante (*a*) no lubricada y (*b*) lubricada. Señale las características esenciales.

9A-9 Haga un boceto que contenga el dibujo de un tubo sobre un tapón. Con semiflechas, indique los esfuerzos de fricción.

9A-10 Dibuje dos bosquejos del laminado plano con rodillos de diámetro constante, (*a*) uno para mostrar la deformación no homogénea y (*b*) otro para señalar la deformación homogénea. (*c*) Identifique la diferencia esencial.

PROBLEMAS 9B

9B-1 Una palanquilla de 50 mm de diámetro y 150 mm de longitud se diseña para recalcarse en la dirección axial hasta una altura de 75 mm. Realice bocetos (*a*) del cilindro inicial y (*b*) y (*c*) de los problemas potenciales que anticipe en el recalcado.

9B-2 (*a*) Dibuje la vista en planta de una plancha de 100 mm de longitud y 20 mm de ancho (el espesor de 10 mm no es visible en esta vista). (*b*) Superponga el perfil de la plancha después del recalcado con fricción deslizante. Indique la dirección del deslizamiento. (*Sugerencia*: para un coeficiente de fricción dado, la fuerza de fricción es proporcional a la distancia de deslizamiento.)

9B-3 Repita el problema 9B-2 para (*a*) un bloque cuadrado y para (*b*) un cilindro deformado axialmente.

9B-4 Se requiere que una pieza cilíndrica tenga 50% de trabajo en frío. Se fabricó exitosa-

mente con una razón de $d/h = 2$. Como resultado de un cambio de diseño, ahora se propone hacerla con la misma altura pero con una razón de 4. (*a*) Dibuje bosquejos para mostrar los dos casos. Evalúe las consecuencias del cambio en términos de (*b*) las presiones de la matriz y de (*c*) las fuerzas de forjado (plantee argumentos cualitativos, suponiendo un recalcado con fricción deslizante).

9B-5 Continuando con el problema 9B-4, (*a*) haga un boceto que indique el cambio en el diseño de la pieza que reduciría las presiones de la matriz en el forjado del disco con $d/h = 4$. (*b*) Justifique su respuesta.

9B-6 Un blanco para un engrane se forjó exitosamente en caliente en una prensa mecánica, en una matriz cerrada. Al inicio de una nueva corrida de producción, la matriz revienta. ¿Cuál es la causa probable?

9B-7 Una palanquilla se coloca en un recipiente de 50 mm de diámetro y se crea una cavidad concéntrica con un punzón de 25 mm de diámetro. (*a*) Dibuje un bosquejo del proceso y (*b*) establezca qué análisis se deben aplicar.

9B-8 Una palanquilla de acero AISI 1045 se va a extruir en frío de un diámetro de 25 mm a uno de 16 mm. Sugiera (*a*) un lubricante adecuado, (*b*) la condición metalúrgica de la palanquilla y (*c*) diseñe en principio una forma de la matriz que evite problemas. Justifique cada elección.

9B-9 Suponga que la pieza en el problema 9-12 se fabrica recalcando una barra recocida de 10 mm de diámetro. (*a*) Haga un boceto de la sección transversal longitudinal del perno. (*b*) Indique la variación de tamaño del grano que se debería esperar si el perno se recuece después del cabeceado en frío. (*c*) Indique la sección transversal más débil y (*d*) el perfil del diseño para un método de producción que evite esta debilidad.

9B-10 El cuerpo de la pieza en el ejemplo 9-12 se va a extruir desde el diámetro d_0 a un diámetro de 10 mm. (*a*) En principio, ¿qué problemas espera al crear la forma como se especificó? (*b*) ¿Qué cambios recomendaría en el diseño o en el proceso?

9B-11 Dibuje bosquejos que muestren el defecto del estallido central en (*a*) la extrusión y en (*b*) el estirado de una barra. (*c*) Indique la geometría que probablemente induzca el defecto. (*d*) Si las geometrías de las matrices son idénticas, ¿cuál proceso es más factible que produzca el defecto? Justifique su respuesta.

9B-12 Se sugirió extruir una sección H. El alma es el doble de gruesa en la unión con los patines. (*a*) Haga un boceto de la sección. (*b*) ¿Anticipa algún problema en la extrusión? (*c*) Si es así, ¿qué acción se deberá tomar al diseñar la matriz?

9B-13 Analice la figura 9-39 y note las semiflechas que indican los esfuerzos de fricción. (*a*) Para cada caso, establezca si la fricción incrementa los esfuerzos de estirado. (*b*) Deduzca cuál de los cuatro procesos permite que se realice la reducción más grande. Justifique sus respuestas.

9B-14 (*a*) Dibuje una forma de mancuerna. (*b*), (*c*) y (*d*) Haga bosquejos de tres procesos posibles de deformación para fabricar la pieza.

9B-15 Sugiera tres formas de fabricar un tubo de pared gruesa. Dibuje bocetos simples para mostrar la esencia de los métodos de deformación propuestos.

9B-16 Una barra plana se va a laminar pero los rodillos no muerden (no jalan la barra hacia el espacio entre los rodillos). Escriba al menos dos medidas que se podrían tomar.

9B-17 La brida de la figura en el ejemplo 9-23*a* se va a forjar en caliente de un acero 1045 a 1 000°C. Con la ayuda de bosquejos, analice (*a*) qué problema se debe esperar si la pieza se forja de un disco plano con un diámetro igual al de la brida, (*b*) la forma de un diseño propuesto para la preforma y (*c*) el diseño de una matriz adecuada para fabricar esa preforma. (*d*) Sugiera un material alterno de inicio.

9B-18 La pieza que se muestra en la figura del ejemplo 9-12 se va a fabricar con un acero de baja aleación. Se tratará térmicamente hasta HRC40 y se someterá a fatiga por flexión en

el servicio. Escriba los pasos involucrados en el tratamiento térmico. Los procesos que se proponen para fabricar la parte incluyen: (1) forja en caliente con el plano de separación a través del eje; (2) forja en caliente de una cabeza en una barra de 10 mm de diámetro; (3) extrusión en caliente de una palanquilla de 20 mm de diámetro; (4) combinación de forja en frío y extrusión, como en el ejemplo 9-12; (5) recalcado en frío de una barra de 10 mm de diámetro, y (6) extrusión en frío de una palanquilla de 20 mm de diámetro. Como parte de su diseño, evalúe cada propuesta en referencia con (*a*) el beneficio para el servicio, (*b*) el cambio requerido en la forma de la pieza y (*c*) los problemas potenciales de la reducción. (*d*) Recomiende un método preferido.

9B-19 Un componente para un tractor se va a fabricar de una barra de acero 1045 por medio de la forja en frío con alta deformación. Para establecer las fuerzas se requiere una buena indicación de la resistencia del material al flujo. Su laboratorio de ensayo de materiales propone realizar ensayos estándares de tensión. (*a*) Explique por qué esto no proporcionaría información suficiente. (*b*) Sugiera un método más apropiado. (*c*) Identifique las precauciones que se deben tomar para generar datos relevantes.

PROBLEMAS 9C

9C-1 Como parte de la evaluación del presupuesto de su diseño, calcule cuánto material se ahorra fabricando la pieza descrita en el ejemplo 9-12 por medio de la deformación plástica en vez de maquinado.

9C-2 Se propuso que el extremo de una barra de latón para cartuchos de $d_0 = 6$ mm se recalque en frío sobre una longitud de $h_0 = 5$ mm para formar una cabeza plana de altura $h_1 = 0.8$ mm (espesor). Para evaluar la factibilidad del diseño, calcule las presiones y las fuerzas de recalcado, (*a*) primero suponiendo que un buen lubricante reduce la fricción a $\mu = 0.1$, y luego (*b*) para matrices rugosas sin lubricación (como sucedería si el lubricante hubiera fallado o si su suministro se hubiera interrumpido). (*c*) Verifique si la operación se puede realizar sin pandeo. (*d*) Si la respuesta es afirmativa, sugiera el material adecuado de la matriz.

9C-3 En la preparación para la forja de un blanco grande para engrane, una palanquilla de acero 1045 de 200 mm de diámetro y 400 mm de altura se recalca a 1 000°C hasta formar una "torta" de 100 mm de espesor. Un lubricante de grafito reduce la fricción a $\mu = 0.2$. Como parte de su proceso de diseño, (*a*) haga un boceto de la operación. Calcule (*b*) la presión promedio de la matriz y (*c*) la fuerza que se requiere para forjar la parte si se usa una prensa hidráulica con una velocidad de 3 m/min. Exprese el resultado final también en unidades USCS.

9C-4 A menudo los métodos analíticos para determinar las presiones en el recalcado se basan en la suposición de que la presión se incrementa exponencialmente desde la orilla de la plancha: $p_x = 2k \exp(2\mu x/h)$, donde x es la distancia desde la orilla. La integración da la presión promedio de la matriz como en la ecuación (9-10) con $Q_p = (h/\mu L)[\exp(\mu L/h) - 1]$. (*a*) Calcule Q_p sobre el intervalo de $1 < L/h < 40$ para $\mu = 0.05$, 0.1 y 0.2. (*b*) Grafique los resultados y compárelos con la figura 9-8. (*c*) Explique cualquier discrepancia.

9C-5 Muchos investigadores prefieren usar el factor de cortante en la interfaz m^* para calcular las presiones y las fuerzas en el trabajo del metal. Explore las posibles diferencias regresando al pasador forjado en el ejemplo 9-4. Recalcule la presión promedio de la matriz y la fuerza de forjado. Para el recalcado sin lubricación, $m^* = 1$; para el caso lubricado, estime m^* por medio de μ, como se muestra en el ejemplo 8-18.

9C-6 Para el ejemplo 9-12, calcule la longitud de la barra de diámetro d_0 necesaria para (*a*) recalcar la cabeza y (*b*) extruir el cuerpo. Si la parte está hecha de acero 1045 y se lubrica

con fosfato-jabón, obtenga la (*c*) fuerza de recalcado y la (*d*) fuerza de extrusión (ignorando la fricción del recipiente). (*e*) Muestre qué cambios del diseño se deben hacer a la forma de la parte.

9C-7 La brida del ejemplo 9-23 se forja de acero 1045 en una prensa hidráulica a 1 000°C. La velocidad de la prensa es de 70 mm/s; se usa un lubricante grafitado. Tome las dimensiones del anillo de la extensión de la figura 7-9*b*. El campo de la rebaba es de 6 mm de ancho. Para evaluar los méritos relativos de los diseños alternos, estime la fuerza de forjado para la configuración de (*a*) la figura del ejemplo 9-23*a* (material de desecho plana de 5 mm de espesor) y (*b*) la figura del ejemplo 9-23*b* (rebaba interna).

9C-8 Una palanquilla de $d_0 = 50$ mm y $h_0 = 75$ mm de una aleación de Al 2017 se comprimirá hasta $h_1 = 20$ mm de altura en una prensa hidráulica (velocidad del ariete 100 mm/s) a 500°C entre yunques sin lubricar. (*a*) Para el final de la carrera, obtenga la presión en la interfaz y la fuerza de la prensa. (*b*) ¿Qué incremento en el esfuerzo y en la fuerza ocurriría si la pieza de trabajo se enfriara hasta 400°C?

9C-9 En el ejemplo 9-3 se calculó que se necesita una energía de 36 250 N · m para forjar en caliente la palanquilla. En el ejemplo 9-17 se determinó que un martinete de 2 000 kg sería suficiente para suministrar esta energía. Ahora suponga que un martinete de 1 000 kg es el más grande disponible. Del ejemplo 9-17 se sabe que suministrará 18 kN · m de energía. La planta propone forjar en tres golpes. Como parte de sus diseños del proceso, haga los cálculos aproximados para ver si esto es posible. (*Sugerencia*: en la figura 9-5 divida el área bajo la curva fuerza-desplazamiento en tres zonas desiguales, recordando que el golpe inicial más suave es más eficiente y puede suministrar mayor energía. Empiece suponiendo una altura de 20 mm en el primer golpe; calcule la energía requerida; si es menor que la suministrada por el martinete, proceda al segundo golpe hasta 12.5 mm y luego al tercero tomando la palanquilla hasta los 10 mm finales. Es posible que se deban hacer iteraciones para encontrar una solución razonable.)

9C-10 Se propuso fabricar una pieza con forma de tubo a partir de acero 1045 perforando en frío una palanquilla de $d_0 = 30$ mm con un punzón con diámetro $D_p = 20$ mm. La longitud de la pieza (la profundidad del agujero) es de 80 mm; por razones de construcción, el punzón es de 120 mm de longitud. Verifique varios aspectos de la intención de diseño: (*a*) especifique la condición del material de la palanquilla. (*b*) Calcule la presión del punzón. (*c*) Sugiera el material adecuado para el punzón. (*d*) Verifique el punzón para los posibles modos de falla. (*e*) Especifique un lubricante adecuado para esta tarea.

9C-11 Al extruir la pieza en el problema 9B-10, a través de una matriz con semiángulo $\alpha = 45°$, se encuentra que varios componentes tienen defectos de estallido central. (*a*) Haga un boceto (a escala) para encontrar una explicación y (*b*) sugiera formas de librarse del problema por medio de cambios en el proceso o en el diseño de la pieza. (Suponga que la composición del material no se puede cambiar.)

9C-12 Las palanquillas de Al de pureza comercial (1100) de 250 mm de diámetro se extruyen a 500°C, con una velocidad de ariete de 0.6 m/min, en barras de 125, 50, 25 y 12.5 mm de diámetro. Suponga una zona de metal muerto de 45° e ignore la fricción, (*a*) calcule la presión de extrusión y la fuerza de extrusión básicas para los cuatro diámetros de barra, (*b*) determine la velocidad a la cual emergen las extrusiones, (*c*) encuentre una velocidad de ariete que dará una fuerza de extrusión de 4 000 kN para una barra de 12.5 mm de diámetro. (*d*) Analice si la prensa es lo suficientemente grande para la extrusión económica de barras de este tamaño.

9C-13 La sección H que se muestra en la figura del ejemplo 7-10*a* se va a extruir de una aleación de Al 6061. La sección es de 50 mm de an-

cho, 50 mm de altura, y el espesor en el patín y en el alma es de 3 mm. (*a*) Dibuje un bosquejo de la sección; realice cualquier cambio necesario en el diseño, en su análisis, para facilitar la extrusión. (*b*) Obtenga la presión de extrusión y la fuerza mínimas para la extrusión sin lubricación de una palanquilla de 150 mm de diámetro a 500°C, si con la extrusión emerge a una velocidad de 1 m/s. (*c*) Obtenga la presión máxima de extrusión para una palanquilla de 450 mm de longitud.

9C-14 La extrusión del problema 9C-13 ahora se hará en una aleación de Al 7075 a 450°C. La extrusión emerge con severas grietas transversales a la dirección de extrusión. (*a*) Identifique la causa del problema. (*b*) Con base en los datos dados en el ejemplo 8-19, defina las condiciones de extrusión que la harían segura.

9C-15 Una forma plana como una flauta de espesor promedio $h = 1$ mm y ancho $w = 10$ mm se va a fabricar por estirado en frío. Se propone partir de un alambre recocido plano de bronce, Cu-5Sn, de sección transversal 10 mm por 2 mm, para obtener la ventaja del endurecimiento por deformación del producto. La pieza plana se estira a 1 m/s en matrices con un semiángulo $\alpha = 7°$ y, para mantener fría la pieza, se elige una emulsión como lubricante. Verifique si este proceso es posible calculando (*a*) el esfuerzo de fluencia relevante, (*b*) la fuerza y la potencia de estirado y (*c*) la fuerza que soporta la forma estirada. (*d*) Si el estirado no es posible, sugiera una forma de fabricar el producto final requerido.

9C-16 Retome el problema 9C-15. Vuelva a calcular suponiendo que la forma se fabrica en dos pasadas, con 30% de reducción en la primera y sin recocido después de ella.

9C-17 A partir del problema 9C-16, estire en cuatro pasadas, con 20% de reducción en las primeras tres, y una cuarta hasta el espesor final de $h = 1$ mm. (*a*) Encuentre el esfuerzo y (*b*) la fuerza de estirado a la salida. (*c*) Compruebe si los estirados son posibles. (*d*) Verifique si puede ocurrir el defecto de estallido central. (*e*) Si existe tal peligro, distribuya las reducciones uniformemente de manera que se aplique la misma deformación en las cuatro pasadas.

9C-18 Regrese al ejemplo 9-18. (*a*) Explore el efecto de cambiar el semiángulo de 1° a 20° en incrementos de 2°, para $\mu = 0.02, 0.05$ y 0.1. (*b*) Grafique Q_{estirado} contra el semiángulo para los tres valores de μ. (*c*) Para cada μ, obtenga el esfuerzo mínimo de salida.

9C-19 Un canal U pequeño y poco profundo de bronce Cu-5Sn se lamina en frío. La forma es suficientemente somera para considerarla como una tira con sección transversal rectangular de $w = 20$ mm de ancho, $h = 15$ mm de espesor. De acuerdo con un diseño preliminar del proceso, se realiza una reducción de 40% en la altura en una sola pasada, en un molino con rodillos de 150 mm de diámetro, a una velocidad $v = 0.8$ m/s, con un lubricante de aceite mineral ($\mu = 0.07$). (*a*) Verifique si la reducción es posible; si no, haga dos reducciones, luego calcule (*b*) la fuerza del rodillo y (*c*) el requerimiento de potencia.

9C-20 El molino de laminación del ejemplo 9-21 tiene una constante de resorte de 4 000 kN/mm. Si los rodillos se fijan para tocarse con carga cero, ¿cuál será la separación entre ellos en la carga del rodillo desarrollada en la pasada?

9C-21 El aluminio de pureza comercial (Al 1100) se lamina rutinariamente en varias pasadas, pero sin recocido, hasta una reducción total de más de 98%. Encuentre (*a*) la deformación uniforme (ε_u), la elongación total (e_f) y la reducción en área (q) para este material. (*b*) Compare estos resultados con la reducción por laminado y (*c*) explique las razones de la diferencia.

9C-22 Una lámina de latón 70/30 se lamina hasta una dureza 06; por definición, esto se obtiene a través de una reducción de 50%. Calcule la TS esperada y compárela con el valor dado en el ejemplo 8-7. (*Sugerencia*: como los esfuerzos de ingeniería y real no son muy diferentes en un material altamente endurecido por deformación, la TS se puede tomar como

el esfuerzo de fluencia del material después del trabajo en frío. La deformación en el ensayo de tensión se deberá agregar a la deformación por laminación.)

9C-23 Una plancha de una aleación de Al 2017 de 200 mm de espesor y 800 mm de ancho se lamina en caliente, a una temperatura de 500°C y a 100 m/min, en un molino equipado con rodillos de trabajo con un diámetro de 600 mm, usando una emulsión lubricante que da $\mu = 0.2$. En un diseño preliminar del proceso, se propuso una reducción de 30 mm en la primera pasada. (*a*) Dibuje un boceto del proceso a escala. (*b*) Verifique si la reducción es posible; si no, calcule la reducción permisible. (*c*) Obtenga la fuerza del rodillo y (*d*) el requerimiento neto de potencia para la reducción permitida. Explique si hay posibilidades de desarrollar (*e*) defectos internos o (*f*) agrietamiento de las orillas; explique por qué.

9C-24 En la pasada final del laminado en caliente en la plancha del problema 9C-23, se reduce de 5.0 mm a 3.5 mm. La temperatura disminuyó a 400°C. Recalcule la fuerza del rodillo y la potencia requerida.

9C-25 Para reducir el enfriamiento, la velocidad de laminación se incrementa a 10 m/s en el problema 9C-24. Obtenga su efecto en la tasa de deformación, en el esfuerzo de fluencia, en la fuerza del rodillo y en la potencia.

9C-26 La tira del problema 9C-24 se lamina en frío y se recuece a un calibre de 2.0 mm; luego se termina laminándola en frío para suministrar un producto con endurecimiento por deformación controlado. El molino tándem tiene 3 bastidores con rodillos de trabajo de 300 mm de diámetro; se reduce de 2.0 a 1.5 a 1.0 a 0.7 mm. La velocidad es de 120 m/min en el primer bastidor, y se eleva sucesivamente en proporción al incremento de la longitud de la tira. Un lubricante con base de aceite proporciona un coeficiente de fricción de 0.05. Prepare una hoja de cálculo para obtener en cada bastidor: (*a*) la velocidad, (*b*) esfuerzo de fluencia (tome en cuenta el endurecimiento progresivo por deformación del material), (*c*) la fuerza del rodillo, (*d*) la potencia neta requerida. (*e*) Convierta las respuestas a unidades USCS. (*f*) Explique si hay peligro de defectos internos. Justifique su punto de vista.

9C-27 Explore el efecto del diámetro del rodillo sobre la fuerza y la potencia de laminado para la última pasada (1.0 a 0.7 mm) del problema 9C-26, al laminar en un molino de dos rodillos ($D = 800$ mm), de cuatro ($D = 30$ mm) y en uno Sendzimir ($D = 30$ mm).

9C-28 Una tira se lamina en frío en un molino tándem. Las reducciones ocurren en cuatro bastidores, desde 0.6 a 0.45 a 0.3 a 0.2 y a 0.14 mm. (*a*) Calcule la deformación de ingeniería y la natural para cada pasada. (*b*) Obtenga la deformación en una sola pasada de 0.6 a 0.14 mm. (*c*) Sume las deformaciones de ingeniería del inciso (*a*) y compare el resultado con la deformación calculada en el inciso (*b*); repita esta operación para deformaciones naturales. (*d*) ¿Se pueden sumar las deformaciones de ingeniería? (*e*) ¿y las deformaciones naturales?

9C-29 Suponga que en el ejemplo 9-11 la presión máxima permisible de la matriz es de 70 MPa, y que la fricción y la geometría proporcionan un factor de multiplicación de la presión de $Q_p = 4$. Al diseñar el proceso, ¿cuál es la velocidad permitida de la prensa? (Note que la longitud larga de la sección aerodinámica resulta en una deformación plana.)

9C-30 Deduzca las ecuaciones (9-38*a*) y (9-38*b*).

9C-31 Retome el problema 9C-27. Calcule la fuerza del rodillo si se somete una tensión trasera igual a la mitad del esfuerzo de fluencia de entrada, y a una tensión frontal igual a la mitad del esfuerzo de fluencia de salida.

LECTURAS ADICIONALES (véase también el capítulo 8)

ASM Handbook, vol. 14, *Forming and Forging*, ASM International, 1988.

Wick, C., J.T. Benedict y R.F. Veilleux (eds.): *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, 4a. ed., vol. 2: *Forming*, Society of Manufacturing Engineers, 1984.

The Aluminum Extrusion Manual, Aluminum Extruders Council.

Byrer, T.G. (ed.): *Forging Handbook*, Forging Industry Association, 1985.

Davis, J.R. (ed.): *Tool Materials*, ASM International, 1995.

Ginsburg, V.: *High-Quality Steel Rolling*, Dekker, 1993.

Geleji, A.: *Forge Equipment, Rolling Mills and Accessories*, Akademiai Kiado, Budapest, 1967.

Hoffmann, E.G. (ed.): *Fundamentals of Tool Design*, 2a. ed., Society of Manufacturing Engineers, 1984.

Lange, K. (ed.): *Handbook of Metal Forming*, McGraw-Hill, 1985 (ahora publicado por la Society of Manufacturing Engineers).

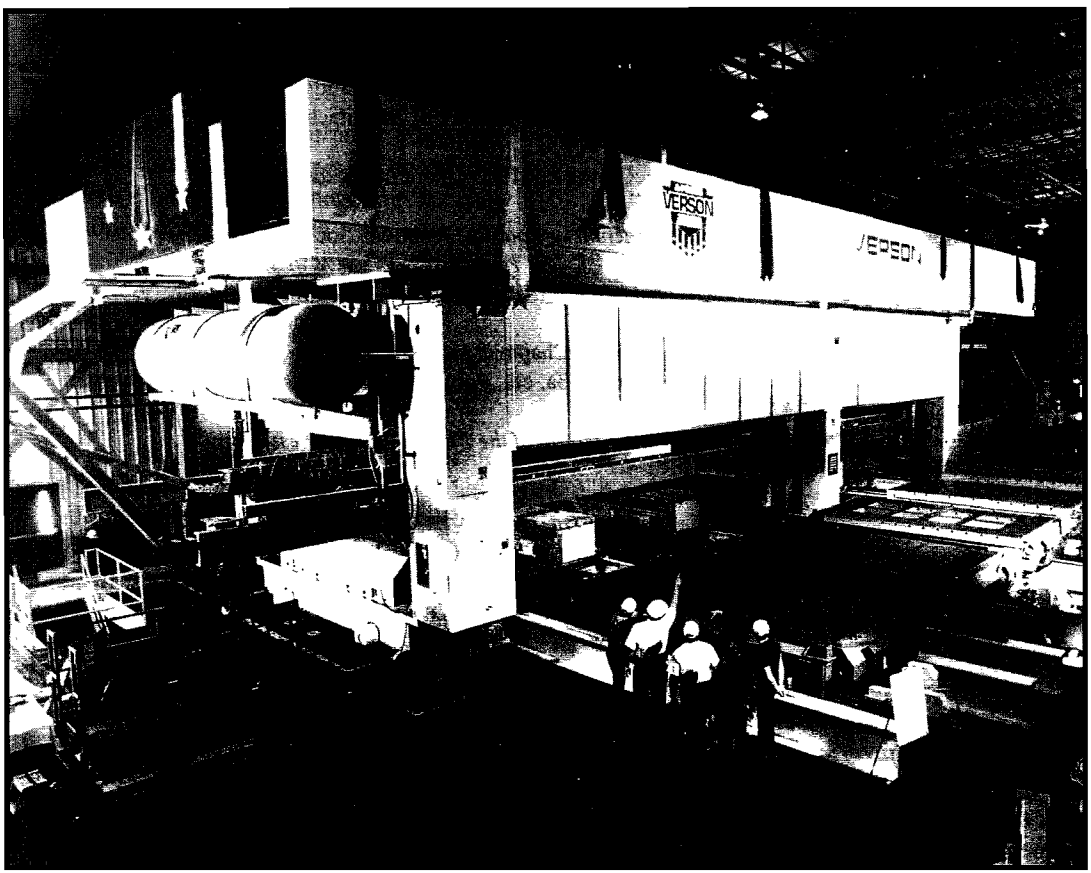
Laue, K. y H. Stenger: *Extrusion — Processes, Machinery, Tooling*, American Society for Metals, 1981.

Lenard, J.G., M. Pietrzyk y L. Cser: *Mathematical and Physical Simulation of the Properties of Hot Rolled Products*, Elsevier, 1999.

Magad, E.L. y J.M. Amos: *Tool Materials Management*, Chapman and Hall, 1995.

Open Die Forging Institute: *Open Die Forging Manual*, 3a. ed., Forging Industry Association, Cleveland, Ohio, 1982.

Pietrzyk, M. y J.G. Lenard: *Thermal-Mechanical Modelling of the Flat Rolling Process*, Springer, 1991.



Esta prensa de trasferencia gigante tiene 24 m de longitud, 10 m de ancho y 11.4 m de altura. Dos carros ejercen una fuerza total de 30 MN (3 300 tonf). Los travesaños deslizantes visibles en primer plano permiten el cambio completo de las cinco matrices de 2 por 3 m en sólo 5 minutos. Las partes de lámina de metal se mueven de matriz en matriz por medio de barras de transferencia controladas electrónicamente. (*Cortesía de la Verson Corporation, Chicago, Illinois.*)

capítulo

10

Procesos de conformado de lámina

En este capítulo aprenderemos a transformar lámina en una variedad ilimitada de productos, en procesos tales como:

El troquelado de "blancos" o "primarios" para su conformado posterior o ensamble inmediato

El doblado en prensas o en líneas formado por rodillos

El conformado por estirado en diferentes formas y sus limitaciones

El embutido profundo

El embutido combinado con estirado para fabricar piezas complejas para carrocerías de automóviles

Debido al bajo costo de la lámina de alta calidad cuando se produce en masa, el conformado de lámina ha logrado una posición preponderante entre los procesos de manufactura. Originalmente, la materia prima de este proceso eran hojas laminadas que se suministraban en tamaños limitados. Desde la aparición de los trenes en tándem para laminación continua, la lámina se ha producido en rollos de tira ancha. Éstos se pueden cortar ya sea en la laminadora misma, o en centros de servicio, para su fácil manejo en las instalaciones del fabricante secundario; sin embargo, hay una tendencia creciente a enviar rollos enteros (algunas veces cortados en tiras angostas) los cuales posteriormente se procesan en las prensas y en líneas de conformado del fabricante.

10-1 MATERIALES EN LÁMINA

Todas las aleaciones forjadas (Secc. 8-3) son susceptibles a ser trabajadas como lámina metálica. Sin embargo, aquí las propiedades críticas difieren un poco de las que se analizaron en la deformación tridimensional, en parte porque ahora la deformación ocurre sobre todo por tensión y no por compresión, y porque muchos productos de lámina son grandes y con extensas áreas visibles, siendo el aspecto superficial un factor de primera importancia.

10-1-1 Aceros

Una gran cantidad de acero se emplea en la condición de laminado en caliente para fabricar rines para automóviles, fundas de ejes, partes del bastidor automotriz, cilindros para gas bajo presión, etc.; pero otro número importante de láminas metálicas se lamina en frío. En la tabla 10-1 se muestran las propiedades de los aceros para lámina que se usan con mayor frecuencia.

Aceros al bajo carbono Los aceros (Secc. 8-3-1) que contienen hasta 0.15% de C se utilizan en grandes cantidades y se les identifica como aceros con bajo contenido de carbono. Los aceros de reverbero son adecuados para fabricar elementos estructurales y tuberías, pero no para el embutido profundo. Para este último propósito, se necesitan aceros o calmados. La ductilidad máxima se obtiene con material recocido.

1. *Acero efervescente.* La suma ductilidad y el costo relativamente bajo de los aceros efervescentes han hecho de los aceros de calidad comercial y calidad para embutido los favoritos para aplicaciones menos críticas. La superficie con muy bajo carbono es una ventaja en el esmaltado. El tamaño de grano se controla con extenso laminado en

Tabla 10-1 Propiedades típicas de las láminas de acero*

Acero	YS, MPa	TS, MPa	el., %	Valor *n*	Valor *r*
Laminado en caliente					
De calidad comercial	195-280	315-390	28-36		
De calidad de embutido (DQ)	180-250	295-365	34-42		
DQSK (especialmente calmado)	180-270	295-380	36-44		
Laminado en frío					
De calidad comercial	200-250	280-335	36-41		
DQ	175-225	280-320	38-43		
DQSK	160-200	270-320	40-45		
Libre de impurezas intersticiales (IF)	150	320	46	0.22	
Laminado en frío, ASTM A109					
Núm. 1, duro		550-690	-		
Núm. 2, medio duro		380-520	4-16		
Núm. 3, cuarto duro		310-450	13-27		
Núm. 4, laminado superficial		290-370	24-40		
Núm. 5, completamente suave		260-340	33-45		
Laminado en frío, SAE J2329†					
Grado 1	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
Grado 2	140-260	270	34	0.16	N/D
Grado 3	140-205	270	38	0.18	1.5
Grado 4	140-185	270	40	0.20	1.6
Grado 5	10-170	270	42	0.22	1.7
Acero de fase doble, laminado en caliente	440	630	29		
Laminado en frío	570-740	730-1 050	18-13		

* De varias fuentes.
† Propuesto.

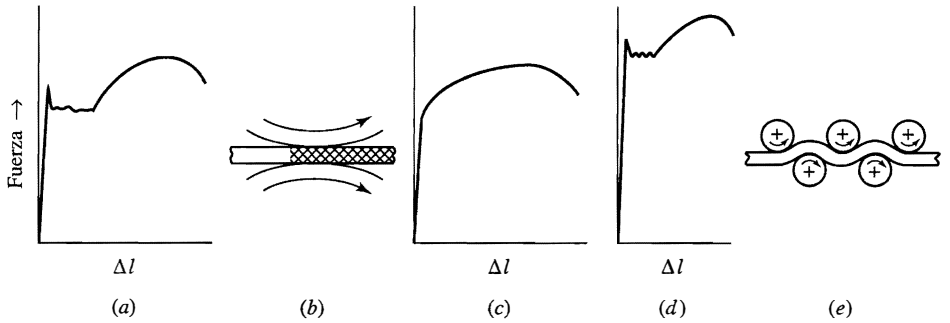


Figura 10-1 Los efectos indeseables de la (*a*) elongación en el punto de cedencia, se pueden ocultar por medio del laminado de temple (*b*). (*c*) Así, la elongación en el punto de cedencia no se presenta y las bandas de Lüders no son visibles; pero (*d*) el envejecimiento por deformación conduce a su regreso. (e) Así, las líneas de Lüders se pueden ocultar de nuevo a través del rectificado por rodillos.

frío (de 50 a 70%) seguido por un recocido (Fig. 8-10). Sin embargo, la presencia de carbono y nitrógeno se traduce en elongación en el punto de fluencia (Fig. 10-1*a*) y en marcadas deformaciones inaceptables por estrangulamiento. Por lo tanto, comúnmente se da una *pasada de temple* a la tira, es decir, existe una reducción por laminado ligero, del orden de 1% o menos (Fig. 10-1*b*). Es menor que la deformación en el punto de cedencia, que altera muy poco la ductilidad, pero produce bandas de Lüders, muy finamente espaciadas, de manera que en la subsiguiente deformación por tensión no hay punto de cedencia (Fig. 10-1*c*) y no aparecen bandas visibles. Sin embargo, si el material se almacena antes del estirado, el envejecimiento por deformación ocurre en algunas semanas o meses (dependiendo de la composición y de la temperatura de almacenamiento), la ductilidad se reduce y reaparece la deformación de punto de cedencia (Fig. 10-1*d*). El *nivelado con rodillos* (Fig. 10-1*e*) flexiona a la tira alternativamente y ayuda a desvanecer las bandas de Lüders a través de un mecanismo similar al laminado de temple, a expensas de una reducción de la ductilidad.

2. *Acero calmado.* El acero calmado, especial con calidad para estirado (DQSK) tiene propiedades uniformes y valores n y r elevados; es el indicado cuando se van a hacer estirados o embutidos severos (por ejemplo, el cárter del aceite de un motor de automóvil) o cuando el almacenamiento es inevitable. El acero calmado también contiene carbono y nitrógeno, pero el nitrógeno se combina con aluminio dando un compuesto; el carbono permanece en una forma que permite condensación sobre las dislocaciones. La lámina recocida nuevamente muestra elongación en el punto de cedencia (Fig. 10-1*a*), pero el laminado de temple (Fig. 10-1*b*) elimina permanentemente el punto de cedencia (Fig. 10-1*c*); el carbono no se difunde a los sitios de dislocación, a menos que el acero se caliente hasta 120°C. Estos aceros se pueden procesar a valores elevados de r.

3. *Acero libre de impurezas intersticiales.* El contenido de carbono se reduce a niveles muy bajos, y el nitrógeno se limita al alearse con pequeñas cantidades de Nb o Ti. No hay elongación en el punto de cedencia, la YS es baja y n es alto.

Ya que las propiedades como YS, TS, el., K, n y r son relevantes en el desempeño del conformado de metales y para hacer modelos matemáticos, las nuevas normas respecto a aceros se basan en estos valores. (Fuente: J.R. Fekete, *SAE Paper 970715*.)

Aceros de alta resistencia Ya se mencionaron en la sección 1-3 las necesidades que condujeron a reducir el peso de los automóviles. El calibre más delgado se compensa con una mayor resistencia, de aquí que la búsqueda para obtener masa reducida apresure el desarrollo de materiales más resistentes. Se utilizan todos los mecanismos para aumentar la resistencia:

1. *Lámina conformada en frío.* El endurecimiento por deformación es el mecanismo menos costoso; para incrementar la resistencia de un metal y, si es posible, el conformado de lámina de metal se diseña de manera que la pieza terminada reciba un considerable trabajo en frío. Si la materia prima (la lámina) ya viene endurecida por deformación, la ductilidad remanente (Figs. 8-7 y 8-8*a*) puede ser demasiado pequeña, excepto para deformaciones muy ligeras.

2. *Lámina parcialmente recocida.* Una mayor ductilidad, combinada con una resistencia razonable, se obtiene por medio de un extenso laminado en frío, seguido del recocido de recuperación (Fig. 8-9).

3. *Lámina recocida.* El refinamiento del grano es un medio eficaz para incrementar la resistencia (Fig. 6-18). Un extenso laminado en frío, seguido de la recristalización (Fig. 8-10) se puede aplicar a todos los materiales.

4. *Acero endurecido por solución.* Los aceros endurecidos por solución sólida con Mn, P o Si, se endurecen más rápidamente por deformación.

5. *Aceros endurecibles por horneado.* Normalmente reciben laminado de temple; después de su conformado experimentan un envejecimiento rápido durante el horneado de la pintura, resultando en una ganancia de 30 a 40 MPa en resistencia debida a la condensación de una atmósfera de C. Las ganancias del envejecimiento por deformación se pueden maximizar incrementando el contenido de nitrógeno.

6. *Aceros de fase doble.* Los contenidos mayores de carbono, necesarios para el tratamiento térmico de temple y revenido (Secc. 6-4-3), son útiles en los aceros para resorte pero reducen demasiado la ductilidad del acero para embutido profundo. Sin embargo, los aceros al bajo carbono con 1.4% de Mn se pueden recocer para producir una estructura que consiste en ferrita endurecida por la martensita dispersa. Esos aceros de fase doble tienen una baja resistencia a la cedencia, lo que es una ventaja cuando la recuperación elástica es inaceptable; al mismo tiempo, el endurecimiento rápido por deformación durante el trabajo incrementa la resistencia (hasta TS = 1 000 MPa) en el producto conformado.

7. *Aceros de alta resistencia y baja aleación (HLSA).* Se emplean cada vez más en vehículos y en otras estructuras. Una diferencia importante que se debe observar es que su razón $\sigma_{0.2}/E$ elevada conduce una recuperación elástica grande.

Aceros recubiertos Gran parte del metal en lámina se forma con recubrimientos preaplicados que mejoran las propiedades de servicio o la apariencia de las partes terminadas.

1. *Hojalata.* La lámina de acero recubierta de estaño es resistente a la corrosión siempre y cuando la capa de estaño esté libre de ralladuras; la no toxicidad del Sn hace a la hojalata adecuada para recipientes de alimentos.

2. *Lámina galvanizada.* Un recubrimiento de zinc protege al acero a través de la corrosión preferida (o de sacrificio) del zinc; de esta manera, incluso un recubrimiento dañado puede proteger. En el pasado, la lámina galvanizada se usó principalmente para techumbres, ductería y en aplicaciones similares de baja tecnología; ahora se ha convertido en el principal material para las carrocerías de automotores y para la fabricación de aparatos electrodomésticos (vea su crecimiento en la tabla 8-1). El zinc se aplica pasando la tira por Zn fundido (*galvanizado de baño caliente*) o por electrodeposición (*electrogalvanizado*). El calentamiento de una capa de zinc de baño caliente hasta alrededor de 500°C por un tiempo controlado la convierte en una aleación de Fe-Zn (*galvanorrecocido*). Existe una variedad de otros sistemas de recubrimiento (por ejemplo, recubrimientos de Zn-Al) que realizan funciones similares. Las características de fricción de las láminas recubiertas son muy diferentes a las del metal desnudo, por lo que se deben elegir lubricantes para minimizar el agarre así como la fricción. Algunas láminas se tratan posteriormente (por ejemplo, la galvanorrecocida se fosfatiza previamente) para mejorar su comportamiento.

3. *Placa galvanizada con plomo y estaño.* La lámina recubierta de plomo resiste la corrosión en algunos medios para los que el zinc no ofrece protección pero, debido a la toxicidad del Pb, la placa está limitada a aplicaciones no relacionadas con alimentos; sin embargo, se restringe cada vez más aún en las aplicaciones permisibles.

4. *Lámina recubierta de aluminio.* Una aleación de Al-Fe que se forma a temperaturas elevadas protege de la corrosión proveniente de gases calientes, de esta manera la lámina es adecuada para intercambiadores de calor, sistemas de escape de automóviles, partes de parrillas, etcétera.

5. *Lámina prepintada.* Los recubrimientos de pintura así como películas poliméricas más gruesas (plásticos, como los vinilos) ofrecen tanto protección como un acabado agradable. Si la lámina ha recibido un tratamiento previo adecuado y se conforma con cuidado, los recubrimientos permanecen adheridos a la superficie. La necesidad de un acabado de pintura se elimina, en virtud de que la calidad de los recubrimientos a menudo es superior a los acabados de pintura que se aplican después del formado, obteniéndose así ahorros.

Aceros inoxidables Una alta capacidad de endurecimiento por deformación y por tanto una formabilidad excelente, combinadas con resistencia a la corrosión, hacen de los aceros austeníticos la elección adecuada para el equipo para procesamiento de alimentos y de otros productos altamente deformados, como los fregaderos de cocina, cambiadores de calor y el equipo para procesos químicos. Los aceros ferríticos y martensíticos menos costosos se usan cuando su menor ductilidad y resistencia a la corrosión son aceptables.

10-1-2 Metales no ferrosos

Ya se mencionó que el cobre, sobre todo los latones, se encuentran entre los materiales más fácilmente conformables, y que el control de la aleación y del tamaño de grano es

rutinario. En las aleaciones de aluminio, el reto es la fluencia serrada (especialmente en las aleaciones de Al-Mg de serie 5000), que provoca a marcas superficiales inaceptables. Las aleaciones endurecidas por precipitación (serie 6000) están libres de este problema. También se benefician del procesamiento termomecánico: cuando se trabajan en la condición envejecida naturalmente (T4), ocurre u endurecimiento adicional durante el ciclo de horneado de la pintura. La lámina de aluminio es el principal material de construcción de las aeronaves subsónicas y tiene aplicación en automóviles (principalmente capacetes y cofres).

10-1-3 Topografía superficial

Para muchas aplicaciones, las características de rugosidad de la lámina son críticas. Aunque pueda parecer que la lámina debe ser tan lisa como sea posible, en realidad se necesitan los límites superior e inferior de la rugosidad altamente controlados por dos razones: primero, la rugosidad ayuda a adherir la pintura, por lo que afecta la apariencia superficial del producto terminado, pero las asperezas de una lámina demasiado rugosa se mostrarían a través de la película de pintura. Segundo, una superficie muy lisa no atraparía suficiente lubricante; el contacto lámina-matriz resultaría en una soldadura en frío y agarre de la herramienta; así, las piezas prensadas se tendrían que rechazar debido a estrías en la superficie. Sin embargo, en una superficie muy rugosa habría muy pocas asperezas sobre las que la presión de prensado se pueda distribuir y no se podría lograr el flujo controlado del metal en la matriz. Una orientación aleatoria de las características superficiales es preferible por razones de apariencia, y esencial para asegurar un estirado igual en todas las direcciones. La rugosidad usual es de 1-1.5μm R_a con 3-6 picos/mm. La técnica más difundida para producir esas superficies es dar un acabado con rodillos erosionados aleatoriamente con arena (Fig. 3-23*b*). Más recientemente, los rodillos están *texturizados*: se forman cráteres en un patrón predeterminado por medio de un haz de láser, o por una descarga eléctrica.

10-2 CLASIFICACIÓN

Aun cuando este capítulo está dedicado al conformado de lámina, algunos de los procesos básicos son también aplicables a alambres, a las barras, a las secciones laminadas o extruidas, y al tubo (Fig. 10-2). La mayor parte de las operaciones se llevan a cabo en frío; el calentamiento sólo es necesario para propósitos especiales (Secc. 10-9). Muchas veces, la producción de una pieza de lámina de metal incluye más de una operación; en la figura 10-2 se proporcionan líneas de flujo simplificadas.

10-3 CIZALLADO

Sin importar el tamaño de la pieza que se va a producir, el primer paso abarca el corte de la lámina o de la tira en formas apropiadas por medio de cizallas o guillotinas. La

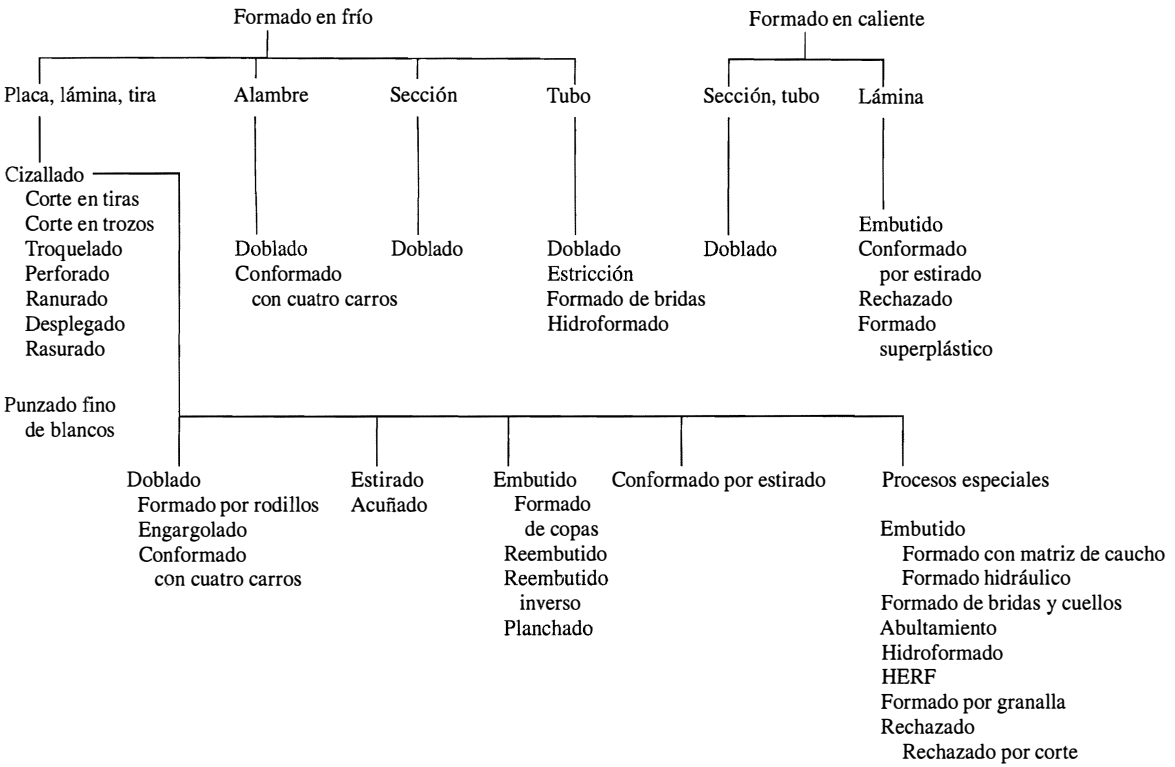


Figura 10-2 Clasificación general de los procesos de conformado de lámina de metal. (*Adaptada de J.A. Schey, ASM Handbook, vol. 20, Materials Selection and Design, ASM International, 1997, p. 691.* Se reproduce con autorización.)

terminología es muy descriptiva: el corte de una lámina a lo largo de una línea recta se llama simplemente *cizallado*. El corte de una tira larga estrecha mediante cuchillas rotatorias se denomina *cizallar* (Fig. 10-3*a*), y con frecuencia se rea iza en centros de servicio donde los rollos de ancho completo que provienen de las laminadoras se dividen para su envío a las plantas de trabajo de lámina de metal. Una parte contorneada (circular o de forma más compleja) se corta entre un punzón y una matriz en una prensa en el proceso de troquelado (Fig. 10-3*b*). El mismo proceso se usa para remover zonas no útiles de una lámina, pero entonces se llama *punzonado* (Fig. 10-3*b*) de un agujero. Las piezas individuales se fabrican por *corte en trozos* (Fig. 10-3*c*) por *división* (Fig. 10-3*d*). A los cortes en los bordes de la lámina se les llama *muescas*, y un agujero parcialmente cortado, sin remoción de material, se hace por *desplegado* (Fig. 10-3*e*). Una parte contorneada se puede obtener mediante una serie de pequeños cortes repetidos en el proceso de mordisqueado ("niblado"). Los productos embutidos se terminan *recortando* el material en exceso (Fig. 10-3*f*).

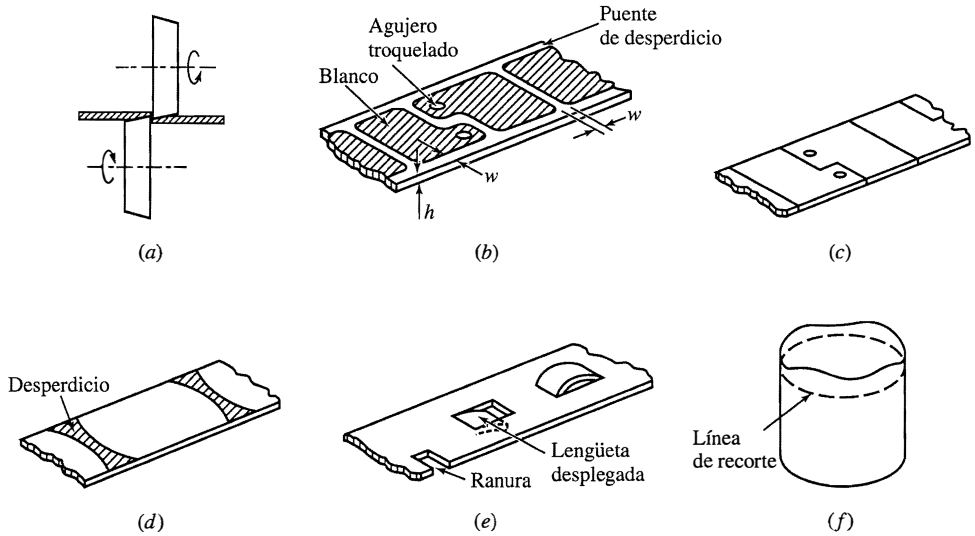


Figura 10-3 Diversos procesos de corte: (*a*) corte en tiras con cuchillas rotatorias; (*b*) punzonado y troquelado; (*c*) corte en trozos; (*d*) partido; (*e*) ranurado y desplegado, y (*f*) recorte.

10-3-1 Proceso de cizallado

El proceso de separar partes adyacentes de una lámina por medio de la fractura controlada no se puede describir como deformación puramente plástica o como maquinado. La lámina se coloca entre los filos de las cizallas, en el caso de estampado de blancos entre un *punzón* y una *matriz* (Fig. 10-4). Los sucesos que ocurren durante la carrera de la prensa se pueden identificar en el registro de la fuerza del punzón como función de la carrera (Fig. 10-5), así como mediante una inspección de las superficies de corte.

Al penetrar los filos de la herramienta, impelen a la lámina es hacia la matriz, y la deformación plástica se traduce en un redondeado de los bordes del blanco. A continuación ésta se empuja al blanco hacia dentro de la matriz, por medio de una deformación plástica análoga a la extrusión, indicada por la *zona con bruñido paralelo* en la pieza, y se caracteriza por fuerzas que se incrementan continuamente. Después de una deformación crítica, se generan grietas formando un ángulo pequeño con la dirección de corte, por lo general primero en el borde de la matriz. Cuando estas grietas se unen, el cizallado se completa y se reduce la fuerza de corte (Fig. 10-5), aun cuando los filos de la herramienta de corte sólo se han movido parcialmente a través del espesor de la lámina (Fig. 10-4*a*). La *fractura superficial* no es perfectamente perpendicular a la superficie de la lámina y presenta alguna rugosidad; no obstante, el acabado es aceptable para muchas aplicaciones. La pieza queda suspendida en la matriz y debe ser empujada por el punzón más allá de la parte paralela *de la matriz* (como se indica en la Fig. 10-4*b*).

La calidad de la superficie del corte depende en gran medida de la separación entre los dos filos de corte. Con una tolerancia muy pequeña, las grietas, que se originan desde los bordes de la herramienta, no se unen; entonces el corte se completa en un

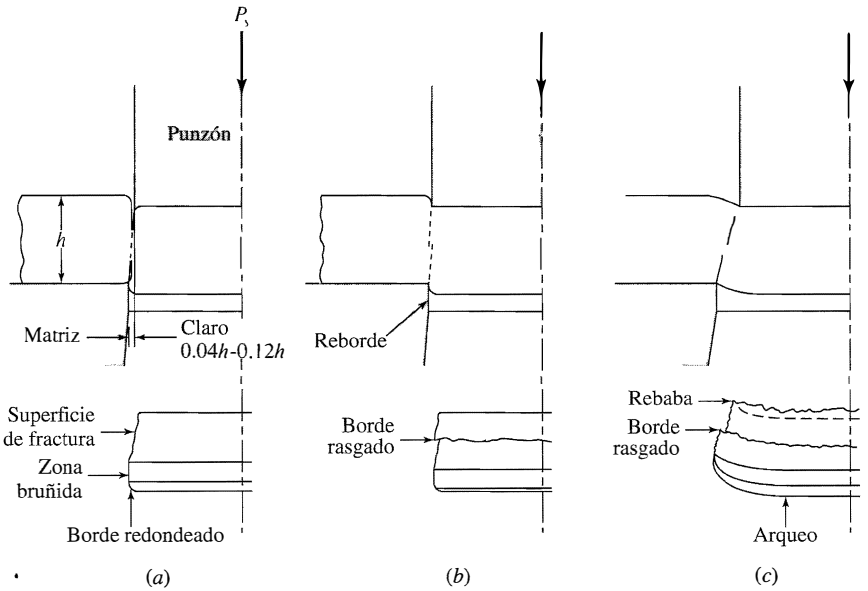


Figura 10-4 Las piezas cortadas con acabado aceptable se producen cuando (*a*) el corte se hace con un claro óptimo. (*b*) La falda del borde rasgado fabricada con un claro pequeño y la rebaba producida con un claro excesivo son indeseables (*c*).

proceso secundario de desgarramiento, produciendo una orilla dentada aproximadamente a la mitad del espesor de la lámina (Fig. 10-4*b*). Una tolerancia excesiva permite una deformación plástica extensa, la separación se retrasa y la tensión produce una aleta larga (*rebaba*) (Fig. 10-4*c*).

Durante la cizallada, de miles de piezas los filos de la herramienta se desgastan, se redondean y la rebaba se forma aún con la tolerancia óptima. El borde dentado de la rebaba, con sus raíces afiladas, actúa como un concentrador de esfuerzos (Secc. 4-1-6); este efecto dañino se hace evidente en la disminución de la elongación de las probetas sometidas al ensayo de tensión axial (Fig. 10-5*c*). La rebaba inicia la fractura durante el proceso de conformado subsiguiente o en el servicio de la pieza. Por tanto, la elección adecuada de la tolerancia y el mantenimiento regular de la herramienta son aspectos vitales del proceso. Una tolerancia pequeña desgasta más rápido a la herramienta; de ahí que se obtiene un ahorro mayor cuando la tolerancia se escoge tan grande como lo permitan las especificaciones para la aplicación de la pieza. Basados en la experiencia, la tolerancia se considera de entre 4 y 12% del espesor de la lámina (un valor pequeño se usa en un material más dúctil).

10-3-2 Fuerzas

Se puede estimar fácilmente la capacidad de la prensa requerida para el cizallado convencional. Como la deformación se concentra en una zona muy angosta con marcado

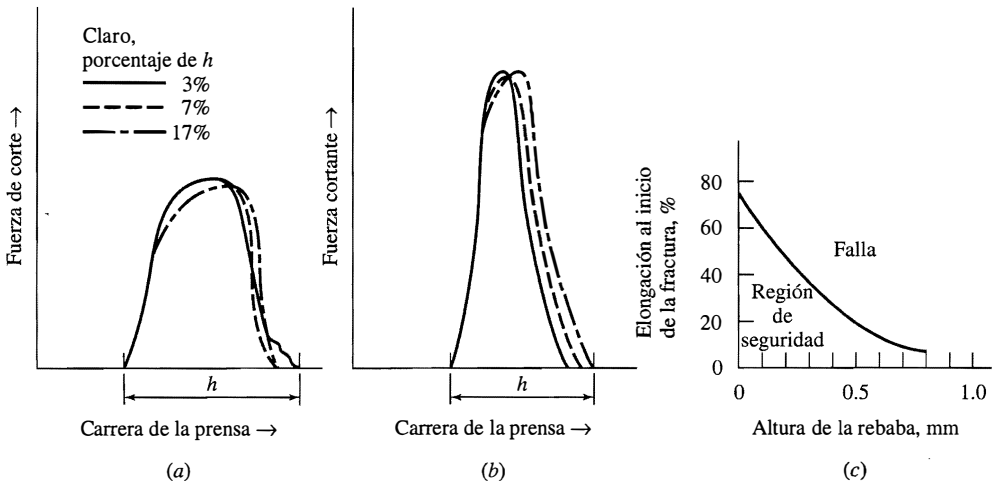


Figura 10-5 La fractura total empieza después de que los bordes de corte penetran (*a*) más de la mitad del espesor de la lámina cuando se cizallan materiales suaves; pero comienza antes en materiales duros (*b*). (*c*) La rebaba producida en el corte de blancos reduce la elongación obtenible en la deformación subsiguiente por tensión [*Parte (c) según S.P. Keeler, Machinery* **74**: *101 (1968).*]

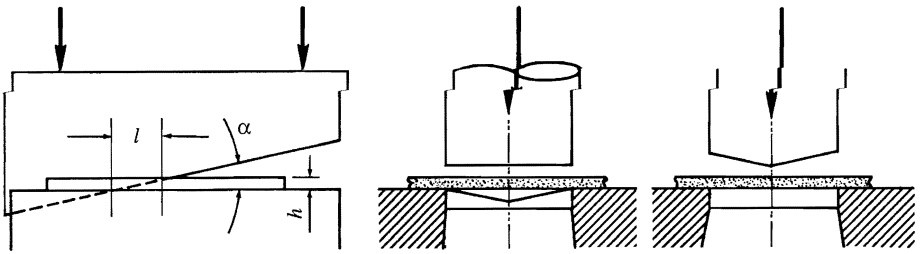
endurecimiento por deformación, la fuerza máxima puede deducirse a partir de un esfuerzo cortante determinado en forma empírica, multiplicado por el área de la sección transversal que se va a cortar. El esfuerzo cortante disminuye con el incremento de la separación entre filos, pero los valores promedio se pueden encontrar en manuales o tomar como una fracción C_1 de la TS. De esta manera, la *fuerza de corte* P_s, es

$$P_s = C_1(\text{TS})\ hl = C_1 K\left(\frac{n}{e}\right)^n hl \qquad \textbf{(10-1)}$$

donde h es el espesor de la lámina, l la longitud del corte, y C_1 vale 0.85 para materiales dúctiles y 0.65 para los menos dúctiles (o 0.7 en promedio). La TS de la mayoría de los materiales es un dato conocido (como en las tablas 8-2 y 8-3). [Si sólo se conocen los valores de K y n, la TS se puede calcular aproximadamente, sustituyendo en la ecuación $\text{TS} = K(n/e)^n$, donde e es la base del logaritmo natural.]

Cuando los bordes de corte son paralelos, l es la longitud total del contorno del corte. Esto puede llevar a fuerzas muy elevadas, que se pueden reducir posteriormente al colocar ambos bordes en ángulo uno respecto al otro (en un *ángulo de corte* o *inclinación*, como en una guillotina, Fig. 10-6*a*); de esta manera sólo es necesario tomar en cuenta la longitud instantánea cortada l. En el troquelado de blancos se puede permitir que el *puente de desperdicio* se flexione, y la pendiente está en la matriz (Fig. 10-6*b*). En el troquelado, el fragmento de desperdicio se puede doblar, y la inclinación está en el punzón (Fig. 10-6*c*).

La *energía de corte* E_s que debe suministrar la prensa está dada por el área bajo la curva fuerza-desplazamiento (Fig. 10-5*a* y *b*). Un valor aproximado se puede obtener de



(*a*) (*b*) (*c*)

Figura 10-6 Las fuerzas de corte se pueden reducir dando un ángulo de inclinación o de corte a: (*a*) las cuchillas en una guillotina; la matriz en el troquelado (*b*); o en el punzón en el perforado (*c*).

$$E_s = C_2 P_s h \qquad \textbf{(10-2)}$$

donde $C_2 = 0.5$ para materiales suaves (Fig. 10-5*a*), y 0.35 para materiales duros (Fig. 10-5*b*).

Ejemplo 10-1

Se troquelarán blancos circulares de $d_0 = 200$ mm de diámetro a partir de una lámina de aleación de aluminio, recocida 5052 de $h = 3$ mm de espesor. ¿Cuáles deben ser la fuerza y energía suministradas por la prensa?

De la tabla 8-3, TS = 190 MPa.

De la ecuación (10-1), $P_s = 0.85(190)(3)(200\pi) = 304$ kN.

De la ecuación (10-2), $E_s = 0.5(304)(3) = 457$ Joules

Ejemplo 10-2

Una placa de acero dulce de 5 mm de espesor y 2 m de ancho se corta en dirección del ancho. Estime la fuerza de corte para realizar este proceso (*a*) con cuchillas paralelas y (*b*) en una guillotina con corte a 6°.

De la tabla 8-2, para acero 1015, TS = 450 MPa.

(*a*) La longitud que se va a cortar $l = 2$ m; $P_s = 0.85(450)(0.005)(2) = 3\,830$ kN.

(*b*) De la geometría de la operación (Fig. 10-6*a*), $l = h/\tan\alpha = 5/0.105 = 47.6$ mm. De aquí que $P_s = 0.85(450)(5)(47.6)$
que se obtendrá.

10-3-3 Perfeccionamiento de la calidad del corte

Hay una gran demanda de procesos de corte que produzcan bordes limpios, perpendiculares a la superficie de la lámina y de un acabado superficial lo suficientemente liso para permitir el uso inmediato de las piezas; por ejemplo, como engranes en maquinaria ligeramente cargada y miembros en contacto con tolerancias cerradas en instrumentos.

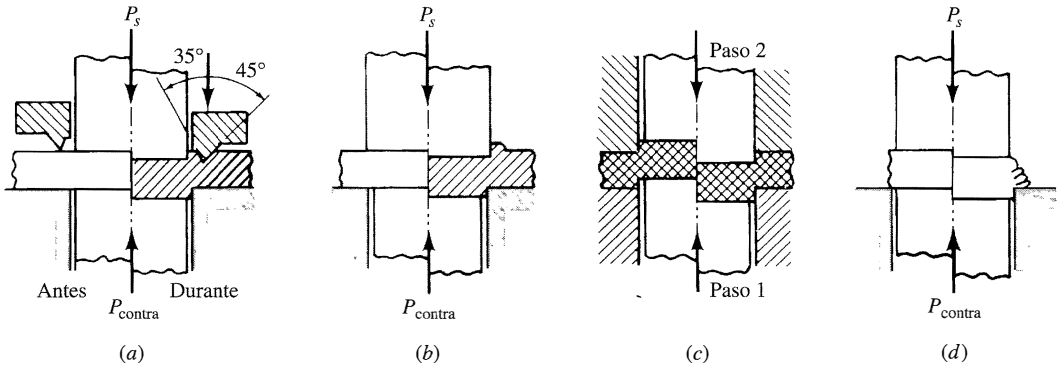


Figura 10-7 Las piezas con bordes terminados se pueden producir por: (*a*) troquelado de precisión; (*b*) al troquelar con claro negativo; (*c*) contrapunzonado, o (*d*) al rasurar una parte previamente cortada.

Varios métodos son adecuados; en la mayor parte de ellos, un *contrapunzón* coopera con el punzón principal y como un beneficio adicional elimina la curvatura de la pieza.

1. Ya se vio que la fractura se puede retrasar al imponer una presión hidrostática elevada (Fig. 4-7). Este principio se aprovecha en *el punzonado de precisión* o *punzonado fino* (Fig. 10-7*a*). Un portapieza con forma especializada (*anillo en V, anillo de choque*) se presiona sobre la pieza justo antes de comenzar el corte; así, la zona de deformación se mantiene en compresión y todo el espesor se cizalla plásticamente.

2. También se mantiene una presión hidrostática elevada al *cizallar con una separación negativa entre filos*, y en realidad la parte se empuja (extruye) a través de la matriz de corte (Fig. 10-7*b*).

3. En el cizallado en ambos lados (*contrapunzonado*) la lámina se sujeta entre dos matrices (Fig. 10-7*c*). Los punzones penetran en una dirección hasta que se inician las grietas y luego el corte se completa en la otra dirección.

4. Una pieza troquelada convencionalmente se puede *terminar por rasurado* en una matriz dispuesta con claros estrechos (Fig. 10-7*d*). Esto equivale a cortar con una herramienta con ángulo de barrido cero (Secc. 16-1-1).

5. La calidad se mejora en gran medida en el *corte a alta velocidad*, cuando ésta excede a la de la propagación de las dislocaciones en el metal. Ello requiere velocidades muy elevadas, del orden de 30 m/s.

10-3-4 Procesos

El punzón y la matriz están hechos de acero para herramientas o, para las corridas más grandes, de WC sinterizado (tabla 9-3). El puente de desperdicio (*esqueleto* o, en el perforado, la pieza) se atasca en el punzón (o en la matriz) y se debe separar con placas de separación fijas, soportadas por resortes o accionadas por levas (Fig. 10-8), o con

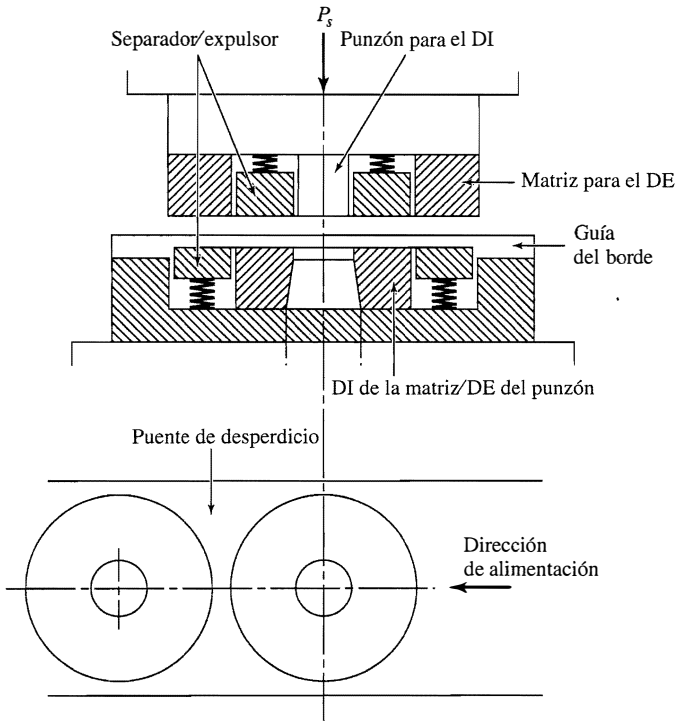


Figura 10-8 Una matriz compuesta realiza todos los cortes simultáneamente.

una almohadilla de espuma plástica (usualmente poliuretano). La elección del proceso se rige sobre todo por las características y la cantidad del producto:

1. Los agujeros de tamaño y forma estándar se pueden cortar en *prensas punzonadoras* de propósito general con herramientas intercambiables. El cambio de herramienta se acelera con los cambiadores rotatorios de herramientas de las *prensas revólver*. Las prensas controladas numéricamente (*máquinas de CNC de troquelado*), equipadas con una mesa *x-y* y depósitos de herramientas, permiten la ubicación rápida y exacta de la lámina y la selección del punzón y de la matriz; de esta manera hacen factible la producción a bajo costo y flexible de cantidades pequeñas y medias. Los agujeros mayores se pueden hacer por medio del corte repetido con el mismo punzón o a través del "mordisqueado", comúnmente conocido como "niblado".

2. Las geometrías complejas se pueden crear en *matrices compuestas* que trabajen simultáneamente varios bordes de corte (Fig. 10-8).

3. En los troqueles *progresivos* se realizan varias operaciones de punzonado y estampado en secuencia, estando los elementos de la matriz sujetos en un portatroquel común, mientras que la tira se alimenta en incrementos exactos (*con topes*). Con frecuencia, el estampado y el perforado se encuentran entre los muchos pasos que se siguen en los troqueles progresivos cuando los productos son complejos (Fig. 10-9). La

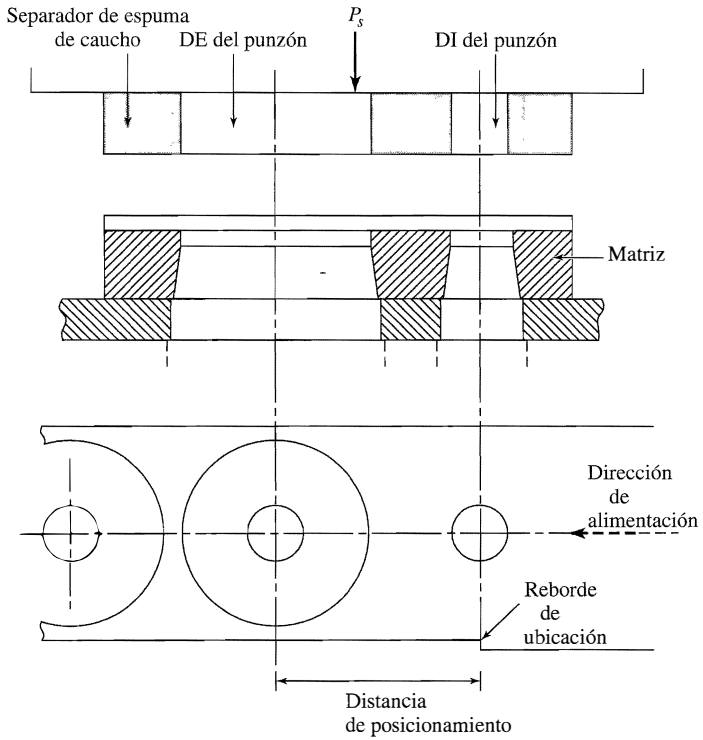


Figura 10-9 Una matriz progresiva realiza cortes diferentes en estaciones sucesivas (los elementos de la matriz para cortar el reborde de ubicación no se muestran).

productividad es alta, sólo limitada por la rapidez de alimentación del material en la troqueladora, y por la frecuencia de los impactos de la misma (algunas troqueladoras operan a varios cientos de impactos por minuto). Se usan troqueles múltiples para producir muchas piezas o agujeros, como en el estampado de círculos para la fabricación de latas o para hacer agujeros en láminas perforadas. Se usan matrices para laminaciones para perforar lámina para los núcleos de transformadores y motores eléctricos.

4. Las tasas de producción más altas se obtienen con el *perforado mediante rodillos*; la matriz y el punzón se ubican en las superficies de los rodillos.

5. Para cantidades menores de, digamos, algunos cientos de piezas, el costo de la matriz se puede disminuir si un mayor desperdicio de material es aceptable. En el *punzonado con matriz compresible por lo general de caucho*, la matriz convencional es ahora simplemente, una placa de acero cortada al tamaño adecuado, y la acción de corte ocurre presionando la lámina alrededor de esta matriz con un cojín de caucho (Fig. 10-10*a*). La parte sobresaliente de la lámina se dobla hacia abajo y se sujeta contra la placa de base por medio del cojín y el desgarre ocurre alrededor de los bordes de la matriz.

6. Para corridas cortas, una solución económica es la *matriz de regla de acero*. La "matriz" está hecha de tiras con borde biselado ("plecas") de acero al alto carbono o

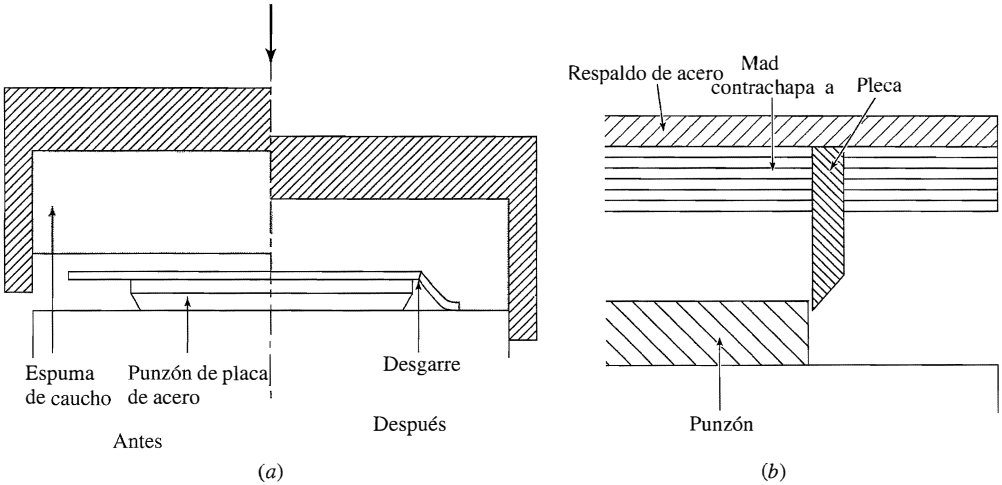


Figura 10-10 El troquelado y el perforado de bajo costo pueden obtenerse con: (*a*) un colchón de espuma de caucho o (*b*) una matriz con regla de acero.

para herramienta presionando fuertemente contra ranuras hechas en madera contrachapada rigidizada mediante una placa de acero (Fig. 10-10*b*). El punzón (*placa de la matriz, plantilla*) está hecho de acero cuando se corta metal.

7. Las celdas *de perforado* tienen una o dos prensas o centros de punzonado que trabajan en coordinación, por medio de un mecanismo de transferencia. La carga de la lámina, el cambio de herramienta, la transferencia de las piezas en proceso entre las máquinas y su descarga, están coordinadas por mecanismos automáticos flexibles.

8. El proceso básico de corte por cizallado se puede adaptar a cortes de alambres, barras, secciones y tubos como preparación para procesos posteriores. La calidad del corte se mejora proporcionando soporte para la pieza por cortar y aplicándole un esfuerzo de compresión (presión hidrostática) durante el corte.

9. Ha habido un desarrollo rápido de los métodos de corte, con el uso de las técnicas usuales en procesos de soldadura (rayos láser, haces de electrones, soplete de plasma, arco eléctrico, corte con oxígeno y gas combustible, Secc. 18-7-3, y con chorro de agua a alta velocidad). Combinados con mesas *x-y* (y algunas veces con prensas revólver), esos *centros de corte* controlados por computadora son extremadamente flexibles y productivos.

10-4 DOBLADO

Muchos componentes se conforman posteriormente por medio del *doblado* en uno o varios lugares.

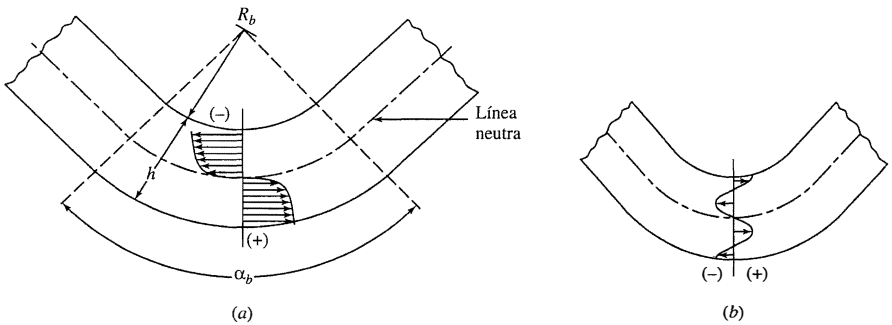


Figura 10-11 En el curso del doblado (*a*) toda la curva de esfuerzo-deformación unitaria es recorrida por el material; (*b*) los esfuerzos elásticos provocan la recuperación elástica y la retención de un patrón de esfuerzos residuales.

10-4-1 Proceso de doblado

Las características de este proceso son la tensión de las fibras externas y la compresión de las internas (Fig. 10-11). Para un espesor dado h de la lámina, las deformaciones por tensión y compresión se incrementan con la disminución del radio R_b (es decir, con la *disminución de la relación* R_b/h). Para que la pieza retenga su forma, la R_b/h debe ser lo suficientemente pequeña para lograr la plastificación de gran parte de la sección transversal de la lámina. Existe, como en la flexión elástica (Secc. 4-1-7), sólo una línea (la línea *neutra*) que retiene su longitud original.

Cuando se dobla con radios relativamente grandes, la línea neutra está en el centro; cuando se dobla con radios pequeños, se desplaza hacia el lado sometido a compresión, el eje de la pieza se alarga, y se preserva la constancia del volumen a través del adelgazamiento de la lámina. El incremento de longitud del eje de la pieza, usualmente se toma en cuenta para dobleces con $R_b < 2h$, en cuyo caso se supone que la línea neutra se localiza a un tercio del espesor de la lámina. Cuando la lámina es relativamente angosta ($w/h < 8$), también existe una contracción en el ancho w.

Ejemplo 10-3

La pieza que se muestra se va fabricar de una lámina de 3 mm de espesor. Encontrar la longitud de la tira.

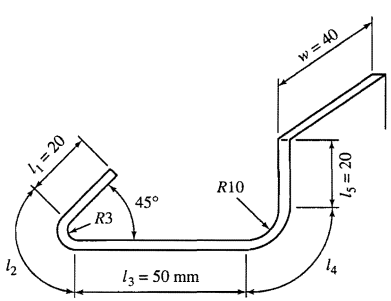


Figura ejemplo 10-3

Al doblar a un radio $R_b = 10$ mm, $R_d/h = 3.3$, de ahí que el plano neutro esté en el centro de la lámina; como el doblez es sobre un ángulo de 90°, $l_4 = 2\pi(R_b + 0.5h)90/360 = 2\pi(10 + 1.5)90/360 = 18.06$ mm.

Al doblar a un radio $R_b = 3$ mm, $R_b/h = 1$, por lo que la línea neutra está a 0.33 h; para un doblez de un ángulo de $180 - 45 = 135°$, $l_2 = 2\pi[3 + (0.33)(3)]135/360 = 9.4$ mm.

Así la longitud total inicial es $l = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 = 20 + 9.4 + 50 + 18.06 + 20 = 117.5$ mm. (Si se hubiera ignorado el desplazamiento de la línea neutra, l hubiera sido 118.7 mm.)

10-4-2 Límites del doblado

En correspondencia con los límites que se analizaron en la sección 8-2-7, el *radio mínimo de doblado* (el radio R_b de matriz más pequeño permisible o, más generalmente, la *razón mínima radio espesor* R_b/h), se puede definir de acuerdo con varios criterios.

1. La *cáscara de naranja* puede ser estéticamente indeseable, pero no es un defecto puesto que se puede evitar eligiendo un material de grano más fino.

2. La *estricción localizada* causa un debilitamiento estructural de la parte doblada. La estricción ocurre cuando la elongación en la fibra externa, e_t, excede la deformación uniforme del material e_u en la prueba de tensión uniaxial

$$e_t = \frac{1}{(2R_b / h) + 1} \leq e_u \qquad \textbf{(10-3a)}$$

Para materiales que obedecen la ley de potencia del endurecimiento por deformación, ecuación (8-4), $e_u = n$ y la deformación uniforme de ingeniería, e_u, se puede obtener de

$$e_u = (\exp n) - 1 \qquad \textbf{(10-3b)}$$

La relación se cumple mejor para aceros. Para la mayoría de los demás materiales se deberá usar la e_u real medida en el ensayo de tensión. Como la deformación se redistribuye a las zonas adyacentes durante el doblado, suele tolerarse una deformación un poco mayor. La rebaba actúa como un concentrador de esfuerzos y, si se encuentra en la superficie exterior (de tensión), conduce a una fractura muy prematura. Por lo tanto, si es posible, *la rebaba debe orientarse hacia el lado del macho.*

3. La *fractura* representa un límite absoluto. Esto está directamente relacionado con la reducción en el área q medida en el ensayo de tensión [ecuación (4-10) y tablas 8-2 y 8-3)]. El radio mínimo de doblado permisible se puede estimar para los materiales menos dúctiles a partir de la siguiente fórmula

$$R_b = h\left(\frac{1}{2q}\right) - 1 \quad \text{para } q < 0.2 \qquad \textbf{(10-4a)}$$

y para materiales dúctiles, debido al desplazamiento del radio neutro en dobleces de pequeño radio, de

$$R_b = h\frac{(1-q)^2}{2q - q^2} \quad \text{para } q > 0.2 \qquad \textbf{(10-4b)}$$

Un material de $q > 0.5$ por lo general se puede doblar a 180° (radio de doblez cero).

4. La *exfoliación y agrietamiento* en la superficie interior pueden ocurrir al doblar en radios muy agudos.

La anisotropía, cualquiera que sea su origen, afecta al doblado. Se ha visto que la orientación del grano en procesos de conformado (Secc. 8-1-7) resultan en mayor ductilidad en la dirección de laminación y suele ser más favorable doblar lámina con la línea de doblado orientada a través de la dirección de laminación. Un material texturizado de valor r bajo se adelgaza fácilmente (Fig. 8-6*a*); de esta manera se puede doblar con radios más agudos que un material con un valor r alto.

Ejemplo 10-4

La pieza del ejemplo 10-3 originalmente se fabricó de latón para cartuchos, recocido. Ahora se propone que, como una medida de ahorro de peso, se debe fabricar de una aleación de aluminio 5052-H34. ¿Se debe esperar algún problema?

Las propiedades relevantes para los dos materiales, obtenidos de la tabla 8-2 y del *Metals Handbook Desk Edition*, p. 6.33 y p. 6.35, son:

	Latón	5052-H34	5052-0	6061-T4
YS, MPa	100	215	90	145
TS, MPa	310	260	195	240
el., %	65	10	25	22
q, %	75			

El esfuerzo de cedencia es perfectamente adecuado. El doblez más agudo es $R_b/h = 3/3 = 1$; de la ecuación (10-3), sería deseable una elongación de $1/(2 + 1) = 33\%$. Como la elongación total del 5052-H34 sólo es de 10%, la elongación uniforme debe ser aún menor, y el material fallará en el doblado. Una lámina suave 5052-0 tal vez soportaría una elongación total de 25% debido a la redistribución de la deformación, pero el límite de fluencia es ligeramente bajo. Una aleación de aluminio 6061-T4 sería mejor, aunque el radio del doblez se tendría que aumentar.

10-4-3 Esfuerzos y recuperación elástica

El estado de esfuerzos es extremadamente complejo en el doblado. Las curvas esfuerzo-deformación unitaria, tanto a tensión como a compresión, son recorridas completamente en los lados sujetos a tensión y a compresión, respectivamente, del doblez. Esto significa que alrededor del plano neutro, los esfuerzos deben ser elásticos. Cuando la herramienta de formado se retira, el momento desarrollado por las componentes elásticas del esfuerzo causa una *recuperación elástica*, mientras que en la zona plastificada surgirá un patrón de esfuerzos residuales, como se ilustra en la figura 10-11*b*. La recuperación elástica disminuye deformación de la pieza, por cuyo motivo se incrementan tanto el ángulo como el radio de la pieza doblada (Fig. 10-12). La zona elástica es más extensa para un doblez relativamente suave (razón R_b/h grande) y para un material con

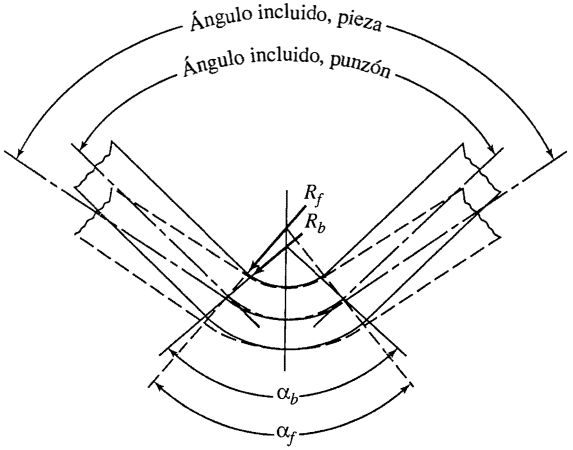


Figura 10-12 Dimensiones usadas para caracterizar la recuperación elástica.

una razón alta del esfuerzo de cedencia $\sigma_{0.2}$ respecto al módulo elástico E; por lo tanto, la recuperación elástica también cambia de acuerdo con la fórmula aproximada

$$\frac{R_b}{R_f} = 1 - 3\left(\frac{R_b}{h}\frac{\sigma_{0.2}}{E}\right) + 4\left(\frac{R_b}{h}\frac{\sigma_{0.2}}{E}\right)^3 \qquad \textbf{(10-5)}$$

donde R_b es el radio de la matriz de doblado, y R_f el radio que se obtiene después que se libera la pieza.

Como la longitud de la línea neutra no cambia, el ángulo después de la recuperación elástica, α_f, se puede obtener (en radianes) de

$$\alpha_f\left(R_f + \frac{h}{2}\right) = \alpha_b\left(R_b + \frac{h}{2}\right) \qquad \textbf{(10-6)}$$

La recuperación elástica establece un nuevo equilibrio de fuerzas, con una distribución de esfuerzos residuales, tipificada por un esfuerzo de compresión en la superficie exterior y por uno de tensión en la interior (Fig. 10-11*b*).

Se usan varias técnicas para contrarrestar la recuperación elástica.

1. Si la recuperación elástica para un material dado se conoce y si éste es de calidad y espesor uniforme, es factible compensar la recuperación elástica por medio de un *sobredoblado* (Fig. 10-13*a* y *b*). Ésta es la forma más básica de doblar, en la que no se impone ninguna presión de compresión en dirección del grosor de la lámina (*doblado al aire*).

2. La zona elástica se puede eliminar al final de la carrera por uno de dos medios. Primero, los dos extremos de la lámina se pueden sujetar antes de que el punzón toque fondo, así que el final de la carrera involucra el *estirado* de la lámina, causando cedencia por tensión en todo el espesor de la misma. En el segundo método, la nariz del punzón está conformada para *penetrar en* la lámina, de manera que la compresión plástica ocurra en todo el espesor de la misma (Fig. 10-13*c*).

3. Si se usa un *contrapunzón* con una presión controlada, se mantienen esfuerzos de compresión en la zona doblada durante todo el proceso (Fig. 10-13*d*). Como esto

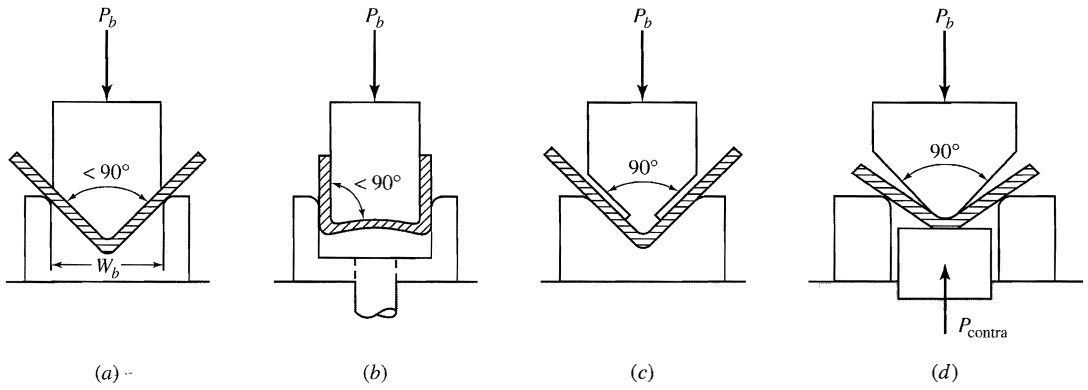


Figura 10-13 La recuperación elástica se puede neutralizar o eliminar: (*a*), (*b*) al sobredoblar, (*c*) con deformación plástica al final de la carrera, y (*d*) sometiendo la zona doblada a compresión durante el doblado. [*Parte* (*d*) *según V. Cupka, T. Nakagawa y H. Tyamoto, CIRP,* **22:** *73-74 (1973).*]

también tiene el efecto de imponer una presión hidrostática sobre la zona doblada, es posible un doblado más allá de los límites dados por la ecuación (10-4).

4. Puede requerirse doblar los materiales menos dúctiles a temperatura elevada, ya que la resistencia a la cedencia es menor y con ello la recuperación elástica también lo es.

Fuerza de doblado Un estimado simple de la *fuerza de doblado* en una matriz libre a 90°, se puede obtener de

$$P_b = \frac{\omega h^2(\text{TS})}{W_b} \qquad \textbf{(10-7)}$$

donde W_b es el ancho de la abertura de la matriz dado (Fig. 10-13*a*) y w el ancho de la tira (la longitud de la línea transversal a lo largo de la que tiene lugar la flexión).

Ejemplo 10-5

Cuál es la recuperación elástica al hacer un doblez a 90° en la pieza del ejemplo 10-3, si el material de la misma es (*a*) latón de cartucho recocido o (*b*) una aleación de aluminio 6061-T4. De la tabla 5-2, E (latón) = 140 GPa, E (Al) = 70 GPa. $R_b/h = 3.3$, y $\sigma_{0.2}$ se toma del ejemplo 10-4.

Así, para el latón, $R_b/R_f = 1 - 0.0071 + 0.0 = 0.9929$; para la aleación de aluminio, $R_b/R_f = 1 - 0.0205 + 0 = 0.9795$. La recuperación elástica es despreciable en el latón pero no en la aleación de aluminio.

Ejemplo 10-6

Estime la fuerza que se requiere para hacer el doblez a 90° en la pieza del ejemplo 10-3, suponiendo que está hecha de latón.

De la tabla 8-3, TS = 310 MPa. La abertura mínima de la matriz debe contener l_4 más alguna longitud recta (digamos, dos veces 10 mm). Así $W_b = 18 + 20 = 38$ mm. El ancho de la pieza es $w = 40$ mm; $h = 3$ mm. De la ecuación (10-7), $P_b = (40)(3)^2(310)/38 = 2\,937$ N. Es usual dar un factor de seguridad del 20% más, así la fuerza es 3.5 kN.

10-4-4 Métodos de doblado

El equipo que se utiliza para el doblado depende del tamaño, en mayor medida de la longitud, de la pieza por doblar.

1. Las *prensas mecánicas* pueden doblar longitudes cortas con altas tasas de producción, empleando matrices, como en la figura 10-13.

2. Las *prensas de cortina* son prensas especiales con camas muy largas. En ellas, se usan herramientas sencillas para conformar piezas complejas por medio del doblado repetido de una lámina larga (Figs. 10-14 y 10-16*a*). Los costos de las herramientas se reducen cuando una placa de espuma de poliuretano reemplaza a la matriz hembra. La ventaja de las prensas de cortina es que se puede producir una gran variedad de partes con un número limitado de herramientas. La deflexión elástica de las herramientas (el aumento de su ancho a la mitad del claro, debido a la fuerza de la prensa) resultaría en variaciones del ángulo de doblado, por lo tanto, la herramienta se debe hacer para que se doble sin abrirse en el centro. Esto se logra calzando la herramienta o, en las prensas modernas de cortina, por flexión mecánica o hidráulica, a menudo con base en las fuerzas de flexión calculadas. Junto con los alimentadores de lámina mecanizados, la prensa se presta al control computarizado, incluyendo un sensor en la parte posterior de la prensa para detectar la posición de la lámina. La compensación por la recuperación elástica se realiza con la ayuda de tablas empíricas o de la ecuación (10-6). Los esquemas de control más elaborados toman en cuenta las propiedades del material y las variaciones del calibre. En una aplicación, el ángulo de doblado se mide en la primera carrera; luego la fuerza se libera para obtener la recuperación elástica, y se efectúa una segunda carrera de compensación. En otros programas, la curva de esfuerzo-deformación unitaria en los rangos elástico y plástico se deduce de la información que se obtiene de los transductores de fuerza y desplazamiento, y mediante un algoritmo de control se calcula el sobredoblez requerido.

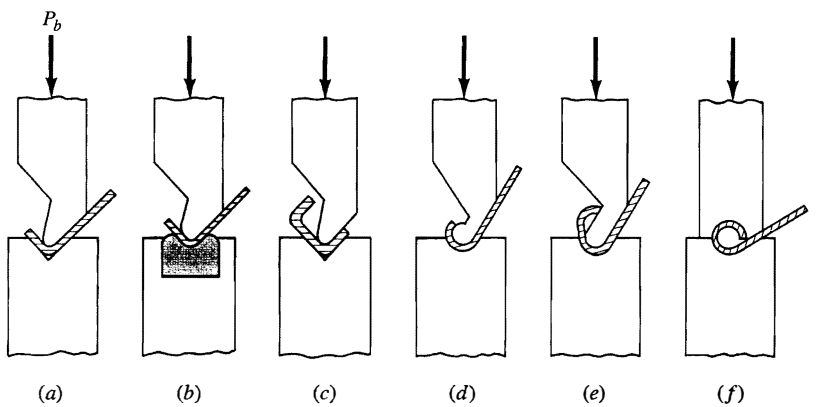


Figura 10-14 Formado en prensa de cortina de: (*a*) un ángulo de 90°; (*b*) igual pero con una matriz hembra de poliuretano; (*c*) un canal U, y (*d*)-(*f*) un reborde.

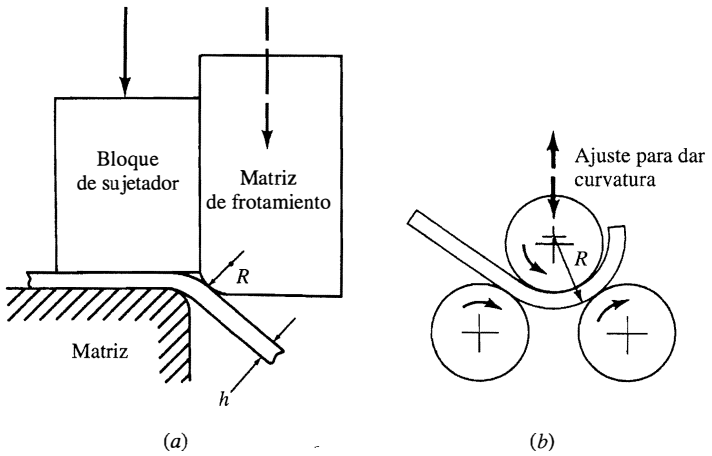


Figura 10-15 La lámina también se puede doblar con (*a*) una matriz deslizante o (*b*) rodillos de doblado (piramidales).

3. El *peinado* es un método alterno para doblar a lo largo de una línea recta (Figs. 10-15*a* y 10-16*b*). Para estimar la fuerza de doblado, W_b se puede considerar como $(2R + h)$.

4. Las *roladoras de tres rodillos* imparten una curvatura uniforme, pero ajustable, a la lámina, placa o perfil por medio del conformado con rodillos dispuestos en forma piramidal (Fig. 10-15*b*). Éste es un importante paso de preparación para fabricar anillos grandes y estructuras de placas soldadas.

5. El *conformado con rodillos* es un método de producción continua altamente productivo. Ahora el doblado se hace progresivamente, pasando la tira entre rodillos accionados y contorneados colocados en tándem. Un producto usual es la lámina corrugada. Para muchas otras formas se usan rodillos guía para prensar los lados de la pieza parcialmente conformada. Así, se pueden formar los tubos para la subsiguiente soldadura, y pueden formarse secciones que reemplazan a las laminadas o extruidas en caliente, así como formas complejas (como marcos de puertas) (Fig. 10-16*c*).

6. El doblado de perfiles y tubos es una actividad importante de manufactura. Los problemas en el doblado libre (por ejemplo, en las dobladoras piramidales por rodillos) usualmente son la distorsión y el pandeo de formas más complejas. Se obtienen mejores resultados cuando el perfil o tubo se enrolla alrededor de un *bloque de conformado*. El ajuste de la pieza a la geometría de éste se asegura *curvando bajo tensión*, al pasar un *rodillo de deslizamiento* o *bloque peinante*, abisagrado en el centro del radio de curvatura, alrededor del perfil o tubo (Fig. 10-17*a*), o por un *bloque rotatorio* de conformado (Fig. 10-17*b*). Para evitar el colapso de tubos en el doblado sobre radios agudos, se dispone de varios métodos. El interior se soporta con arena, con un metal de punto de fusión bajo o, más económicamente si va con un mandril compuesto de secciones individuales (Fig. 10-17*c*), o el tubo se estira sobre un mandril fijo (Fig. 10-17*b*). Las máquinas de doblado CNC se pueden programar para fabricar tubos con varios dobleces

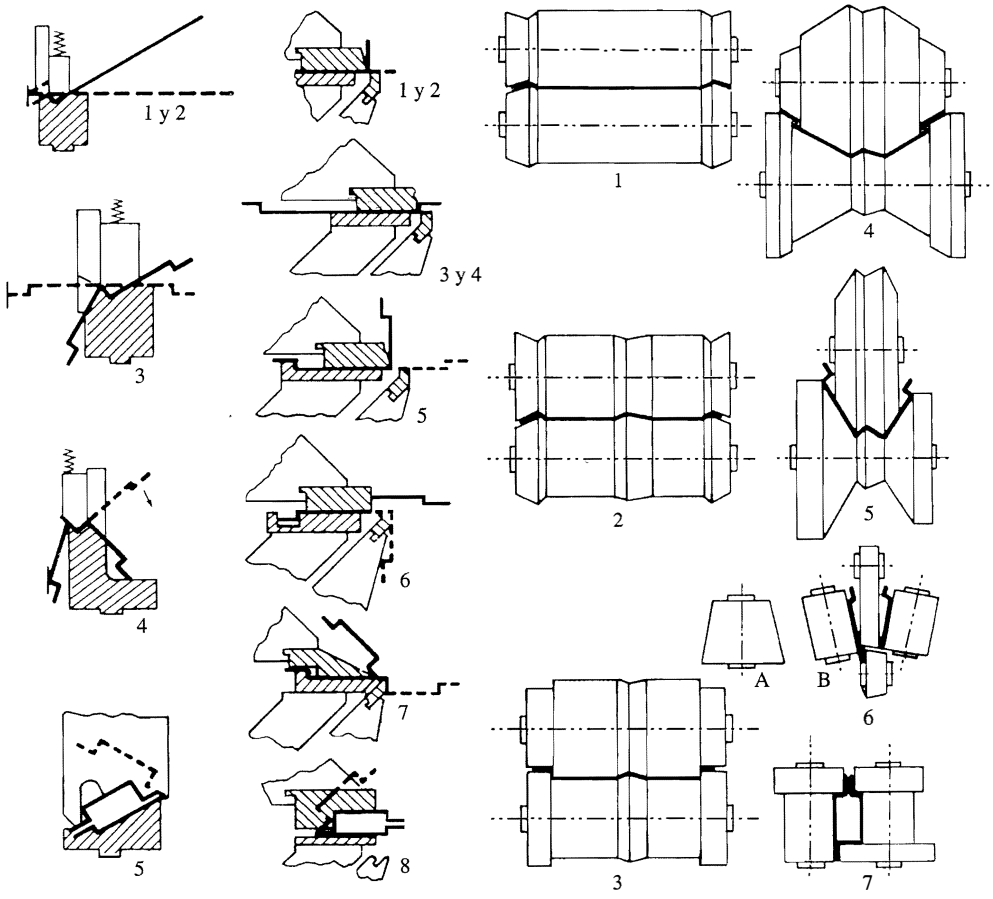


Figura 10-16 Los perfiles compuestos como los marcos de puertas se pueden formar por una secuencia de operaciones en (*a*) prensas de cortina, (*b*) matrices deslizantes o (*c*) por laminado de perfiles. (*De G. Oehler, Biegen, Carl Hanser Verlag, Munich and Viena, 1963. Con permiso.*)

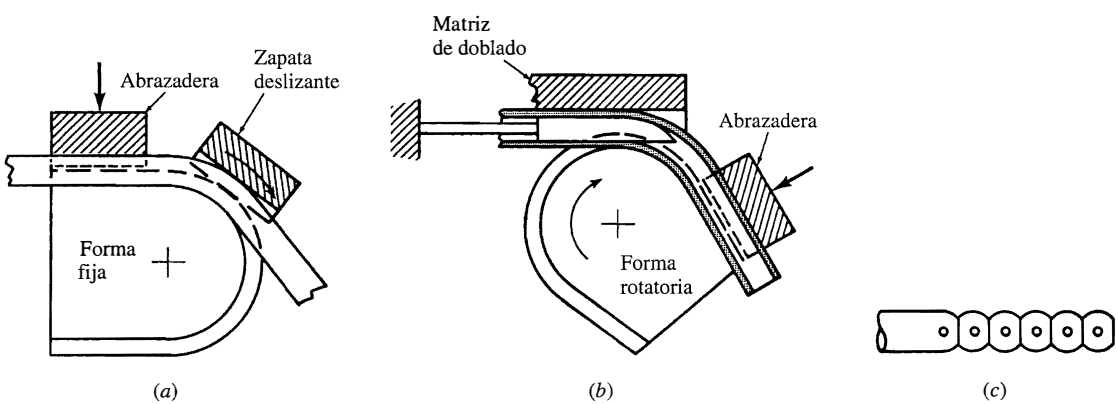


Figura 10-17 Los tubos y las secciones se pueden formar a través del (*a*) doblado por compresión, o (*b*) doblado estirado; algunas veces se hacen con el uso de un (*c*) mandril de bolas enlazadas.

en diferentes orientaciones, como se requiere para los sistemas hidráulicos de automóviles y aeronaves y los escapes de automóviles.

10-5 FORMADO POR ESTIRADO

Se fabrican enormes cantidades de recipientes más o menos profundos, de una gran variedad de formas a partir de lámina metálica. En contraste con la mayoría de las piezas dobladas, se caracterizan por tener curvaturas en dos direcciones (son formas tridimensionales). Se pueden producir a través de formado por estirado, por embutido profundo o por sus combinaciones.

10-5-1 Procesos del formado por estirado

En el *conformado por estirado* puro, la lámina se sujeta completamente en su circunferencia y la nueva forma se desarrolla totalmente a costa de su espesor. Físicamente esto se puede lograr en una variedad de maneras:

1. La lámina se puede sujetar con una multitud de mordazas fijas o giratorias (Fig. 10-18*a*). La ventaja es que sólo se necesita una matriz (*matriz macho* o *punzón de forma*), pero la productividad es baja; de ahí que ese formado por estirado sea más adecuado para la producción de bajo volumen, como es común para la industria aeronáutica. Pueden conformarse piezas muy grandes (revestimientos de fuselajes, de las alas; cascos de botes). La recuperación elástica puede ser sustancial en el conformado de piezas de pequeña curvatura, y en ese caso es útil el conformado a temperaturas elevadas (algunas veces permitiendo la termofluencia o la conformación superplástica de la lámina colocada sobre la matriz). Las secciones laminadas y extruidas también se pueden formar por estirado.

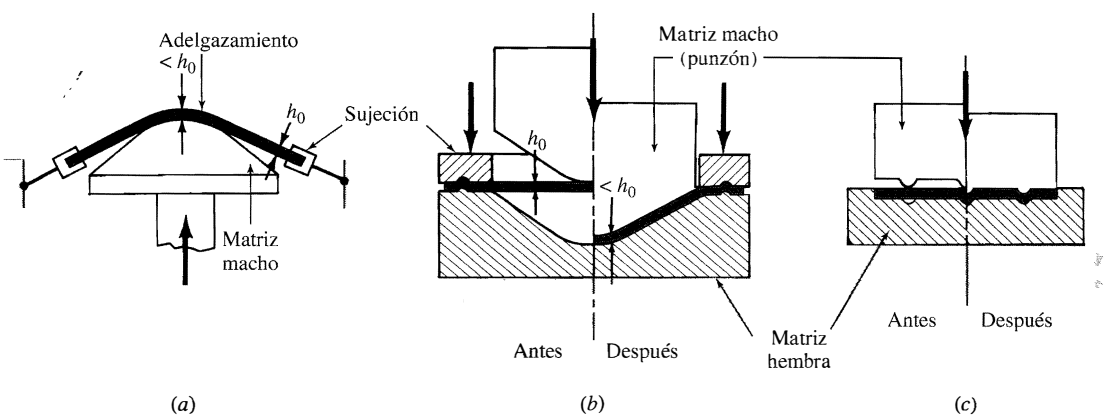


Figura 10-18 El conformado se logra completamente a costa del espesor de la pared en el conformado por estirado con (*a*) abrazaderas o (*b*) matrices con reborde de traba, y en (*c*) acuñado.

2. Para la producción en masa, como en las industrias automotrices y de artículos electrodomésticos, la pieza se fija con un *sujetador de formas* movible independiente, el cual retiene la lámina con la ayuda de un *reborde de traba* (Fig. 10-18*b*); el punzón coopera con la *matriz hembra* para definir la forma. Se produce una pieza por cada golpe de la prensa; de esta manera, la productividad es alta pero también los costos de las matrices son mayores.

3. En el proceso de *acuñado* (Fig. 10-18*c*), la restricción la da la lámina misma, a través de los múltiples puntos de contacto con la matriz.

10-5-2 Formabilidad en el estirado

En el estirado se alcanza el primer límite cuando una estricción localizada se hace visible, y el límite último está dado por la fractura subsiguiente. El *límite de conformabilidad* es una propiedad tecnológica y la deformación unitaria límite depende del material, del estado de deformación y de la fricción en la superficie del punzón.

Los factores que influyen se muestran claramente cuando una lámina sujeta se estira mediante un punzón hemisférico (Fig. 10-19*a*). Las variaciones localizadas de la deformación unitaria (la *distribución de la deformación*) se pueden revelar simplemente aplicando una retícula de círculos pequeños (típicamente con un diámetro de 2 a 6 mm) (o una *retícula cuadrada*) sobre la superficie de la lámina, el procedimiento usual es por ataque electrolítico o por una técnica de sustancia fotorresistente. En el curso de la deformación, el adelgazamiento del material está acompañado por un crecimiento de los círculos, acorde a la invariabilidad del volumen [ecuación (4-2)]. Cuando la defor-

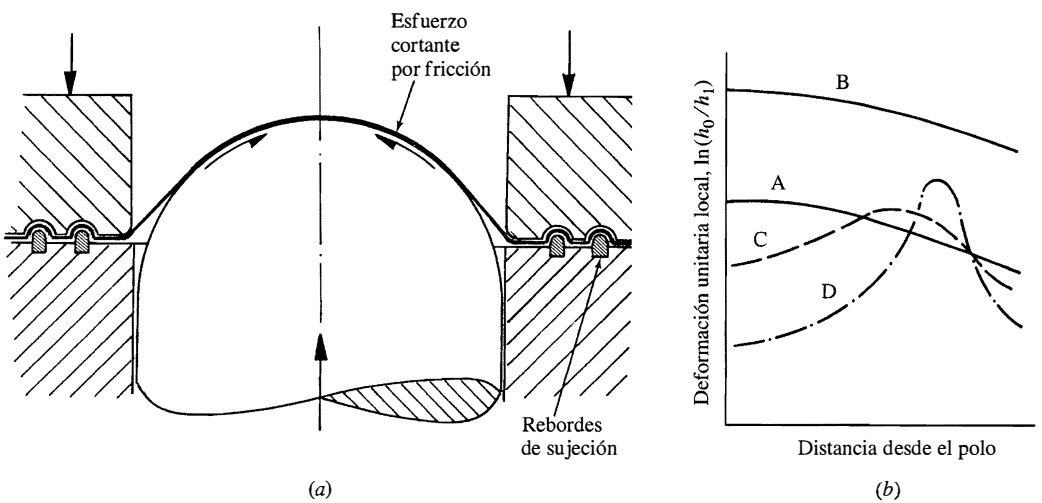


Figura 10-19 (*a*) La fricción sobre la superficie del punzón se opone al adelgazamiento y provoca (*b*) cambios en la distribución de la deformación unitaria desde el polo a la brida. (*Adaptado de J.A. Schey, Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication and Wear, ASM International, 1983, p. 520. Se reproduce con autorización.*)

mación es la misma en todas las direcciones, como lo sería al inflar un globo (*deformación biaxial equilibrada*), el círculo se expande a un diámetro mayor. Cuando la deformación varía con la dirección, el círculo se distorsiona en una elipse: el eje mayor da la deformación mayor y, perpendicular a ésta, el eje menor proporciona la deformación menor.

Cuando una lámina de un material dado se estira en todas direcciones sobre el punzón hemisférico, *la distribución de la deformación* depende de una variedad de factores:

1. En la ausencia total de fricción (lo cual en realidad sólo se lograría deformar con presión hidráulica), la lámina se adelgaza gradualmente hacia el ápice, donde ocurre finalmente la fractura (línea A en la Fig. 10-19*b*). El espesor se reduce más uniformemente en un material con un valor n alto, y se puede obtener un domo más profundo, antes de que ocurra la estricción localizada (línea B). Se recordará que en el ensayo de tensión, restricción ocurre en cuando $\varepsilon_u = n$ (Secc. 8-1-1). En la tensión biaxial equilibrada, la presencia de la deformación transversal evita la formación de una estricción localizada (*estricción difusa*). La deformación puede continuar hasta que se desarrolle una estricción local en el ápice o cerca de él, en algún punto donde exista no homogeneidad en el material, o donde la lámina originalmente sea más delgada. Al estirar sobre un punzón, la profundidad del estirado nunca iguala a la que se obtiene en el caso de que no haya fricción, sin embargo, la falla ocurrirá en el ápice siempre y cuando la fricción sea pequeña.

2. La fricción en la superficie del punzón, impide el adelgazamiento libre en el ápice y, para una fricción mayor, la posición de la deformación máxima se desplaza hacia el radio de la matriz (líneas C y D en la Fig. 10-19*b*). La deformación se hace más localizada y la fractura ocurre por deformación plana, en la zona de contacto punzón-lámina, o cerca de ella.

3. Bajo condiciones idénticas, una lámina más gruesa proporcionaría una mayor reducción del espesor, ya que los esfuerzos de flexión se superpondrían a los de tensión, aumentando la ductilidad.

4. La profundidad del estirado aumenta con todas las variables del material que retrasen la estricción (valor n alto, transformaciones) o que incrementen la deformación más allá de la estricción (valor m alto). En efecto, se determina una correlación empírica aceptable entre la elongación total en la prueba de tensión y la altura límite del domo.

La distribución de la deformación es importante porque determina las propiedades mecánicas del domo producido.

10-5-3 Diagrama de límite de conformado

Es posible comparar diversos materiales, con la ayuda del *diagrama límite de conformado* (DLC). Se prueban tiras reticuladas de lámina de diferentes anchos con un muy buen lubricante (por ejemplo, con una película aceitada de polietileno) en el punzón. Una tira lo suficientemente ancha para ser sujetada por todo su contorno proporciona el punto de tensión biaxial equilibrada (Fig. 10-20). A medida que disminuye el ancho de

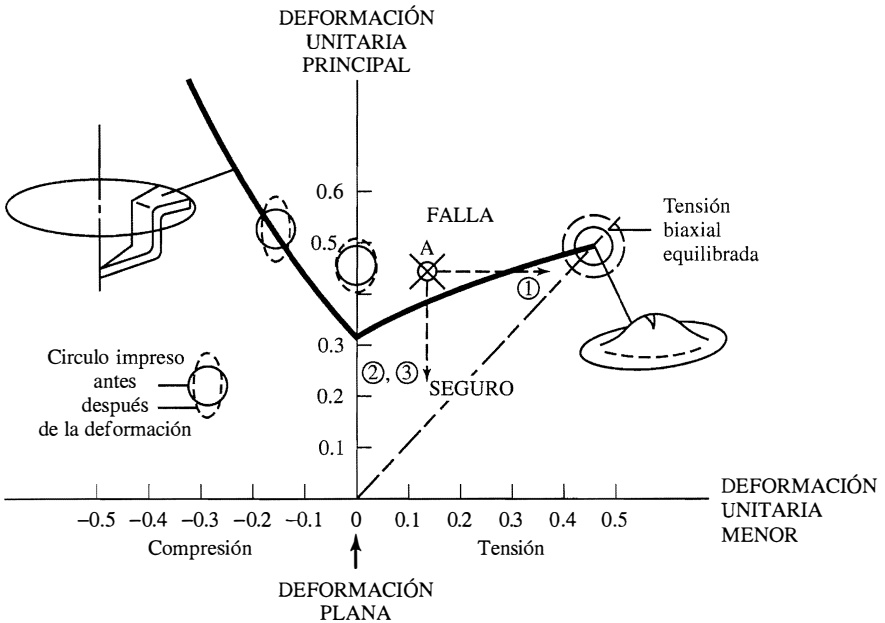


Figura 10-20 El diagrama típico del límite de conformado en acero al bajo carbono proporciona las deformaciones unitarias permisibles a varios niveles de deformación. (*El lado izquierdo, según G.M. Goodwin, SAE Paper 680092, 1968; el lado derecho según S.P. Keeler, SAE Paper 650535, 1965.*)

la tira, la deformación menor también decrece hasta que, en un ancho característico de la tira, llega a cero. Por definición, ésta es una condición de deformación plana (Fig. 8-15). El DLC usualmente se construye para la estricción localizada (se podría hacer otra curva para la fractura). El DLC se mueve hacia arriba para lámina más gruesa y es, obviamente, más bajo para un material de ductilidad menor (valor n reducido).

El DLC es una característica del sistema y se pueden comparar los DLC de dos materiales sólo si son determinados bajo condiciones idénticas. Con el decremento del tamaño del círculo, el DLC se mueve hacia arriba y cambia su forma, porque una parte mayor de un círculo pequeño cae en la zona de estricción, donde la deformación es alta. La calidad de los lotes de producción de lámina se puede verificar más rápidamente conduciendo pruebas de la *altura límite del domo* (ALD). Se prueban de nuevo muestras de anchos diferentes y la altura mínima obtenida en deformación plana se da en milímetros.

El DLC se introdujo en la década de los 60 y se convirtió rápidamente en una herramienta importante para diagnosticar problemas de producción. Cuando se encuentran piezas que fallan en producción, se colocan láminas reticuladas en la matriz de producción y se estiran. Se mide la distorsión de los círculos (algunas veces con la ayuda de un instrumento llamado *analizador óptico de retícula*). El círculo más cercano a la línea de fractura proporciona la razón de deformación en el punto crítico y define, digamos el punto A en la figura 10-20. Varias soluciones, algunas de ellas no

evidentes intuitivamente, se pueden explorar posteriormente para situar a las deformaciones dentro de límites permisibles:

1. *Incrementar la deformación menor* al sujetar más firmemente en esa dirección.

2. Si la fractura ocurre lejos del ápice, se *mejora la lubricación* para redistribuir las deformaciones (como en la Fig. 10-19*b*).

3. Si todo lo demás falla, la pieza deberá ser *rediseñada* para reducir la deformación unitaria mayor, o se debe permitir que algo del material fluya hacia la matriz, cambiando el proceso a uno combinado de estirado-embutido (Secc. 10-7).

El DLC de la figura 10-20 es típico del acero y de algunas aleaciones de aluminio. Otros materiales, como los aceros inoxidables austeníticos y el latón no muestran mejoras en el límite de conformado si se incrementa la biaxilidad de la deformación. No obstante, algunos de ellos tienen un valor n alto (tablas 8-2 y 8-3), y entonces son eminentemente adecuados para el estirado.

Ejemplo 10-7

Las formas complejas como los tapacubos para automóviles, a menudo se fabrican de acero al bajo carbono (chapados con cromo) de acero inoxidable o de una aleación de Al 5052. Si los tapacubos se van a fabricar por estirado, ¿cuál de estas aleaciones permite el estirado más profundo?

Una primera aproximación se puede obtener al comparar los valores n. De las tablas 8-2 y 8-3 se deduce que los aceros inoxidables austeníticos son los mejores ($n = 0.3$), seguidos por el acero al bajo carbono (0.25), Al 5052 (0.13), y por el acero martensítico inoxidable (0.1). Si se van a crear detalles profundos en la aleación de aluminio o en el acero inoxidable martensítico, se debe fomentar el embutido del metal hacia adentro (véase la Secc. 10-7).

10-6 EMBUTIDO PROFUNDO

La diferencia entre el estirado y el embutido profundo es sustancial: en el primero, la pieza se sujeta y el aumento de área se obtiene a costa del espesor de la lámina; en el segundo, se permite, e incluso se fomenta, que el blanco se introduzca a la matriz, de manera tal que el espesor no cambie nominalmente.

10-6-1 El proceso de embutido

En el caso más simple de *embutido profundo* puro, una pieza circular de diámetro d_0 se convierte en una copa de fondo plano estirándola a través de una matriz con la ayuda de un punzón de diámetro D_p (Fig. 10-21). Tanto la matriz como el punzón deben tener bordes bien redondeados (*radios de la matriz* y *del punzón*), porque de otra manera la pieza puede fallar por cortante. La copa terminada se *separa* del punzón, por ejemplo, maquinando una ranura ligera en la parte inferior de la matriz de embutido. Después de que la copa ha sido empujada a través de la matriz por el embutido, su borde superior se abre debido a la recuperación elástica, y es atrapado por la ranura durante la carrera de

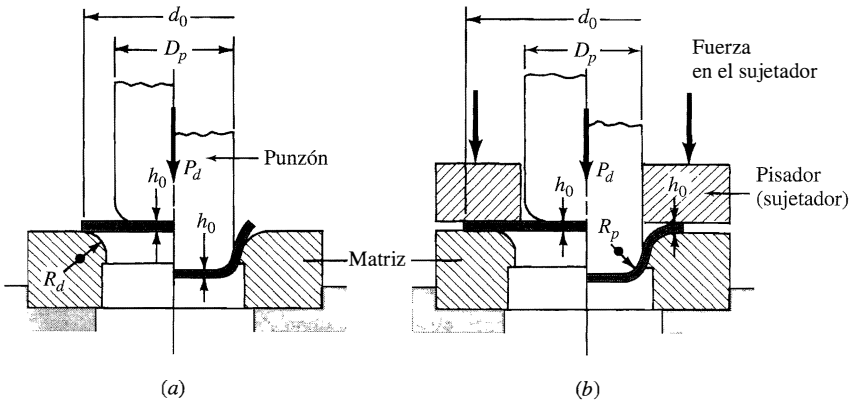


Figura 10-21 Los recipientes se pueden conformar por embutido (*a*), sin o con un pisador (*b*).

retorno del punzón, de manera que el saliente retira la copa. Con frecuencia se proporciona un agujero central en el punzón para prevenir el desarrollo de vacío y así facilitar la separación.

El estado de esfuerzos que prevalece en la pieza *durante* el embutido se muestra en la figura 10-22*a* y corresponde al ocurrido a la mitad del embutido. La base se encuentra en tensión biaxial equilibrada; la pared lateral en tensión por deformación plana, porque el punzón no permite la contracción circunferencial; el material en la transición entre la pared y la brida está sometido a flexión y contraflexión (enderezamiento), y la brida se encuentra en tensión radial y compresión circunferencial, pues la circunferencia de la pieza conformada se reduce, mientras que se le fuerza al adquirir el diámetro menor de la abertura de la matriz.

Los esfuerzos circunferenciales de compresión causan que la pieza se engrose, y el claro punzón-matriz sea usualmente 10% mayor que el espesor de la lámina, lo que permite acomodar este *engrosamiento* sin necesidad de comprimir la pared. La compresión también puede conducir al *arrugamiento* (equivalente al pandeo en el recalcado, Fig. 9-15*a*) en la brida. En la práctica, son posibles dos métodos de operación:

Embutido libre El arrugamiento puede evitarse cuando la lámina es suficientemente rígida (Fig. 10-21*a*). Éste es el caso para los embutidos poco profundos, cuando la razón de embutido $d_0/D_p < 1.2$. Los blancos gruesos en relación con su diámetro permiten razones de embutido mayores (Fig. 10-23); el arrugamiento de la lámina también depende del perfil de la matriz, el cual determina la magnitud de la compresión circunferencial. La matriz más favorable es la matriz tractriz (Fig. 10-23).

Embutido con pisador Cuando la pieza es relativamente delgada y la razón de embutido se encuentra más allá de los límites indicados en la figura 10-23, se debe restringir el desplazamiento de la brida, mediante un pisador (Fig. 10-21*b*). Éste debe ejercer suficiente presión para evitar el arrugamiento (Fig. 10-24*b*); sin embargo, una *presión* excesiva *del pisador* restringiría el deslizamiento del blanco en el anillo de embutido y

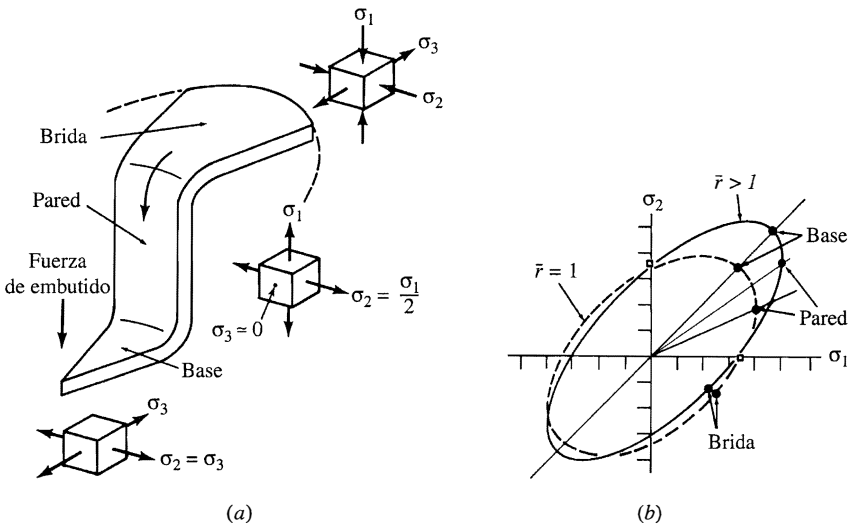


Figura 10-22 (*a*) El estado de esfuerzos varía en gran medida sobre partes diferentes de una copa parcialmente estirada. (*b*) Un material con r mayor se beneficia del reforzamiento de la base y de la pared.

causaría fractura en la pared de la copa parcialmente conformada (Fig. 10-24*d*). Para producir una copa sana (Fig. 10-24*c*), la presión del pisador se puede considerar, en una primera aproximación, como 1.5% del esfuerzo de cedencia ($\sigma_{0.2}$) del material.

Fuerza de embutido Cuando se aplica la presión óptima al pisador, la fuerza de embutido aumenta a medida que la brida parcialmente conformada se endurece por

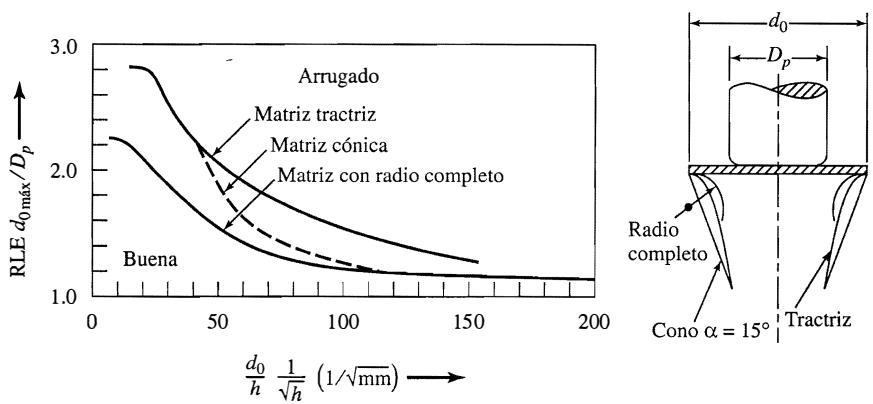
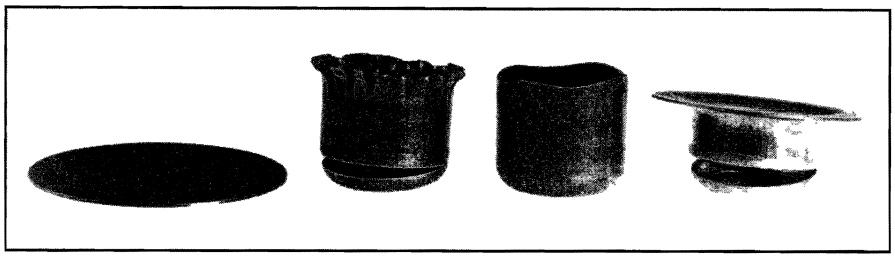


Figura 10-23 La razón limitante de estirado en el acopado de acero al bajo carbono, sin un pisador, es una función de la geometría de la matriz y de la razón del diámetro del blanco respecto al espesor de la lámina. (*Según G.S.A. Shawki, Werkstattstechnik,* **53***: 12-16, 1963. Con permiso de Springer Verlag, Nueva York.*)



(*a*) (*b*) (*c*) (*d*)

Figura 10-24 El embutido profundo de copas de acero al bajo carbono a partir de (*a*) un blanco redondo, con presión del pisador (*b*) insuficiente, (*c*) óptima y (*c*) excesiva. Note en (c) el orejeado típico debido a la anisotropía planar. (*De J.A. Schey, como Fig. 10-19, p. 527.*)

deformación; al disminuir el diámetro de la brida, la fuerza se reduce hasta que se plancha el borde engrosado del blanco (Fig. 10-25, línea A). La presión excesiva causa la fractura prematura (línea B y Fig. 10-24*d*). Una presión demasiado baja permite el plegado de las paredes del vaso (línea C), y si las arrugas no pueden plancharse, la copa falla cerca del final del embutido (Fig. 10-24*b*).

Un estimado muy aproximado de la *fuerza de embutido* se puede obtener de la fórmula

$$P_d = \pi D_p h\,(\mathrm{TS})\left(\frac{d_0}{D_p} - 0.7\right) \qquad \textbf{(10-8)}$$

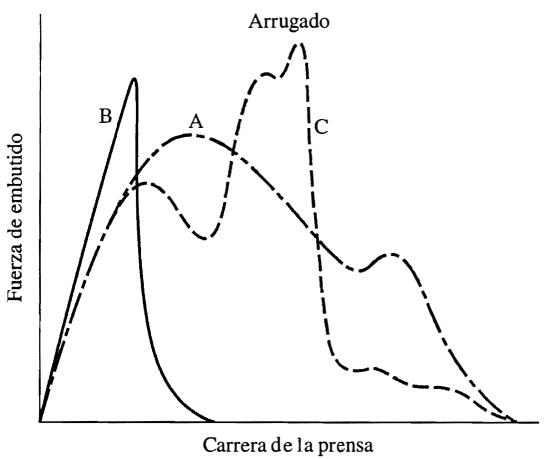


Figura 10-25 Curvas usuales de la fuerza de estirado con presión óptima del sujetador (línea A), excesiva (línea B) e insuficiente (línea C).

10-6-2 Razón límite de embutido

Cuando la fuerza de embutido excede a la fuerza que puede soportar la pared de la copa, la copa parcialmente formada se fractura (Fig. 10-24*d*). Así, hay un límite para la deformación que se puede obtener, expresada como la *reducción* $(d_0 - D_p)/d_0$ o, más comúnmente, como la *relación de embutido* d_0/D_p. El diámetro máximo del blanco que se puede embutir bajo condiciones ideales se expresa como la *relación límite de embutido* (RLE)

$$\text{RLE} = \frac{d_{0\ (\text{máx})}}{D_p} \tag{10-9}$$

Se ha visto que la fuerza total de embutido se compone de las fuerzas requeridas para sujetar la lámina en la corona circular del embutido, de la fuerza ejercida por el punzón para vencer la fricción entre la pieza y el pisador y las superficies de la matriz, para conformar la lámina alrededor del radio de embutido, y para vencer la fricción alrededor del radio de embutido. Por lo tanto, la RLE no es una constante del material, sino una propiedad del sistema, que depende de todas las variables que afectan la fuerza de embutido y a la resistencia de la pared de la copa.

1. Una n alta refuerza la pared de la copa o vaso, pero también incrementa la fuerza de embutido, de ahí que sea poco trascendente al caso; un mejoramiento ligero en la RLE a menudo se encuentra con una n mayor, debido al desarrollo más tardío de la fuerza máxima.

2. Una m elevada refuerza una estricción incipiente en la pared, aunque apenas afecta la fuerza de embutido, así que tiene un efecto ligeramente favorable.

3. La variable del material de mayor trascendencia es el valor r. En la figura 8-6*b* se ve que un material con un valor r alto resiste el adelgazamiento, mientras simultáneamente se reduce su anchura. Esto ayuda a la pieza conformarse al diámetro reducido de la copa, por lo que es un factor positivo. Además, un valor r alto causa que la elipse de cedencia (Fig. 8-14) se expanda en la dirección biaxial equilibrada (Fig. 10-22*b*). La pared parcialmente embutida de la copa se encuentra en tensión por deformación plana, en la que un material con un valor r elevado es más fuerte, mientras que la brinda fuera de la matriz se somete a tensión y compresión combinadas, en cuyo caso es ligeramente más débil que un material isotrópico. El resultado combinado es que la RLE aumenta con el incremento de r (o más precisamente, $\bar{r}$ (Fig. 10-26). El efecto es más significativo de lo que se muestra en la figura 10-26, ya que un RLE de 2.0 proporciona una copa con una profundidad de aproximadamente $0.8D_p$, mientras que una RLE de 3.0 da una profundidad de más de $2.0D_p$.

4. Los radios pequeños en el punzón y en la pieza imponen una severa deformación por flexión, incrementando la fuerza de embutido, aunque esto no afecta la resistencia de la pared; lo que hace que disminuya la RLE. Sin embargo, si el radio de la matriz es muy grande, quedaría gran parte del blanco sin soporte, y podría ocurrir el *fruncido* (arrugamiento entre el punzón y la pared de la matriz). De aquí que los radios se optimicen, comúnmente dentro de los límites de $R > 4h$ para lámina gruesa (> 5 mm), y $R > 8h$ para la delgada (< 1 mm).

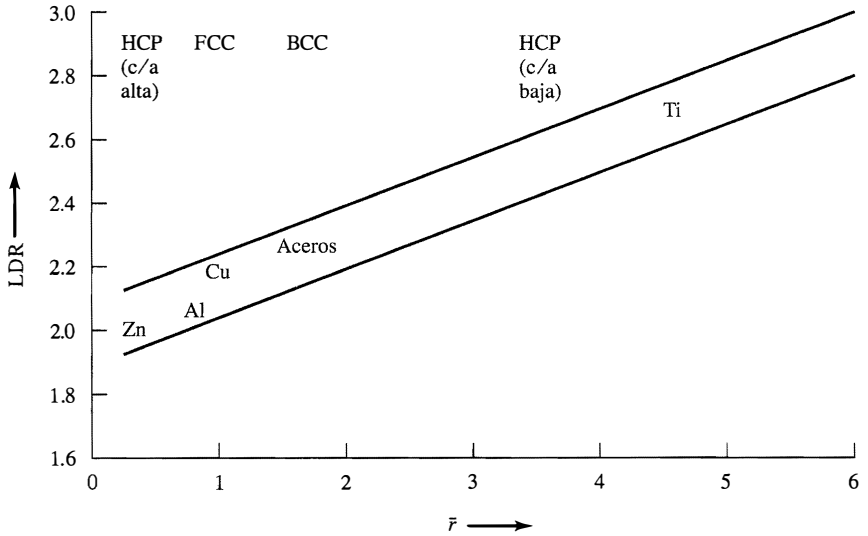


Figura 10-26 La anisotropía normal alta es un factor poderoso en el incremento de la razón límite de embutido.

5. La fricción entre el pisador, la matriz y la superficie de la brida (lámina que queda fuera de la matriz) se suma a la fuerza de embutido y es, por lo tanto, dañina. Las presiones de contacto están por debajo de σ_f, y por lo tanto, la ecuación (4-18) es válida. El esfuerzo de fricción se puede reducir al disminuir el esfuerzo normal (la presión del pisador), pero esto queda limitado por la prevención del arrugamiento. De esta manera, se debe aplicar un buen lubricante que reduzca μ y en consecuencia la fuerza de fricción.

6. Al embutir lámina relativamente delgada, con relaciones d_0/h mayores de 50, la fuerza de fricción se convierte en la parte predominante de la fuerza total de embutido; de ahí que la RLE disminuya con el incremento de la relación d_0/h.

7. La fricción sobre el punzón es útil porque transfiere la fuerza de embutido de la copa al punzón. Así, un punzón rugoso, o una pieza lubricada sólo sobre el área de la brida, proporciona una RLE mayor.

Aún no existe una norma internacional para determinar la RLE, y únicamente los datos que se obtienen en circunstancias idénticas son comparables.

La RLE no es necesariamente un índice de la profundidad útil de la copa. Un material con una anisotropía planar (Secc. 8-1-3) presenta propiedades diferentes (Fig. 8-5*b*) en las direcciones de laminación, transversal y a 45° ($r_0 \neq = r_{90} \neq r_{45}$). Esto conduce al *orejeado*, una variación periódica de la altura de la copa (Fig. 10-24*c*); las orejas reflejan la simetría del cristal y se agrupan en pares (4, 6 u 8). La brida se engrosa menos en la dirección de r mayor; así, se forman orejas en estas direcciones.

Ejemplo 10-8

Un blanco de acero al bajo carbono de 200 mm de diámetro y 2 mm de espesor, se va a embutir para obtener en un vaso cilíndrico de 100 mm de diámetro interior. El radio en la transición de pared a fondo, es de 5 mm. (*a*) Verifique si el embutido es posible y, en caso afirmativo, (*b*) estime la fuerza de la prensa.

(*a*) De la figura 10-28, RLE = 2.4, de ahí que el proceso sea posible.

(*b*) De la tabla 8-2, para acero 1008, TS = 320 MPa. De la ecuación (10-8),

$$P_d = \pi(100)(2)(320[(200/100) - 0.7] = 261 \text{ kN}$$

Ejemplo 10-9

El acero de calidad para embutido, calmado con aluminio, con $r = 1.7$ tiene una RLE de 2.4 (Fig. 10-28). Una vaso cilíndrico se embute a partir de una lámina de $h = 2$ mm de espesor, con un punzón de diámetro $D_p = 100$ mm y un radio de nariz $R_p = 5$ mm. Encuentre (*a*) el diámetro máximo del blanco $d_{0(\text{máx})}$, (*b*) la altura del vaso suponiendo una pared de espesor constante de 2 mm, y (*c*) la relación altura-diámetro.

(*a*) A partir la ecuación (10-9), = RLE × D_p = 2.4(100) = 240 mm.

(*b*) Como el espesor de la pared permanece sin cambiar y el vaso es relativamente delgado, la constancia del volumen implica un área constante, por lo que se puede igualar el área del blanco con la de la superficie media del vaso. Área de la nariz = longitud de un cuarto de círculo × longitud barrida por el centro de gravedad (para un cuarto de círculo, el centro de gravedad está a 0.6R). Así,

Área de la pieza = (área de la base) + (área de la nariz) + (área de la pared) la altura de la pared

$$240^2\pi/4 = [(100 - 10)^2\pi/4] + [(6\pi/2)(97.2\pi)] \times [(100 + 2)\pi h]$$

la altura de la pared $h = 112.3$ mm; profundidad interna del vaso = 112.3 + 5 = 117. 3 mm

(*c*) $h/D_p = 117.3/100 = 1.17$

Ejemplo 10-10

Repita el cálculo para RLE = 2; note el efecto de la RLE en la relación de la altura-diámetro.

(*a*) $d_{0(\text{máx})} = 200$ mm.

(*b*) profundidad interna del vaso = 69 + 5 = 74 mm.

(*c*) $h/D_p = 0.74$.

Usualmente hay una reducción en el espesor de la pared, de aquí la a menudo dada relación $h/D_p = 0.8$.

Este efecto es muy marcado: para un incremento de la RLE de 20%, la altura del vaso se incrementó 58%.

10-6-3 Embutido secundario

Las copas con un peralte mayor que el permitido por la RLE se pueden fabricar mediante un conformado secundario después del inicial.

1. El *reembutido* (Fig. 10-27*a*) deja el espesor de la pared esencialmente igual.

2. El *planchado* (como extrusión inversa). (Fig. 10-27*b*) deja el diámetro interior virtualmente sin cambios y logra mayor longitud al reducir el espesor de la pared. Se debe reconocer que el planchado es similar a estirar un tubo sobre una barra (Fig. 9-39*d*).

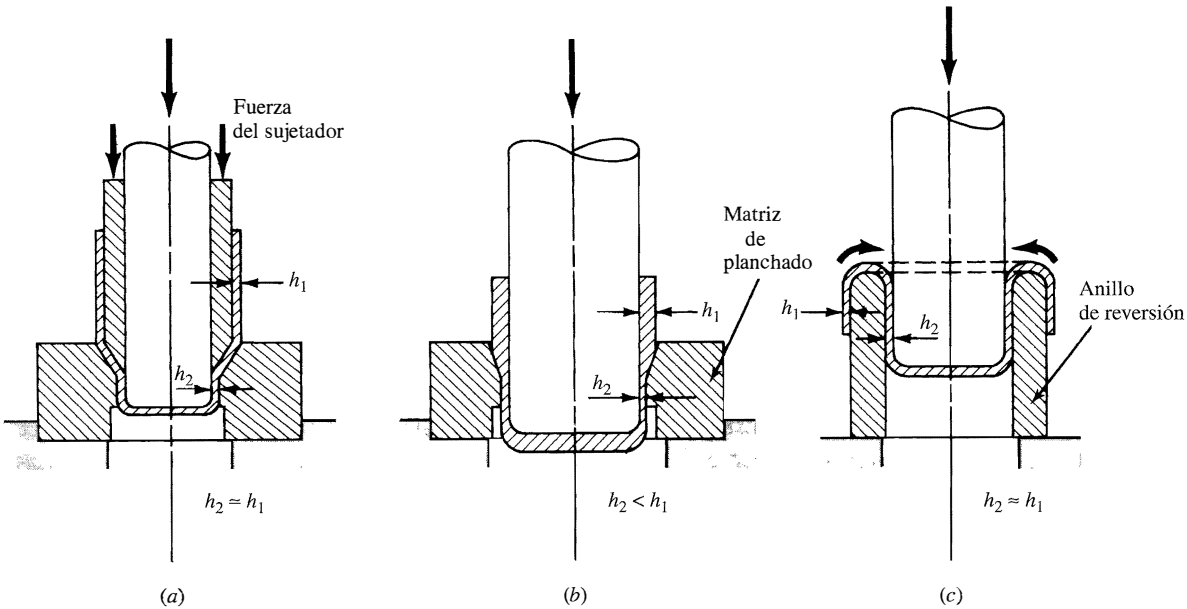


Figura 10-27 Las copas se deforman adicionalmente por (*a*) reembutido (*b*) planchado, o (*c*) estirado inverso.

3. Un fenómeno básico, que no se ha mencionado hasta ahora, es el hecho de que un material trabajado en frío presenta mayor ductilidad cuando la dirección de la deformación se invierte en operaciones sucesivas (*ablandamiento por deformación*); esto se aprovecha en el *reembutido inverso* de copas (Fig. 10-27*c*).

El reembutido se usa extensamente para recipientes para alimentos, en las tapas de las plumas fuente, en las carcasas de los filtros de aceite, en los émbolos de los amortiguadores, etc. El planchado se emplea en la producción en masa de latas de bebidas embutidas y planchadas, así como en los cartuchos de munición.

Existe, por supuesto, la posibilidad, pero con frecuencia combinada con mayor dificultad, de cambiar la forma básica de las piezas embutidas. Al embutir recipientes cuadrados o rectangulares, el grado de dificultad se incrementa al elevarse la razón de la longitud de la pieza respecto a la nariz o vértice; el orejeado en los vértices es útil. Un punzón con un extremo curvo o hemisférico produce un estado de deformación complejo, el cual se analizará en seguida.

10-7 ESTIRADO-EMBUTIDO

En muchas aplicaciones prácticas, más notablemente en la producción de piezas de carrocería y del bastidor de automotores, el proceso de conformado no es estirado ni embutido puros. La lámina no se sujeta completamente (por lo tanto no es estirado

puro), ni se permite que se desplace libremente al interior de la matriz (por cuyo motivo no es embutido puro). En vez de eso, las formas complejas se desarrollan controlando el desplazamiento hacia adentro de la matriz, retardándolo cuando sea necesario mediante mordazas de borde anexas a la matriz y al pisador (Fig. 10-18*b* y 10-19*a*). Para evitar la penetración del punzón y regular el embutido, se aplica un lubricante y se especifican la rugosidad y la direccionalidad de la superficie de la lámina (se usa mucho la lámina con acabado aleatorio). En algunos casos, la presión del sujetador varía de manera programada durante el avance del punzón, o el pisador se somete a una carga pulsante. En la mayoría de los sistemas más avanzados, el pisador es accionado por varios cilindros hidráulicos programables independientemente, de manera que la fuerza retardadora se pueda controlar localmente.

La forma de la pieza a menudo se representa por una superficie "esculpida" en el sentido de que sólo se puede describir mediante subregiones cúbicas o punto por punto en coordenadas espaciales. La aplicación de CAD/CAM a esas formas ha reducido en gran medida el tiempo y el esfuerzo involucrados en el diseño y en el análisis de piezas, así como en la programación de máquinas herramienta CNC para fabricar las matrices. Las curvaturas pueden ser ligeras y no simétricas, resultando en problemas de recuperación elástica y en distorsión después de su liberación de la matriz, especialmente con materiales de razón $\sigma_{0.2}/E$ alta; el modelado por computadora puede ayudar a definir la forma de matriz que compense este fenómeno. En otros casos, el conformado ocurre cerca de los límites permitidos por el material, y la fractura podría suceder fácilmente en la ausencia de controles estrictos. El modelado por computadora puede permitir la exploración del efecto de las variables del proceso.

Límites del conformado En los últimos años, ha habido una aceptación extraordinariamente rápida de los conceptos del conformado de metales para propósitos de control de producción. El diagrama de límite de conformado es útil para analizar las causas de las fallas, como se analiza en conexión con la figura 10-20. Las elipses próximas a la localización de la fractura proporcionan la posición crítica en el DLC. Luego se pueden tomar varias medidas de corrección: incrementar la deformación unitaria menor (línea 1 en la Fig. 10-20) al elevar la restricción de la lámina en esa dirección (insertando un reborde de embutido o aumentando la cantidad de rebordes); la deformación mayor se puede reducir (flecha vertical en la Fig. 10-20) si se disminuye la intensidad del estirado o se permite que más material se desplace dentro de la matriz (reduciendo el número de rebordes de embutido o eliminándolos completamente); el adelgazamiento localizado en una parte profunda del estirado se puede reducir al aumentar la fricción en esa parte con el macho de la matriz.

Análisis de la forma La severidad general de la operación se juzga mejor por medio del *análisis de la forma*, el cual toma en cuenta las contribuciones tanto del estirado como del embutido. Para esto, se determinan experimentalmente gráficas combinadas de estirado-embutido (*líneas de conformado*). En uno de los puntos extremos, se determina la RLE. El otro punto extremo se encuentra mediante estirado puro, prensando una bola de acero en una lámina empotrada, hasta que se observe una estricción localizada. La esfera es de 20 mm de diámetro para una lámina de no más de 1.5 mm de espesor y de 50 mm de diámetro para un espesor de la lámina hasta de 3.5 mm. El *límite*

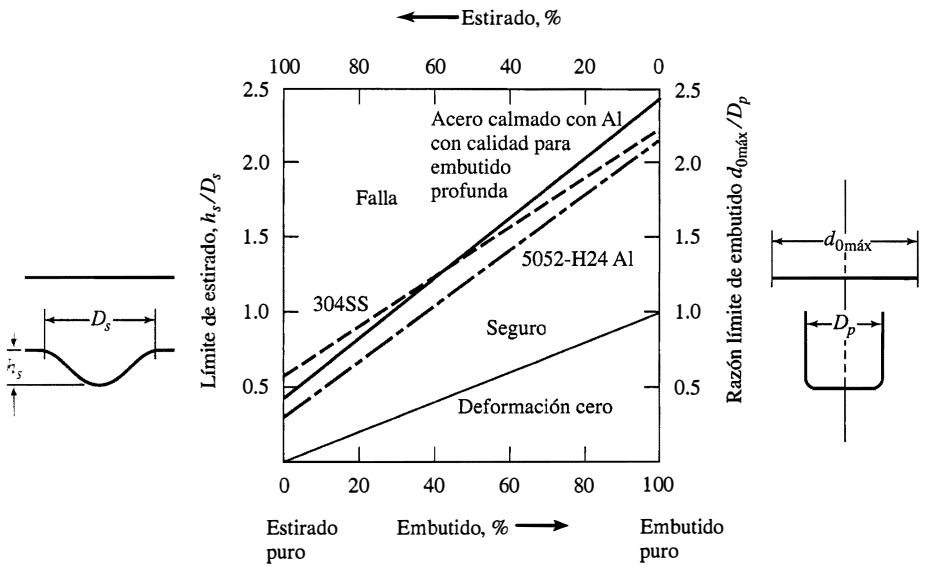


Figura 10-28 Diagrama del límite de estirado-embutido combinado usado para juzgar la severidad de las operaciones combinadas. [*Según A.S. Kasper, Metal Progress, 99 (5): 57-60 (1971). Se reproduce con autorización de la ASM International.*]

de estirado es dado por el cociente de la profundidad del estirado h_s dividido entre el diámetro de la matriz D_s. El límite estirado-embutido se obtiene conectando estos dos puntos extremos (Fig. 10-28).

La aplicación realmente importante es, por supuesto, para la predicción del éxito o de la falla antes de que se construyan herramientas costosas, de manera que se puedan hacer modificaciones a tiempo. Se ha progresado en la predicción de las contribuciones relativas del estirado y del embutido; los análisis de diseños de nuevas piezas con frecuencia se hacen por referencia a otras similares en los cuales se tiene experiencia. En las aplicaciones más avànzadas, la base de datos establecida por medio de CAD se emplea para análisis preliminares. Éste es un campo en rápido desarrollo el cual ya puede jactarse de algunos éxitos y debe, finalmente, permitir una verdadera ingeniería concurrente antes de que se tenga una matriz para producción. Hasta entonces, aún es necesario *probar las matrices*, usando matrices fabricadas de un material menos costoso, usualmente una aleación de zinc que se puede moldear por fundición. La magnitud del reto se puede estimar por medio de la figura 10-29, en la que se muestra una pieza de una forma compleja. Es importante notar que la recuperación elástica puede alcanzar proporciones significativas, y el modelado es útil para calcular la corrección necesaria que al respecto deberá hacerse en la forma de la matriz.

Resistencia a la abolladura Una consideración importante es la resistencia a la abolladura de tableros grandes. Cuando se aplica un indentador local como una esfera, el tablero se flexiona primero y luego se forma una abolladura (indentación). Los resulta-

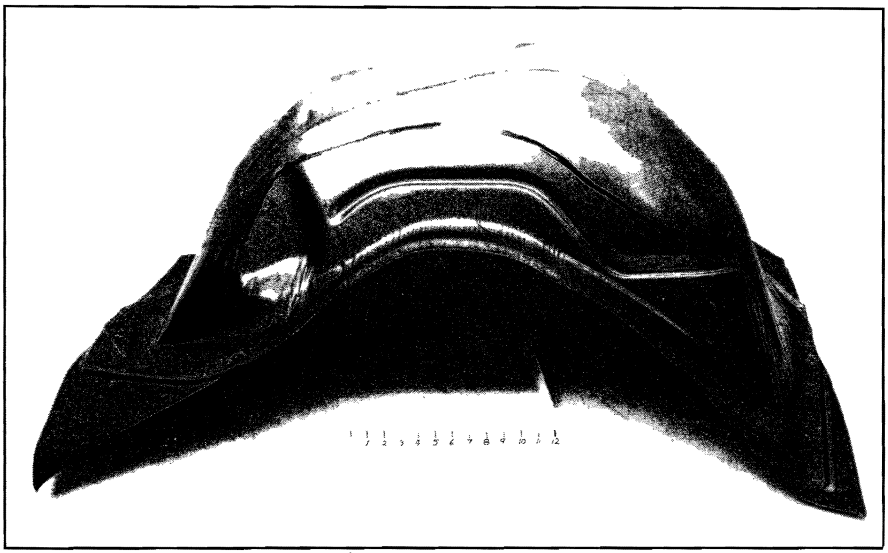


Figura 10-29 Una pieza severamente conformada (funda del pozo de la rueda de un automóvil) hecha en una sola operación por una combinación de estirado y embutido. Note la red de círculos grabados en la lámina, mediante ataque químico, las marcas de los rebordes de sujeción y la línea que marca el límite entre la nariz estirada y los lados embutidos (*Cortesía A.S. Kasper, Chrysler Corporation, Detroit.*)

dos dependen de manera compleja de las propiedades del material, del modo de aplicación de la carga, y del espesor y forma del tablero. En una carga estática, un tablero plano simplemente se flexionará; uno ligeramente curvo puede abollarse o pandearse con curvatura inversa a la original, mientras que los de gran curvatura soportan la carga a través de la compresión de la membrana. En cargas dinámicas (como las granizadas), los tableros más rígidos son incapaces de absorber la energía de impacto por deflexión elástica; las fuerzas de contacto se hacen grandes y resultan las abolladuras. Así, los tableros de gran curvatura, confiables bajo cargas estáticas, son más susceptibles a la abolladura dinámica.

Blancos hechos a la medida En los avances recientes, los blancos suelen soldarse a partir de láminas de espesores diferentes o de composiciones distintas, de manera que se proporciona resistencia donde es necesaria. Esos *blancos hechos a la medida* (Fig. 10-30) permiten la reducción en la masa y en el número de piezas.

Ejemplo 10-11

Se ha estimado que aun para los automóviles de diseño actual se usarán de 3 a 5 blancos soldados por vehículo. Con un rango entre 50 y 60 millones de vehículos por año, la demanda mundial crecerá a cientos de millones de esos blancos.

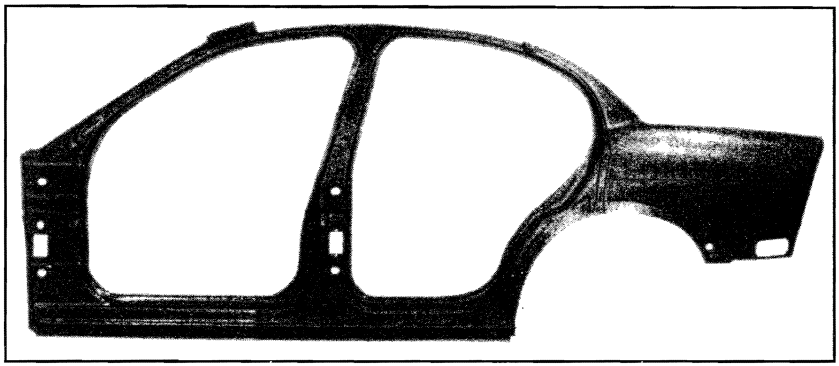


Figura 10-30 El tablero exterior lateral de la carrocería del UltraLight Steel Auto Body se produjo a partir de un blanco, en la que se unieron láminas de calibre y propiedades mecánicas diferentes con soldadura por láser para proporcionar resistencia donde se necesitaba, pero sin aumentar peso extra. (*Cortesía del American Iron and Steel Institute, Southfield, Michigan.*)

10-8 PRENSADO

En el uso industrial, el término *prensado* o *conformado en prensa* sirve para describir todas las operaciones de conformado de lámina de metal, realizadas en prensas de alta potencia con el uso de matrices permanentes (de acero). Este proceso comprende todos los pasos necesarios para completar una pieza de cualquier complejidad, ya sea de estampado de blancos, punzonado, doblado, embutido, estirado, planchado, embutido secundario, repujado, recortado, y así sucesivamente. Los juegos de matrices que se utilizan dependen de las cantidades de producción, de las tasas requeridas de producción y del número de operaciones necesarias para completar la pieza.

Matrices de operación unica Se obtiene una complejidad mínima si cada operación se realiza separadamente, en matrices y prensas individuales. El costo de la matriz aún se incrementa y los costos de mano de obra y de manejo pueden ser altos; no obstante, ésta es la opción más usual cuando las cantidades totales de producción son insuficientes para justificar matrices más complejas, o cuando la pieza es muy grande. La última situación prevalece en la producción de piezas para la carrocería de automóviles. Para mayor productividad, las prensas se alinean una detrás de la otra, y la pieza es movida de prensa en prensa con brazos mecánicos, con robots programables o con mecanismos especializados de transferencia. El inventario en proceso se reduce y se asegura mayor flexibilidad al adoptar esquemas de *cambio rápido de matrices* [aun las matrices muy grandes se cambian en minutos, permitiendo varios cambios de matriz en cada turno para la producción justo a tiempo (JIT)].

Matrices compuestas Dos o más operaciones realizadas en una sola matriz (Fig. 10-8) aseguran mayor exactitud, pero las matrices están limitadas a procesos relativamente sencillos tales como el estampado de blancos y el punzonado tal vez combinados con el

doblado o con un embutido. Se fabrican matrices especiales (telescópicas) para embutidos múltiples.

Matrices múltiples Muchas piezas tienen una geometría que no permite conformarlas directamente, ya sea porque la razón profundidad-diámetro es demasiado grande o debido a que la forma es escalonada, tiene porciones cónicas, etc., que requieren varios embutidos sucesivos, para lo cual, con frecuencia, una matriz compuesta es inadecuada. La pieza aún se puede fabricar en una sola prensa si todos los elementos necesarios de la matriz para completar la pieza se incorporan en un juego, de manera que se obtiene una parte terminada por cada golpe de la prensa. El material en rollo se alimenta en incrementos prefijos, y las piezas se transfieren por una de dos técnicas:

1. Los *troqueles progresivas* se alimentan con la tira; el blanco se corta sólo parcialmente y permanece unido al remanente de la tira, mediante franjas estrechas, este esqueleto se usa para mover al blanco a través de las estaciones de conformado. La separación final se reserva para la última etapa (Figs. 10-9 y 10-31).

2. Los *dados de transferencia* se construyen bajo el mismo principio, pero el blanco se corta primero y el recorte se pica y se desecha. El blanco se desplaza a través de

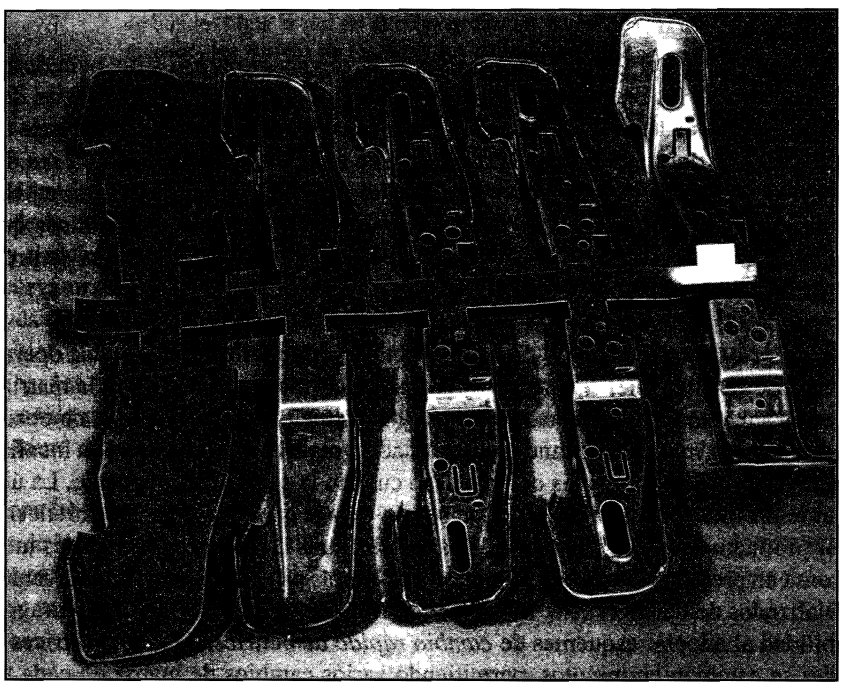


Figura 10-31 Un ejemplo común del trabajo en matriz progresiva: formado simultáneo de dos partes del armazón del asiento, por una secuencia de troquelado, formado de brida, punzonado, aplanado de la brida y, en la etapa final, corte y doblado. (*Cortesía de General Seating Products Division, Lear-Siegler Industries Ltd., Kitchener, Ontario.*)

etapas sucesivas de la matriz con mecanismos de transferencia y posicionamiento, usualmente en una línea recta, pero algunas veces a lo largo de una trayectoria circular.

Las prensas empleadas tanto para los troqueles progresivos como para los de transferencia tienen que ser suficientemente grandes para poder ubicar todas las etapas de las matrices en la cama de la prensa y para proporcionar la fuerza para todas las operaciones simultáneas. Los costos elevados de las matrices se compensan en la producción en masa con los costos bajos de mano de obra y las altas tasas de producción. En algunos casos especiales, se forman piezas muy grandes (el tablero completo de la pared lateral de un automóvil) en una progresión de matrices a partir de blancos de hasta 4 200 × 2 000 mm. Ese tipo de prensas de transferencia enormes se introdujo a mediados de la década de los 90, con una fuerza total de la prensa de hasta 80 MN. Todas las estaciones, con carros separados, se accionan por medio de una flecha común, y la pieza se transfiere con un mecanismo de posicionamiento.

Máquinas de cuatro o más carros Estas máquinas de propósito especial se desarrollaron originalmente para operaciones complejas de doblado de alambre, pero ahora se usan cada vez más para conformado de lámina. Se puede producir una gran variedad de formas con tasas elevadas.

10-9 PROCESOS ESPECIALES

Existen muchos procesos que desafían una clasificación simple, aunque comparten algunas características de los ya analizados.

Embutido Los procesos especializados de embutido se diseñan para obtener mayor profundidad de embutido, formas más complejas, costos más bajos de las matrices, o una combinación de cualesquiera de estos factores.

1. El *conformado con matrices de caucho* reemplaza a la matriz con un colchón de caucho (Fig. 10-32) y la lámina se conforma sobre el punzón (con frecuencia hecho de

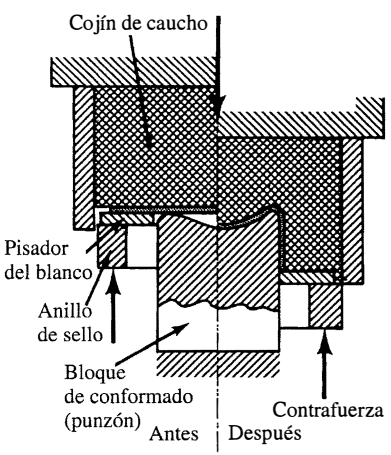


Figura 10-32 Las piezas profundas se pueden embutir con herramientas relativamente baratas usando un cojín de caucho.

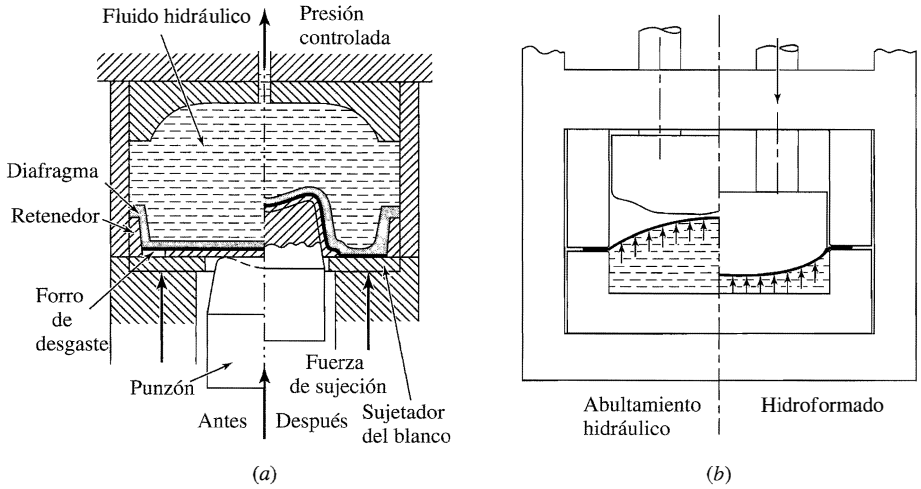


Figura 10-33 Los métodos de conformado hidráulico ofrecen la capacidad para (*a*) embutidos profundos y (*b*) endurecimiento uniforme por deformación, al preformar una lámina.

una resina o de una aleación de zinc). No hay necesidad de matrices acopladas de acero más costosas, y la presencia de esfuerzos de compresión y de fricción sobre la superficie del punzón ayudan a obtener embutidos más profundos y formas que de otra manera serían difíciles de fabricar (por ejemplo, piezas cónicas).

2. El *hidroformado* reemplaza al colchón de caucho con un fluido contenido en un diafragma de caucho (Fig. 10-33*a*). La presión hidráulica se programa durante toda la carrera, con frecuencia con CNC, para prensar la lámina sobre el punzón y así obtener piezas de gran profundidad y complejidad. Alternativamente, el espacio de la matriz se cierra con sellos, y la lámina se deforma directamente con el fluido, de esta manera toda la fricción se elimina y la pieza se endurece uniformemente por deformación (Fig. 10-19*b*, línea B). La lámina predeformada puede entonces formarse alrededor de la matriz (Fig. 10-33*b*).

Formado de bridas, engargolado y estricción Algunas formas complejas de doblado, combinadas con elementos de formado por compresión y/o estirado, se encuentran en el trabajo de bordes de blancos, agujeros, tubos y piezas embutidas.

1. La formación de bridas en un blanco (y de bridas encogidas en lámina) pone al borde exterior en compresión (Fig. 10-34*a*). Esto es similar a una operación de embutido de poca profundidad; no existe gran demanda en la ductilidad pero puede ocurrir arrugamiento.

2. La formación de brida alrededor *de un agujero* y de bridas bajo *tensión por estirado* en una lámina (Fig. 10-34*b*) imponen severas deformaciones por tensión en el borde. Si existe rebaba en el borde cortado o si el material de la lámina contiene inclusiones u otros defectos, el desgarramiento ocurre a una deformación mucho menor de

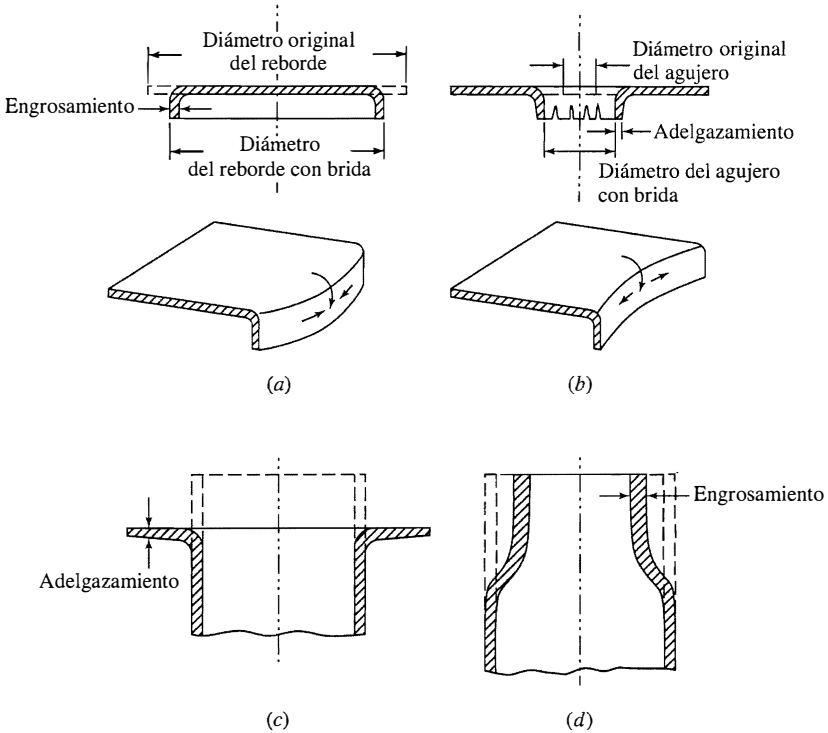


Figura 10-34 La deformación es de (*a*) compresión en la formación de brida de un disco o en el formado comprensivo de la brida en una placa, pero (*b*) de tensión en la formación de brida en un agujero de una placa (las grietas mostradas son una consecuencia de la deformación excesiva por tensión). La deformación es (*c*) de tensión en la brida de un tubo, pero de (*d*) compresión en una estricción.

lo que se esperaría a partir de la elongación por tensión, medida en ausencia de rebaba (para el efecto de la rebaba en la ductilidad, véase la Fig. 10-5*c*). En casos críticos, puede ser necesario rebabear, e incluso el rectificado del agujero.

3. Una deformación severa por tensión se impone también en el conformado para formar bridas en los extremos de un tubo o una copa embutida (Fig. 10-34*c*). En contraste, la reducción del diámetro de un tubo o de una copa (Fig. 10-34*d*) impone esfuerzos de compresión; la reducción que se puede tomar en una sola operación está limitada sólo por el colapso axial del tubo o por la formación de arrugas internas. El estrechamiento de la sección transversal de un tubo es un paso importante al fabricar casquillos para cartuchos y cilindros para gas bajo presión.

4. El *engargolado* es un proceso importante de ensamble. Una pieza previamente prevista con aletas se une a otra continuando la deformación (Fig. 10-35*a* y *b*), como en la unión (*doblado*) de las tapas interior y exterior de la cajuela, de la cubierta del motor o de las puertas de automóviles. Ejemplos de aletas de una lámina y los del extremo de un tubo (recipiente) se encuentran en el formado de engargolados dobles para sellar latas de alimentos y de bebidas (Fig. 10-35*c* y *d*).

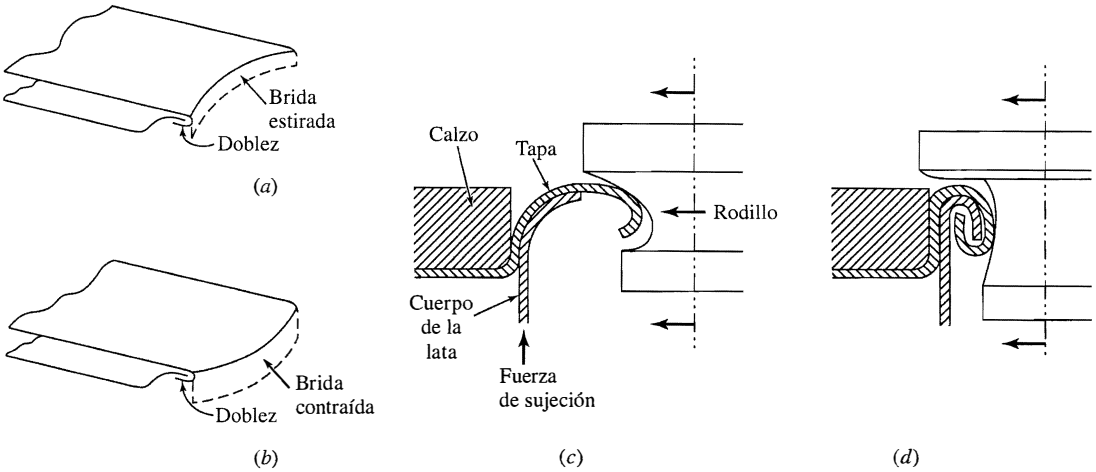


Figura 10-35 Dos piezas de lámina de metal se unen por engargolado; en bordes curvos, las bridas estiradas (*a*) o contraídas (*b*) se pliegan. Las tapas se colocan en los cuerpos de las latas por medio de engargolado de doble cierre en dos operaciones (*c*) y (*d*).

Ejemplo 10-12

Las latas de bebidas son ejemplos de avances para un mercado en masa. En la sección 5-4-1 se mencionó que sólo en Norteamérica se producen anualmente 110 mil millones (110×10^9) de latas de aluminio. La lata tiene que soportar la presión interna, la carga cuando se estiba; resistir corrosión, y hacer todo esto a un costo mínimo. Años de desarrollo han resultado en métodos de diseño y manufactura que cumplen con estos objetivos. La lata es un recipiente a presión sumamente elaborado con una base en forma de domo y una pared delgada pero muy resistente (reduciendo la pared sólo 0.0025 mm se ahorran cerca de 136 g/1 000 latas, y en consecuencia 15 000 Mg/año de refinación de aluminio). Para obtener la resistencia necesaria, el material inicial se somete al máximo endurecimiento por deformación posible mediante laminado en frío. Los discos, de 140 mm de diámetro, se estampan de una tira 3004-H19 de 0.28 mm de espesor (esfuerzo de cedencia = 280 MPa, TS = 300 MPa, el. = 5%). Ese material duro no permite razones de embutido muy altas; de ahí que, en el primer embutido con pisador (Fig. 10-21*b*), se hace una copa de entre 85 y 92 mm de diámetro. Luego la copa se transfiere al "formador de cuerpo", donde se somete a un embutido secundario (Fig. 10-27*a*) a 66 mm de diámetro y simultáneamente la pared se reduce a un espesor de 0.10 mm en los tres anillos de planchado (Fig. 10-27*b*), con reducciones de 20 a 25% en el primero y segundo anillos, y 40% en el tercero. Los formadores de cuerpo operan a 400 golpes/min. Las tendencias recientes son para tasas aún mayores y necesitan carreras más cortas, de manera que únicamente se usan dos anillos de planchado en el punzón, con una reducción de 40% en cada uno. Después de recortar (Fig. 10-3*f*), el cuerpo se lava, se decora en el exterior, se hornea, se recubre en el interior con un polímero, se hornea de nuevo, se le hace una reducción (Fig. 10-34*d*) hasta un diámetro de cerca de 55 mm, se forma la brida (Fig. 10-34*c*), se inspecciona y se envía a la planta de llenado, donde se le coloca la tapa (Fig. 10-35). La configuración reducida permite una tapa más pequeña, más fuerte y más barata. (*Datos cortesía de G.L. Smith, Alcoa.*)

Abultamiento La deformación por tensión es típica del *abultamiento* de tubos, recipientes y productos similares, al usar tapones de caucho (espuma de poliuretano) o

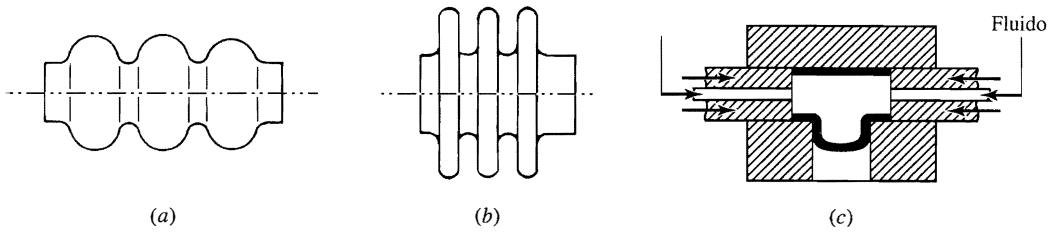


Figura 10-36 La expansión de un tubo puede ser (*a*) el primer paso, al (*b*) fabricar tubos para fuelles, o (*c*) se puede usar para hacer componentes estructurales complejos.

presión hidráulica (Fig. 10-36*a*). La técnica también representa el primer paso para fabricar fuelles metálicos (Fig. 10-36*b*); los tubos preabultados forman los fuelles, cuando se les comprime axialmente.

Hidroformado *En un grupo de procesos cada vez más importante, tubos sin costura o* soldados se deforman posteriormente por un fluido a alta presión. Los procesos se basan en el reconocimiento de que deformaciones muy grandes son posibles si se aplican simultáneamente esfuerzos de compresión axiales y la presión interna. El tubo, restringido en una matriz dividida, es comprimido entre dos punzones mientras se le aplica internamente un fluido presurizado. Originalmente, el proceso se aplicaba a piezas como conexiones T de cobre (Fig. 10-36*c*) en donde un abultamiento profundo, necesario para formar la T, se formaba sin riesgo de fractura. Recientemente, la técnica se ha convertido en un proceso de producción en masa, principalmente para la construcción de automóviles, reemplazando a la soldadura en la fabricación de ensambles. El tubo, doblado hasta la forma general de la pieza, se coloca en una matriz dividida y se expande contra la cavidad. El contacto con la pared de la cavidad detiene el adelgazamiento en ese punto, y el desarrollo posterior de la forma ocurre a costa de la reducción localizada en el espesor. Se obtiene una mejor distribución del espesor si primero se conduce la expansión a baja presión, mientras que los tapones finales se presionan para hacer que el material fluya en un estado de esfuerzos combinado de compresión-tensión (punto 5 en la Fig. 14*b*). Luego la presión se eleva para llenar los detalles. Si se requiere, los agujeros también se puede perforar en este punto.

Ejemplo 10-13

Para resistencia máxima con una masa menor, el lienzo del techo del USLAB (ejemplo 5-1) se hidroformó (como en la Fig. 10-33*b*) para aumentar su resistencia por endurecimiento por deformación. Con el fin de obtener una curva de carga, para el desempeño estructural y para manejar la energía de choque, el riel lateral del techo se hidroformó a partir de un tubo.

Conformado por alta tasa de energía (HERF) En estos procesos se usa sólo una matriz (macho o hembra). No hay prensa; la energía que se requiere para la deformación se deriva de varias fuentes. En el *conformado por explosión* se coloca una esfera

explosiva sobre la lámina; en el *formado electromagnético* se aplica un campo magnético al descargar un banco de capacitores a través de una bobina que rodea a la pieza; en el *conformado electrohidráulico* se crea una onda de choque en agua al descargar un banco de capacitores a través de un entrehierro de arqueo o a través de un alambre que se evapora. La aplicación de la presión es repentina, pero la rapidez a la que se deforma el material usualmente no es mucho mayor que en una prensa mecánica rápida. De las muchas aplicaciones posibles, el embutido de estricciones y la expansión interna de piezas tubulares y semejantes a recipientes son los más frecuentes. El último sirve como una alternativa a la expansión con un tapón de caucho o fluido hidráulico, y se puede emplear para reparar condensadores y estructuras similares de tubo/cabezal fuera del taller.

Formado por granalla En la figura 4-19*b* se vio que los esfuerzos internos desequilibrados causan la distorsión de la pieza. Como se muestra en la sección 9-2-2, el principio se aprovecha en el *formado a granalla* por medio del chorro de perdigones aplicado con discreción a una de las superficies. Con un chorro de perdigones de acero de 2 a 6 mm de diámetro impactando a velocidades de 60 m/s, se forman superficies ligeramente curvas, como el revestimiento de alas de aeronaves, y se corrigen los defectos de forma en productos como los cuerpos de cohetes.

Rechazado Las partes con simetría axial se producen a través de muchas variantes:

1. En la forma básica del *rechazado*, una lámina circular se empuja contra una matriz macho (*forma*), que a su vez se hace girar por medio de un mecanismo similar a un torno. Las herramientas conformadoras se presionan a mano, con un mecanismo de seguimiento, o bajo control NC contra la pieza, de manera que el metal se apoya gradualmente contra la superficie de la forma (Fig. 10-37*a*). El espesor de la pared permanece más o menos igual.

2. En el proceso de *rechazado por corte* (también llamado *rechazado de potencia*, *torneado de flujo* o *forjado rotatorio*), el diámetro de la pieza de trabajo permanece constante y la forma se desarrolla adelgazando la pared (Fig. 10-37*b*). La reducción

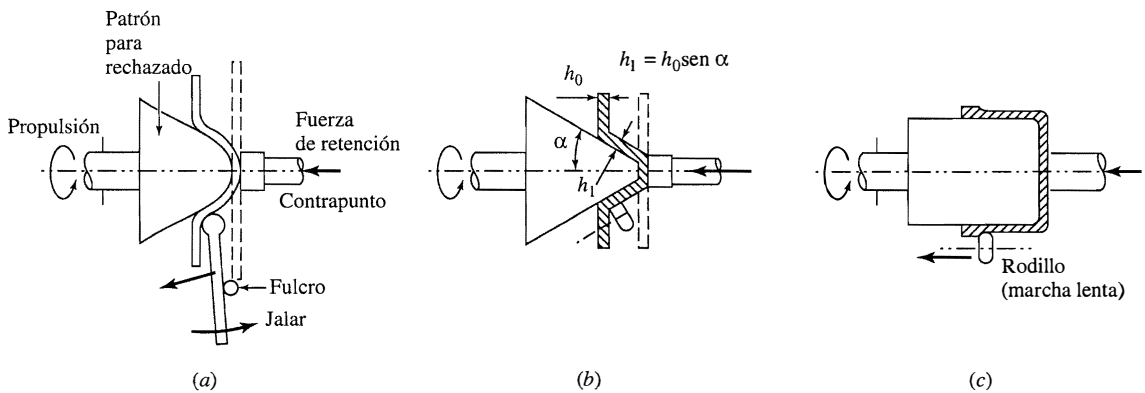


Figura 10-37 Las piezas con simetría axial se fabrican por (*a*) rechazado, (*b*) repujado y (*c*) rechazado de tubos.

máxima que se puede obtener está limitada por la ductilidad del material y se correlaciona con la reducción del área en el ensayo de tensión. En $q > 50$ se puede lograr una reducción de 80%. Las formas muy grandes de paredes gruesas se rechazan en caliente.

3. El *rechazado de tubos* es una forma del rechazado de potencia en el que se reduce el espesor de la pared de un tubo o recipiente (Fig. 10-37*c*).

Trabajado en caliente Los materiales se trabajan a temperaturas elevadas por una de tres razones:

1. Las placas, barras y tubos gruesos se calientan para reducir las fuerzas de conformado.

2. Algunos metales sólo se pueden conformar a temperaturas elevadas, así, el berilio se conforma a 540-820°C, las aleaciones de magnesio a 150-400°C, y el titanio y sus aleaciones se calientan a 480-790°C a menos que la deformación sea muy ligera.

3. El *conformado superplástico* permite la manufactura de formas complejas por medio de técnicas similares a las del termoformado de plásticos (Secc. 14-4-2). Alternativamente, la parte se forma isotérmicamente entre matrices calientes. Las aplicaciones prácticas incluyen el conformado de aleaciones de aluminio (como la aleación 7475 de grano fino: 5.6Zn-2Mg-1.5Cu-0.2Cr, a 520°C) y de la mayoría de las de titanio (particularmente Ti-6Al-4V, la cual es superplástica a 840-870°C aun sin preparación especial), principalmente para aplicaciones en aeronaves y también para elaborar prototipos.

10-10 MATRICES Y EQUIPO PARA EL CONFORMADO DE LÁMINA METÁLICA

Los materiales de las herramientas se eligen en gran parte con base en el tamaño esperado de la corrida de producción. Las herramientas para troquelado se someten a un desgaste severo y están hechas de varios aceros para matrices para trabajo en frío (Fig. 9-3). Las matrices para doblado y de embutido se fabrican de materiales similares, aunque el hierro fundido e incluso las aleaciones de zinc o los plásticos duros son adecuados para corridas de producción cortas, o para piezas de trabajo de materiales más suaves.

En contraste con el deformado de volumen, en el conformado de lámina las presiones de la matriz rara vez limitan los procesos del trabajo. El problema es, con mayor frecuencia, encontrar un material económico para la matriz y un método económico para fabricarla. El recubrimiento superficial (Cap. 19) de las herramientas expuestas a un desgaste excesivo está ganando popularidad, y los lubricantes siempre se eligen para controlar el proceso así como para reducir el desgaste de la matriz.

Las matrices —su diseño, manufactura, mantenimiento y modificación— representan una parte sustancial de los costos de producción. Las técnicas de CAD/CAM y el modelado por computadora de los procesos minimizan el esfuerzo requerido para el diseño y prueba, y permiten una respuesta más rápida a un costo mínimo, especialmente para el diseño de matrices progresivas y de matrices con configuraciones complejas (esculpidas).

Además del equipo de propósito especial, la mayoría del conformado en prensa utiliza las prensas accionadas mecánicamente y, cada vez más, prensas hidráulicas. Los embragues adecuados permiten la operación de las prensas mecánicas en golpes individuales (iniciadas por el operador) o continuamente, a una rapidez de 30 a 600 golpes por minuto. El principio de construcción es similar al de las prensas que se usan en la deformación volumétrica (Fig. 9-36 y tabla 9-4), pero sus características especiales y, para el mismo tonelaje dado, las camas mucho mayores propician que sean más adaptables para el trabajo de lámina de metal.

Las prensas menores con frecuencia tienen un bastidor que se puede inclinar, lo que facilita la remoción por gravedad de la pieza estampada. Las prensas mayores pueden tener dos o incluso tres arietes móviles independientes, uno dentro del otro. Esas prensas de doble y triple acción incorporan dispositivos para sostener o sujetar la pieza y para su expulsión; además, permiten operaciones más complejas. Los *colchones* de resortes, de aire o hidráulicos, proporcionan presión en el sujetador de la pieza en prensas de acción sencilla y agregan flexibilidad a la operación. La alimentación y la remoción de la pieza mecánicas o robotizadas aceleran la producción. El cambio y la alineación de la matriz son tardados pero se pueden acelerar en gran medida por técnicas de cambio rápido de matriz, moviendo matrices prealineadas dentro y fuera de la prensa, a través de aberturas laterales o frontales en el bastidor de la prensa.

10-11 ALCANCES DEL PROCESO Y ASPECTOS DEL DISEÑO

Los procesos para lámina de metal son muy versátiles, pero se deben tomar en cuenta algunas limitaciones respecto a la forma (tabla 10-2). Las dimensiones abarcan un rango muy amplio, desde componentes electrónicos en miniatura hasta el troquelado de componentes laterales de carrocería de automóviles, de 4 m de longitud y las superficies envolventes de alas de avión, de 25 m de longitud formadas por termofluencia o por granalla, para la aeronave Boeing 747. Las tolerancias pueden ser muy altas y a través de varios procesos es factible fabricar piezas en su forma definitiva. El diseño de piezas debe tomar en cuenta las limitaciones específicas.

En el troquelado, el puente de desperdicio (Fig. 10-3*b*) representa pérdida de material. El ancho mínimo del puente está limitado por el riesgo de jalar el material hacia el claro de la matriz, y es usualmente $w = 2h$ (Fig. 10-3*b*), pero se puede reducir a $w = h$ con alta presión en el pisador y lámina más gruesa y rígida. Los diámetros del agujero rara vez pueden ser menores que el espesor de la lámina y deben ser de hasta $2h$ en materiales más duros. La forma de las piezas deberá permitir el anidado económico (Fig. 10-3*b*) o incluso un corte sin desperdicio (Fig. 10-3*c*). Es posible optimizar el consumo del material por medio de la adecuada *configuración y anidado* de las piezas, un arte asistido considerablemente por programas de computadora. La productividad se eleva aún más y las pérdidas de material se reducen con el corte de blancos en hileras múltiples a partir de una tira más ancha.

El radio mínimo de las piezas dobladas se elige para evitar la fractura y, si la apariencia o la resistencia del acabado lo requieren, también la estricción (Secc. 10-4-2). El

Tabla 10-2 Características generales de los procesos de trabajo de lámina de metal

	Proceso de conformado						
Características	**Troquelado**	**Doblado**	**Estirado**	**Embutido profundo**	**Estirado-embutido**	**Formado con matriz de caucho**	**Rechazado**
Pieza							
Lámina	Todos	Todos	Todos	Todos	Todos	Todos	Todos
Forma*	F0-2, T7	R3; B3; S0, 3, 7; SS; T3; F3, 6	F4; S7	T4; F4, 7	F4; S7	Como en el punzonado, doblado, embutido	T1, 2, 4, 6; F4, 5
Espesor máx., mm	10	100	2	5	2	2	25
Costo†							
Equipo	B-D	C-E	B-C	A-C	A-C	A-C	B-D
Matriz	C-E	B-E	A-C	A-B	A-C	C-D	B-D
Mano de obra	C-E	B-E	B-E	C-E	B-E	A-D	B-C
Acabado	D-E	D-E	C-E	D-E	C-E	B-D	D-E
Producción							
Habilidad del operador†	D-E	B-E	B-E	D-E	B-E	C-E	A-C
Tiempo de entrega	Días	Horas-días	Días-meses	Semanas-meses	Días-meses	Días	Días
Rapidez (pieza/h)	10^2-10^5	10-10^4	10-10^2	10-10^4	10-10^4	10-10^2	10-10^2
Cantidad mínima	10^2-10^4	1-10^4	10-10^5	10^3-10^5	10^3-10^5	10-10^2	1-10^2

* 30= De la figura 3-1.

† 31= Clasificaciones comparativas, donde A indica el valor más alto de la variable y E el menor. Por ejemplo, el embutido profundo implica costos elevados del equipo y de la matriz, costo bajo o muy bajo de mano de obra y del acabado, y habilidad requerida del operador baja a muy baja. Se puede usar para una tasa de producción de media a alta y requiere una cantidad mínima de 1 000 a 100 000 piezas producidas para justificar el costo de la matriz.

radio máximo se alcanza cuando no existe deformación plástica. La recuperación elástica aumenta con la razón R_b/h (Secc. 10-4-3), y el diseño del proceso debe incluir una compensación. Si el doblado se combina con el estirado, pueden darse razones R_b/h muy grandes, a condición de que la fricción sea lo suficientemente baja para asegurar el deslizamiento sobre la matriz.

Las piezas formadas por estirado sufren adelgazamiento por la naturaleza del proceso. En realidad, esto es benéfico cuando el material se endurece por deformación, y el adelgazamiento es un medio mecánico importante para elevar la resistencia a la abolladura de una parte. El deslizamiento sobre la superficie del punzón, y por lo tanto el endurecimiento por deformación, se puede fomentar evitando irregularidades superficiales en el diseño de la parte y aplicando un lubricante de baja fricción en el proceso. Es posible lograr un estirado más profundo, con un proceso que someta a la parte a esfuerzos transversales.

Las formas más sencillas de embutido profundo (copas cilíndricas con fondo plano) con un radio del fondo de $5h$-$10h$ son las más favorables. Las paredes delgadas se obtienen fácilmente por medio de planchado. Las copas escalonadas se pueden embutir

fácilmente a través de embutidos sucesivos. Las formas cónicas son más difíciles; una copa escalonada se puede convertir en un cono, pero se mostrarán los rebordes de la matriz. Los procesos alternos como el hidroformado y el rechazado deberán ser considerados. Las formas más complejas requieren de varias operaciones, pero es factible justificar el costo si se reemplaza un ensamble de piezas múltiples, con una sola.

Las piezas con forma rectangular o irregular se pueden embutir o someterse a procesos combinados de estirado-embutido. En general, los vértices agudos de la matriz y los detalles locales profundos dificultan la manufactura, pero no la imposibilitan, como se ejemplifica con el cárter del aceite de los automotores, con el compartimiento de la llanta de repuesto en la cajuela, y muchas otras piezas prensadas, de la carrocería de un automóvil. Los ajustes menores (y funcionalmente insignificantes) a la forma de la pieza (típicamente, radios mayores) a menudo proporcionan soluciones más económicas a los problemas de producción. El modelado del flujo del metal es ya una ayuda valiosa en el análisis de la factibilidad de producir un componente determinado.

El rango de formas se puede expandir aún más si las limitaciones convencionales se relajan. Un buen ejemplo al respecto es la charola para cenar con compartimientos múltiples, en la cual el arrugado y el doblado no sólo se permiten, sino que incluso se fomentan. Esto proporciona la rigidez necesaria, al tiempo que facilita embutidos profundos, que excederían por mucho la ductilidad de la lámina dura de aleación de aluminio.

Ejemplo 10-14

Considere fabricar la brida del ejemplo 7-9 (de la Fig. 7-9*b*) por medio del conformado de lámina. De la tabla 10-2, los enfoques posibles son: doblar una tira de metal en un anillo y soldar; doblar una lámina; rechazar el extremo de un tubo.

1. El doblado de una tira de lámina de $20 \times 20 \times 5$ mm en un anillo de 60 mm de DI implica una deformación severa y, aunque esto se puede hacer, no es práctico.

2. Formar la brida en una lámina requiere cortar una pieza circular con un agujero y embutir el cuello (*a*). Suponga que toda la deformación se realiza al estirar el cuello. El agujero que se va a perforar es: $(DI + 2FH + 2FT) = 60 - 40 + 10 = 30$ mm. La deformación unitaria por tensión es

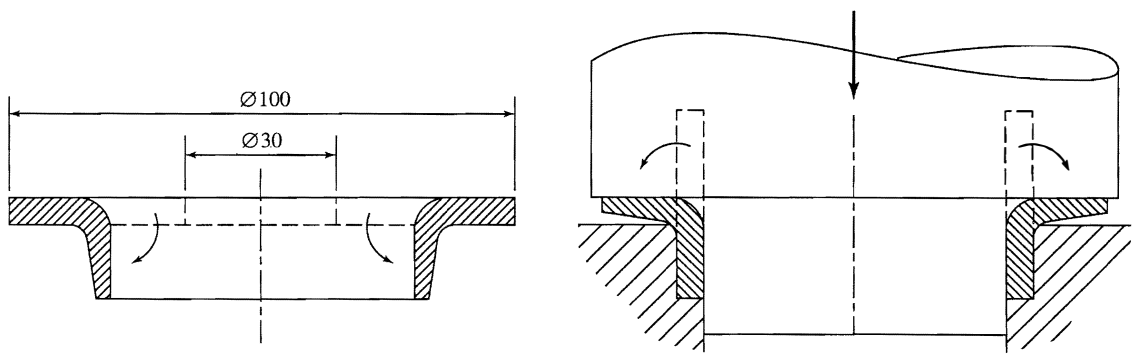


Figura ejemplo 10-14

$e = [(60\pi - 30\pi)/30\pi]100 = 100\%$. Esto excede obviamente la capacidad de deformación en frío de todos los metales.

3. Formar la brida en el extremo del tubo (*b*). Suponga que no fluye material en la dirección axial; de esta manera, el ancho *dx* de la fibra externa permanece sin cambio, y *t* se reduce en proporción al incremento de la circunferencia. La deformación por tensión es:

$$e_t = [(100\pi - 60\pi)/60\pi]100 = 67\%$$

De nuevo se excede la elongación uniforme de todos los materiales.

4. Fabricar una brida rechazando el extremo de un tubo. Ahora el factor limitante es la reducción de área *q*, en vez de la elongación por tensión. De (*b*), el volumen de la fibra externa permanece constante: $60\pi(5) = 100\pi(t)$; de aquí que, $t = 3$ mm. La deformación unitaria por compresión es:

$$e_c = [(5 - 3)/5]100 = 40\%$$

valor que queda dentro de la capacidad de la mayoría de los metales (ya que el rechazado impone esfuerzos sustanciales de compresión).

Ejemplo 10-15

En general, el conformado de lámina de metal no es atractivo para una brida pequeña con gran espesor de pared. La situación cambia si se incrementa la razón del diámetro de la brida al espesor de la pared. Ahora considere DE = 140, DI = 100, FH = 20, y DC = 104 (FT = 2 mm).

1. Para formar la brida, al ignorar el radio RF, el agujero que se va a punzonar es (DI – 2FH + 2FT) = 64 mm. El estirado es:

$$e_t = [(100 - 64)/64]100 = 56\%$$

De nuevo, la deformación unitaria por tensión es excesiva.

2. Una posibilidad, no obvia a partir de la tabla 10-2, es embutir parcialmente una copa y luego perforar el fondo. La geometría de la pieza cambia porque a la matriz de embutido se le debe dar un radio $R_F = 6$ mm, o mejor 10 mm, y el punzón también debe tener un radio (digamos, $R_p = 5$ mm). Al ignorar estos radios, y suponiendo que no hay cambio en el espesor de la lámina, el área de la superficie de la pieza es:

$$[(140^2 - 100^2)\pi/4] + (100\pi)(25 - 4) + 100^2\pi/4 = 21\,991 \text{ mm}^2$$

de esto, el diámetro del blanco es:

$$d_0 = [(21\,991)4/\pi]^{0.5} = 167.3 \text{ mm}$$

y la razón de embutido = 1 167.3/100 = 1.67, bien dentro del rango permisible. Al perforar, el collar tendrá un borde filoso. Si esto no es aceptable, se puede recortar a través del cuello (Fig. 10-3*f*). Si el DE de la brida es crítico, se debe usar un blanco más grande, para que el contorno externo se pueda recortar. Esto es especialmente importante si el orejeado causa un ancho irregular de la brida.

Ejemplo 10-16

El proyecto USLAB (ejemplo 5-1) ilustra muchos aspectos del diseño para trabajo de lámina de metal. Más de 90% de la estructura de la carrocería consiste en aceros de alta resistencia (esfuerzo de cedencia = 210-550 MPa) y de ultraalta resistencia (esfuerzo de cedencia > 550 MPa), y en el diseño de la matriz se debió tomar en cuenta la alta recuperación elástica de estos materiales.

Casi la mitad de la masa de la carrocería consiste de blancos a la medida, con una lámina de espesores y resistencias variables; esto también debió considerarse en el diseño de la matriz. Se empleó hidroformado (ejemplo 10-13) donde el conformado convencional no pudo proporcionar las propiedades requeridas. La simulación del proceso se confirmó por la producción real con matrices suaves (excepto por el hidroformado tubular, para el que se necesitaron matrices duras).

10-12 RESUMEN

Mucho más de la mitad de la producción total de metal termina en forma de componentes de lámina metálica. Con frecuencia, las piezas se unen en ensambles grandes. La variedad de productos es inmensa, desde fuselajes de aviones y carrocerías de automóviles hasta cuerpos para artículos electrodomésticos, desde vigas de construcción y bastidores de camiones, a patas de mobiliario, desde enormes barcos cisterna y tinas de baño hasta latas de bebidas, y de aros para neumáticos y hojas de ventiladores a pulseras para relojes.

1. Como la mayor parte de la deformación resulta de la imposición de un esfuerzo de tensión, y como muchas piezas son altamente visibles en servicio, se vuelven importantes la ductilidad bajo tensión, los fenómenos del punto de cedencia y la anisotropía de la deformación plástica.
2. El corte de lámina (para estampar blancos y punzonado) no conduce a un corte perfectamente liso y perpendicular, pero se puede obtener una calidad aceptable si se hace con una holgura adecuada de la matriz, tal que impida la flexión de la lámina. Una presión hidrostática elevada cambia el proceso de corte a algo parecido a la extrusión, dando como resultado un filo "cortado" liso. La mayoría de las aplicaciones son para la producción en masa, pero la producción económica en lotes pequeños es posible con máquinas CNC.
3. El doblado, el formado de bridas en agujeros, el rechazado y el conformado por estirado, son limitados por el inicio de la estricción o por la fractura; la primera está relacionada con la elongación uniforme (y de esta manera con el valor n); la segunda con la resistencia a la tensión triaxial (y así con la reducción en el área q en la prueba de tensión uniaxial). La localización de la estricción se puede diferir cambiando de tensión uniaxial a biaxial y controlando la fricción en el punzón de formado por estirado. Si se requiere en verdad una forma compleja, ésta se puede producir en una secuencia de operaciones. La conveniencia de los materiales para una tarea dada se puede juzgar por medio de los diagramas de límite de formado.
4. El embutido profundo está limitado sobre todo por el valor r, aunque la RLE también es una función de las variables del proceso tales como la fricción y la geometría de la pieza. Los embutidos secundarios y el planchado permiten la producción de piezas con una razón amplia de profundidad al diámetro, de pared delgada combinada con fondo grueso, de vértices de radio cero y de forma ahusada o escalonada.

5. Es posible combinar varios procesos, y la variedad de formas producidas por medio de la unión del estirado y del embutido es prácticamente ilimitada. El pronóstico del éxito es factible a través del análisis de la forma y del proceso de modelado asistido por computadora. Las piezas pueden tener secciones transversales variables (por ejemplo, una estricción o un abultamiento en una parte con forma de copa) y características transversales variables (tales como agujeros perforados al lado de los recipientes).
6. Además de las precauciones usuales, se debe poner especial cuidado en resguardar el espacio de trabajo de las prensas y en la protección contra el ruido.

PROBLEMAS 10A

10A-1 Haga tres bosquejos del troquelado con una holgura: (*a*) óptima, (*b*) insuficiente, (*c*) excesiva. Debajo de cada bosquejo, muestre los bordes de las piezas estampadas (identifique las características sobresalientes de la superficie cortada). (*d*) Indique si el claro óptimo es mayor para una tira recocida que para una laminada en frío, endurecida del mismo material,

10A-2 Trace esquemas de al menos dos métodos para mejorar la calidad del corte en el proceso de troquelado (que no sean subsiguientes a él) y dé nombres a los mismos.

10A-3 (*a*) Enuncie las dos propiedades mecánicas de los materiales que son más importantes para influir en la recuperación elástica. (*b*) Observe si ésta se incrementa con dichas propiedades; o disminuye.

10A-4 Indique si para un espesor de lámina dado, la recuperación elástica es mayor para un radio de doblado mayor o menor.

10A-5 Con breves descripciones, sugiera al menos tres métodos para hacer dobleces con un ángulo de exactamente 90°.

10A-6 (*a*) Dibuje un bosquejo del estirado de una lámina sobre un punzón hemisférico. En un diagrama adjunto, muestre la distribución de la deformación unitaria con (*b*) fricción baja y (*c*) fricción alta.

10A-7 (*a*) Dibuje un diagrama de límite de formado típico del acero al bajo carbono y de algunas aleaciones de aluminio. Identifique los ejes. Marque los puntos que corresponden a (*b*) la tensión biaxial equilibrada y a (*c*) deformación plana.

10A-8 (*a*) Dibuje una curva típica de ensayo de la tensión uniaxial en el acero al bajo carbono, con elongación en el punto de cedencia. (*b*) Explique la causa del fenómeno observado. (*c*) Indique al menos un método para eliminarla de manera temporal. (*d*) Defina el envejecimiento por deformación. (*e*) Superponga en la curva (*f*) la curva correspondiente al ensayo de tensión típica de un material envejecido por deformación.

10A-9 Defina, con la ayuda del boceto de una probeta de la prueba de tensión, el valor r.

10A-10 ¿Cuál es el significado de RLE? Defínalo por medio de un bosquejo.

10A-11 Dibuje un diagrama que muestre la dependencia de la RLE del valor de r. Indique el rango de los valores típicos de r, para los metales fcc, bcc y hcp.

10A-12 Explique las consecuencias de usar presión del pisador (*a*) demasiado baja y (*b*) demasiado alta en el embutido profundo.

10A-13 (*a*) Dibuje un boceto de una operación de embutido profundo, mostrando una copa parcialmente embutida. (*b*) Defina RLE. (*c*) Enuncie la condición para que ocurra la fractura. (*d*) Muestre los efectos del esfuerzo de cedencia, TS, el., n, m, q, r, fricción del pisador y del punzón en la RLE [tabule los efectos: use el signo + para indicar que una cantidad incrementa la RLE, el signo – cuando la disminuye y 0 cuando el efecto sea muy pe-

queño]. (*e*) Con base en el inciso (*d*), escriba qué combinación de variables proporcionaría la mayor RLE.

PROBLEMAS 10B

10B-1 Los filos de los punzones y de los troqueles de corte gradualmente se redondean en servicio debido al desgaste. (*a*) Explique, con la ayuda de un bosquejo, las consecuencias de ello, en términos de la geometría del proceso. (*b*) En un bosquejo adjunto, indique los cambios que se deben esperar en la calidad del corte.

10B-2 Se van a fabricar engranes rectos pequeños; las superficies de los dientes deben ser paralelas al eje del engrane y tener un acabado liso. Se considera el corte de los blancos a partir de una lámina. (*a*) ¿Es posible esta propuesta? (*b*) Si la respuesta es afirmativa, haga un bosquejo de un proceso (identificando los elementos de la matriz) que asegure la calidad requerida. (*c*) Explique por qué funciona el proceso (si es necesario, con otro boceto).

10B-3 El troquelado en una placa de acero duro se hace en una prensa mecánica. En cada corte, la prensa repentinamente "truena" con un fuerte estampido. (*a*) Encuentre una explicación para el fenómeno. (*b*) Sugiera una forma de minimizarlo (el material no se puede cambiar).

10B-4 El Departamento de Control de Calidad rechazó una pieza doblada porque su superficie tiene rugosidad de cáscara de naranja; el Departamento de Producción quiere usarla. Para mediar la situación, (*a*) explique con un bosquejo la fuente del efecto y (*b*) formule una pregunta cuya respuesta disipará la duda.

10B-5 ¿Qué propiedades de lámina especificaría para (*a*) el doblado sin apariencia de cáscara de naranja, (*b*) el doblado hasta radio cero, (*c*) la mayor resistencia a la deformación permanente, en situación de servicio. Justifique sus elecciones.

10B-6 Una pieza de lámina de metal se fabrica doblando acero 1015, de 5 mm de espesor en un borde afilado (radio cero). Muchas piezas fallan en servicio y, para incrementar la resistencia, ahora se propone cambiar a acero 1045. Haga un juicio de ingeniería, rápido, sobre la viabilidad de este cambio.

10B-7 Se le pide explicar si la anisotropía plástica tiene un efecto en el doblado. (*a*) Primero dibuje un bosquejo para definir el valor *r*. Luego suponga que una barra rectangular de 20 mm de ancho y 10 mm de espesor se dobla sobre un radio de matriz de 10 mm. Dibuje bocetos para mostrar de manera cualitativa los cambios en el ancho y en el espesor que se deberán esperar para materiales de valor *r* (*b*) alto y (*c*) bajo.

10B-8 Considere la deformación forzada sobre el material durante el doblado alrededor de un radio agudo. Indique qué valores de (*a*) *n*, (*b*) *m*, (*c*) *q* y (*d*) *r* son deseables para evitar el adelgazamiento excesivo o la fractura. Responda simplemente "alto" o "bajo" y justifique cada uno en una oración breve.

10B-9 Un componente de tipo de palanca se fabrica doblando una preforma. A la mitad de una corrida grande de producción, se nota que cierto número de piezas se fractura, parcial o completamente, durante el doblado. (*a*) Sugiera la causa más probable, suponiendo que todos los blancos se cortan del mismo lote de material, así como soluciones en las operaciones de (*b*) troquelado y (*c*) doblado.

10B-10 Un componente pequeño de precisión de tipo de palanca por una cámara se debe doblar a un ángulo exactamente de 90°, y el ángulo siempre debe ser el mismo. (*a*) Indique qué variaciones en el material de la tira se pueden esperar en un lote de producción. (*b*) Se ha sugerido que el ángulo de 90° deseado siempre se asegurará sobredoblando hasta un ángulo menor. ¿Está de acuerdo? ¿Por qué? (*c*) Si no, dibuje un boceto del proceso posible que siempre resulte exactamente en 90°.

10B-11 La lámina HSLA puede presentar fibración. (*a*) Defina HSLA y (*b*) fibración. (*c*) ¿Esta última afectará el doblado? (*d*) Si lo hace, ¿cuál es la dirección más favorable para el doblado?

10B-12 Una pieza prensada de un automotor falla en la producción. La pieza se forma prácticamente por estirado puro, usando rebordes de estirado en las matrices. (*a*) ¿Qué haría para analizar el problema? (*b*) ¿Cuál es el estado de deformación probable en el punto de fractura (utilice un diagrama de límite de formado). (*c*) Indique dos soluciones posibles en el DLF, manteniendo la forma de la pieza prensada sin cambio. (*d*) Si nada de esto funciona, ¿qué otra cosa se podría intentar?

10B-13 Marcas de deformación por estiramiento son visibles sobre superficies ligeramente estiradas de piezas de acero prensado. (*a*) Explique la causa de este fenómeno. (*b*) Identifique el tipo de acero usado. (*c*) ¿De dónde proviene la falla, del laminado o del prensado? (*d*) ¿Qué podría hacerse en la laminadora para eliminar el problema (sin cambiar la composición del acero)? (*e*) ¿Podría ser responsable del problema el taller de prensado? (*f*) ¿Hay algo que éste pudiera hacer para remediar la situación? (Dibuje bocetos que ayuden a clarificar sus respuestas.)

10B-14 El laboratorio realizó una averiguación sobre dos rollos de lámina de acero y concluyó que (*a*) el rollo que presenta elongación en el punto de cedencia, es acero efervescente y que (*b*) el otro, el cual no lo presenta, es acero calmado. Enuncie todas las interpretaciones posibles para ambos casos.

10B-15 (*a*) Dibuje una curva típica esfuerzo-deformación de ingeniería que muestre la elongación del punto de cedencia (EPC). Marque los ejes. Explique qué efecto tiene la EPC en el (*b*) troquelado, (*c*) doblado, (*d*) formado por estirado ligero, (*e*) formado por estirado severo y (*f*) embutido profundo.

10B-16 En el conformado de una pieza por estirado se origina una fractura prematura cerca de la línea de contacto del punzón. Sugiera una solución; justifique su respuesta con un bosquejo.

10B-17 Una pieza falla en el curso del embutido profundo. (*a*) La fractura ocurre hacia el final del proceso; identifique el origen probable del problema y sugiera una solución factible. (*b*) Si la fractura ocurre antes, señale la fuente posible del problema e indique tantos remedios como sea posibles.

10B-18 Obtenga muestras de recipientes (latas de bebidas, de alimentos, de sardinas, etcétera). Con tijeras de hojalatero, córtelas y ábralas; mida el espesor de la pared, base y tapa, y haga juicios sustentados sobre los métodos probables de manufactura. (*Precaución*: la lámina delgada tiene bordes afilados como navaja y se debe manejar con el mayor cuidado, usando guantes de protección.)

10B-19 Se ha sugerido que, para la máxima reducción en el embutido profundo los radios del punzón y de la matriz deben ser tan grandes como sea posible. Someta esta sugerencia a una crítica; emplee un bosquejo para apoyar su argumento.

10B-20 Se plantea que, para evitar el orejeado en el embutido profundo, la lámina deberá estar libre de (*a*) fibración mecánica, (*b*) anisotropía planar y (*c*) anisotropía normal. Someta cada enunciado a una crítica y justifique sus respuestas.

10B-21 Una variedad de copas embutidas, fabricadas de varios materiales, presenta las características siguientes: (*a*) una oreja, (*b*) dos orejas, (*c*) cuatro orejas, (*d*) seis orejas, (*e*) ocho orejas. Analice cuál es la causa más probable del problema, en cada caso.

10B-22 Se asegura que siempre se necesita un pisador en el embutido profundo. (*a*) ¿Está de acuerdo? (*b*) Si no, indique (cualitativamente) las condiciones determinantes.

10B-23 Para explicar la importancia del valor r, dibuje a escala la sección transversal de una probeta para ensayo de tensión de 12×6 mm (*a*) antes de la deformación y después del 50% de deformación, si el valor r es (*b*) cero, (*c*) unitario y (*d*) infinito. (*e*) En un boceto separado, muestre el efecto de un valor r alto sobre la superficie de cedencia en el esfuerzo plano. (*f*) A través de un bosquejo de un segmento de una copa parcialmente embutida, explique el efecto sobre la RLE.

10B-24 Algunas latas de alimentos de dos piezas están fabricadas de hojalata; (*a*) Defina hojalata. Suponiendo que la lata tiene una razón altura-diámetro de 2:1 y que la base y la pared son del mismo espesor, (*b*) sugiera un proceso o secuencia de procesos para fabricar el cuerpo (responda dibujando dos bosquejos de las características clave de las matrices usadas).

10B-25 Una lata común para refresco de aluminio de dos piezas, tiene una pared mucho más delgada que la base. Sugiera una secuencia de producción probable (utilice bocetos de las herramientas que indiquen las dimensiones del espesor relativo de la pared).

10B-26 Una lámina de Al 1100 de temple duro de $\frac{1}{4}$ (H12, Secc. 8-3-3) se embute para formar copas cilíndricas, las cuales presentan orejeado y son de altura insuficiente cuando se recortan. Se ha sugerido que al recocer la lámina se eliminará el problema. (*a*) Defina las causas del orejeado y (*b*) explique si el recocido siempre resolverá el problema.

10B-27 En los trabajos iniciales sobre el embutido de mitades de barriles de cerveza de una aleación de aluminio, la producción de prototipos fue exitosa. Para la producción a escala completa, las herramientas se pulieron cuidadosamente. Todas las piezas fallaron. Las pruebas demostraron que no hubo cambio en el material. Ofrezca una explicación.

PROBLEMAS 10C

10C-1 Un tazón hemisférico se va a fabricar de acero inoxidable 302 de 1.5 mm de espesor. En el primer paso, se corta un blanco circular de 600 mm de diámetro. (*a*) Calcule la fuerza requerida. (*b*) En un bosquejo muestre cómo se podría reducir esta fuerza conformando apropiadamente la matriz o el punzón (¡el blanco debe permanecer plano!).

10C-2 La pieza del problema 10C-1 ahora se transforma en un tazón al formar por estirado un hemisferio de 400 mm de diámetro. (*a*) Dibuje un boceto de un juego apropiado de matrices. (*b*) Dé la información disponible; estime si ocurrirá la fractura. (*c*) Si la respuesta es afirmativa, sugiera al menos un proceso para fabricar la parte.

10C-3 Blancos circulares de Al 1100, de diámetro d = 25 mm y espesor h = 3 mm, se van a producir en masa como materia prima para la extrusión (extrusión por impacto) de tubos colapsables. Las prensas disponibles son de 800 kN de capacidad y pueden aceptar una tira con ancho máximo de 300 mm. La economía de la utilización del material se incrementa al cortar más filas del ancho de la tira. Calcule (*a*) la fuerza necesaria para troquelar un solo blanco y (*b*) el número máximo de blancos que se pueden troquelar de modo simultáneo con la prensa disponible. (*c*) Diseñe la distribución óptima para los trozos y la anchura de la tira si el esqueleto (material remanente entre los cortes y en las orillas) es aproximadamente h.

10C-4 Se van a fabricar blancos de latón 70/30 para la pieza de la figura del ejemplo 10-14*a*. Calcule las fuerzas requeridas para el (*a*) troquelado y el (*b*) punzonado del agujero.

10C-5 Calcule el factor de utilización del material al estampar los anillos para la parte de la figura del ejemplo 10-14*a* en la configuración de (*a*) una sola fila, (*b*) doble fila y (*c*) triple fila. (Tome las dimensiones del puente de desperdicio de la sección 10-11.) (*d*) Vuelva a calcular suponiendo que se pueden aprovechar las perforaciones de 30 mm.

10C-6 Deduzca las ecuaciones (10-3*a*) y (10-3*b*) a partir de definiciones básicas.

10C-7 Una lámina de acero inoxidable 302 de 1 mm de espesor se dobla en radios de 2, 10, 50, 100 y 250 mm. Calcule los valores aproximados de los mismos, después de la recuperación elástica.

10C-8 De la teoría sencilla de la flexión elástica, deduzca la fuerza necesaria para el doblado libre de una lámina de espesor h y ancho w. Para tomar en cuenta los efectos de la deformación plástica, duplique el resultado final.

10C-9 El techo de los automóviles se podría fabricar de (*a*) acero DQSK, (*b*) acero HSLA ($\sigma_{0.2}$

= 310 MPa) o (*c*) de una aleación de aluminio (similar a la 6061-T6). Esto influirá en el diseño de la matriz; haga un juicio cuantitativo sobre cuál de estos materiales proporcionará la mayor recuperación elástica después del conformado.

10C-10 Continuando con el problema 10C-9, diseñe el radio de la matriz para obtener un radio terminado de 100 mm con las tres láminas, todas de 0.75 mm de espesor [ignore el término cúbico en la ecuación (10-5)].

10C-11 Una pieza de lámina de metal de 6 mm de espesor, doblada, está hecha de acero inoxidable 410. El radio del doblez es de 1 mm. Todas las partes presentan estricción y algunas incluso se han fracturado. (*a*) Trace un esquema de un proceso de doblado, incluyendo la distribución de esfuerzos en el componente. (*b*) Indique qué propiedades influyen en la estricción y (*c*) en la fractura. (*d*) En el curso de un rediseño, se propone que la pieza se fabrique de acero al carbono, 1008, subsecuentemente se recubre para que resista a la corrosión. ¿Presentará este acero menos estricción y fractura? Haga un juicio cuantitativo (no se necesitan cálculos).

10C-12 Un cliente desea ordenar 200 platos de diámetro $d = 1\,000$ mm y profundidad = 250 mm, de Al 5052, en la forma de un segmento esférico. Como primer paso, se realiza un diseño conceptual del proceso. (*a*) La primera idea es fabricar los platos por estirado profundo. Dibuje un bosquejo e indique la dificultad principal. Considere también la economía del proceso. (*b*) Luego se propone conformar al plato por estirado puro. Determine si es posible. (*c*) Sugiera un proceso alterno posible.

10C-13 Los reflectores parabólicos están hechos de una lámina de aleación de Al-Mg (similar a la 5052) por estirado puro. (*a*) Haga un boceto del proceso, marcando claramente los cambios relativos del espesor de la pared y los elementos de la matriz. (*b*) Algunas de las partes estiradas presentan fractura lejos del ápice. Plantee una solución (el proceso aún debe ser estirado puro). (*c*) Si el reflector aún no se puede fabricar, ¿ayudaría cambiar el diseño a un acero inoxidable 302 o 410? ¿Por qué?

10C-14 Una copa de fondo plano se produjo exitosamente a partir de una lámina de acero al bajo carbono con calidad para embutido. Para mayor resistencia a la corrosión, el diseño se cambia para fabricar la copa de una (*a*) aleación de Al 5052 o de (*b*) titanio puro. Explique los cambios que se deben esperar en su comportamiento en el de conformado.

10C-15 Un recipiente cilíndrico (una olla de cocina) de 200 mm de DE, 160 mm de profundidad, 2 mm de pared y 5 mm de espesor del fondo se va a producir de una aleación de Al 5052-H24, primero embutiendo un recipiente (copa) y luego reduciendo el espesor de la pared. Verifique la factibilidad del diseño. (*a*) Suponiendo que el espesor de la pared del recipiente en el primer embutido es el mismo que el de la lámina inicial, calcule el diámetro del blanco inicial; (*b*) calcule la fuerza requerida para cortar el blanco; (*c*) verifique si el recipiente embutido se puede fabricar en un solo golpe. Si no, dibuje bocetos de la secuencia del proceso sugerida. (*d*) Seleccione el diámetro del punzón para el primer embutido y calcule la fuerza respectiva. (*e*) Sugiera dos métodos para producir las ollas terminadas; ilustre con bosquejos.

10C-16 Demuestre que, para un material que obedece la ley de potencia del endurecimiento por deformación, $TS = K(n/e)^n$.

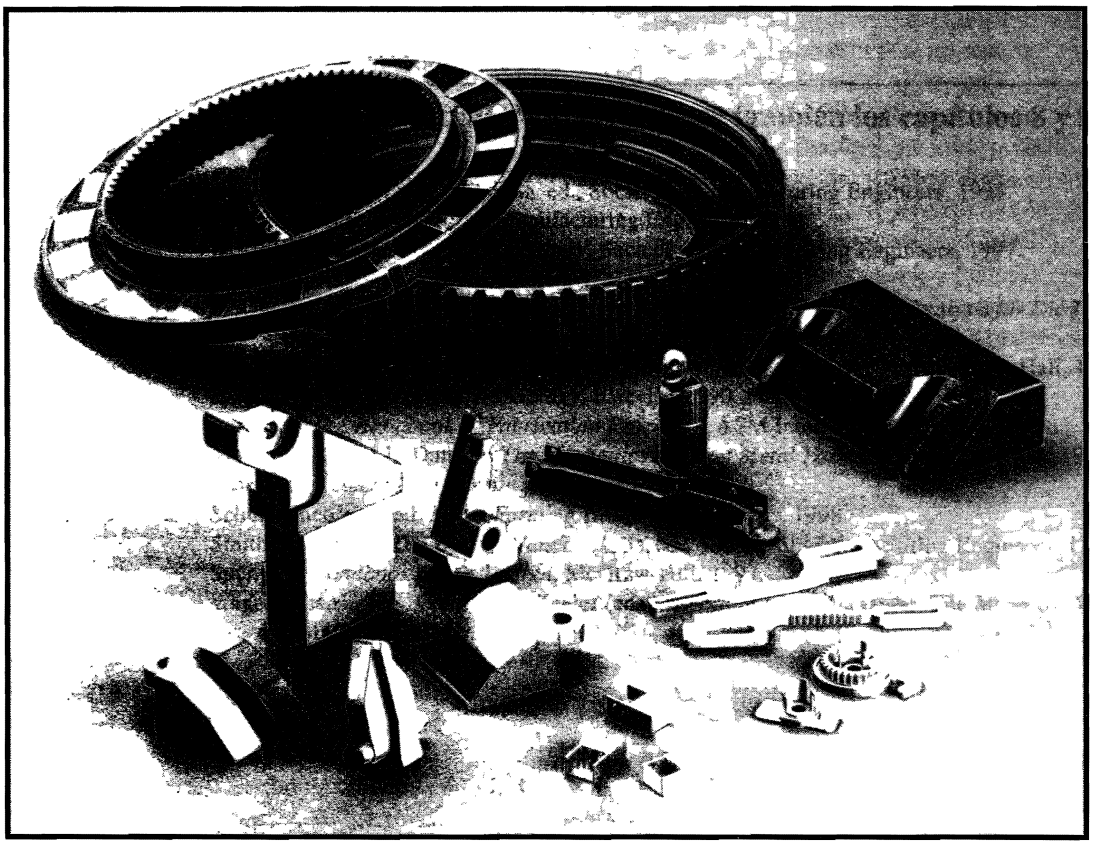
10C-17 En el ejemplo 10-15 se indicó que una brida se podría formar estirando parcialmente una pieza de 167.3 mm de diámetro para formar una copa de 100 mm de diámetro. (*a*) Haga un boceto de la parte parcialmente embutida. (*b*) Se le pide predecir el tamaño requerido de la prensa si el material es latón 70/30. ¿Hay suficiente información para esto en el libro? (*c*) Si no, ¿puede hacer un juicio de un límite superior para la fuerza de la prensa? (*d*) Si la respuesta es afirmativa, realice los cálculos correspondientes.

10C-18 Utilizando definiciones básicas, convierta RLE = 2.4 en reducción porcentual del diámetro.

10C-19 En el ejemplo 10-14, parte 3, se tenía una deformación unitaria por tensión de 67%; en la parte 4 había una deformación por compresión de 40% para casi la misma deformación. Reconcilie la aparente contradicción (*a*) a partir de las definiciones básicas de deformaciones de ingeniería y (*b*) de deformaciones naturales (reales). (*Sugerencia*: dibuje bocetos para mostrar las dimensiones de la fibra circunferencial externa.)

LECTURAS ADICIONALES (véanse también los capítulos 8 y 9)

Fundamentals of Tool Design, 4a. ed., Society of Manufacturing Engineers, 1998.
Progressive Dies, Society of Manufacturing Engineers, 1994.
Benson, S.D.: *Press Brake Technology*, Society of Manufacturing Engineers, 1997.
Davis, J.R. (ed.): *Tool Materials*, ASM International, 1995.
Dinda, S., K.F. James, S.P. Keeler y P.A. Stine: *How to Use Circle Grid Analysis for Die Tryout*, American Society for Metals, 1981.
Eary, D.F. y E.A. Read: *Techniques of Pressworking Sheet Metal*, 2a. ed., Prentice Hall, 1974.
Iliescu, C.: *Cold-Pressing Technology*, Elsevier, 1990.
Lascoe, O.D.: *Handbook of Fabrication Processes*, ASM International, 1988.
Marciniak, Z. y J.L. Duncan: *The Mechanics of Sheet Metal Forming*, Edward Arnold, 1992.
Pearce, R.: *Sheet Metal Forming*, Adam Hilger, 1991.
Schuler Incorporated: *Metal Forming Handbook*, Springer, 1998.
Smith, D.A. (ed.), *Die Design Handbook*, 3a.ed., Society of Manufacturing Engineers, 1990.
Suchy, I.: *Handbook of Die Design*, McGraw-Hill, 1997.
Wagoner, R.H., K.S. Chan y S.P. Keeler (eds.): *Forming Limit Diagrams*, The Minerals, Metals and Materials Society, 1989.



La metalurgia de polvos es capaz de proporcionar piezas complejas con alta precisión (en primer plano: partes de una cerradura de mortaja de acero inoxidable; sujetadores de aluminio para un detector óptico con pared de 0.63 mm; engrane y sectores dentados del cerrojo de una puerta moldeados por inyección. Centro: anillo y rótula moldeados por inyección; cuerpo de un candado. En el fondo: placa ranurada y placa receptáculo para un embrague de una vía). (*Cortesía Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey.*)

capítulo

11

Metalurgia de polvos

En este capítulo exploraremos un método abreviado para fabricar partes de forma neta o casi neta de metales y otros materiales. Averiguaremos:

Cómo fabricar polvos de aleaciones de estructura única

Cómo procesar el polvo en formas con resistencia adecuada en crudo para su manejo

Por qué es necesario el sinterizado a temperatura elevada para crear enlaces permanentes

Cómo se puede producir un cojinete permanentemente lubricado

Por qué se pueden fabricar aceros superiores para herramienta por medio de esta técnica

Cómo se fabrica el filamento de una bombilla incandescente

Como se indica en la figura 5-2, los componentes o los artículos de consumo manufacturados se pueden producir directamente transformando un polvo del material inicial en la forma final deseada. El proceso se aplicó primero a los metales que no se podían fundir por medio de la tecnología existente en ese tiempo (el platino, alrededor de 1800; el tungsteno, cien años después). Los rápidos avances habidos en el siglo xx condujeron a un crecimiento explosivo de aplicaciones. Existe una variedad de incentivos para usar el proceso: se pueden producir económicamente partes estructurales de forma neta con contorno relativamente complejo; es factible fabricar materiales de propiedades únicas, como de porosidad controlada; las piezas en realidad pueden ser de mater, como cojinetes autolubricados impregnados con aceite, balatas para frenos con fibras cerámicas embebidas o escobillas para motores eléctricos que combinan el cobre con el grafito. Algunas veces la metalurgia de polvos es el camino para fabricar materiales forjados, como los aceros para herramienta con propiedades superiores o el alambre de tungsteno para filamentos de bombillas incandescentes. La característica esencial es que el enlace entre las partículas se produce sin fusión total, aunque en algunos casos puede ocurrir la fusión localizada.

11-1 CLASIFICACIÓN

En la figura 11-1 se muestra un esquema general del proceso. El polvo se obtiene mediante muchas técnicas, se sujeta a varios pasos preparatorios, y se consolida para darle

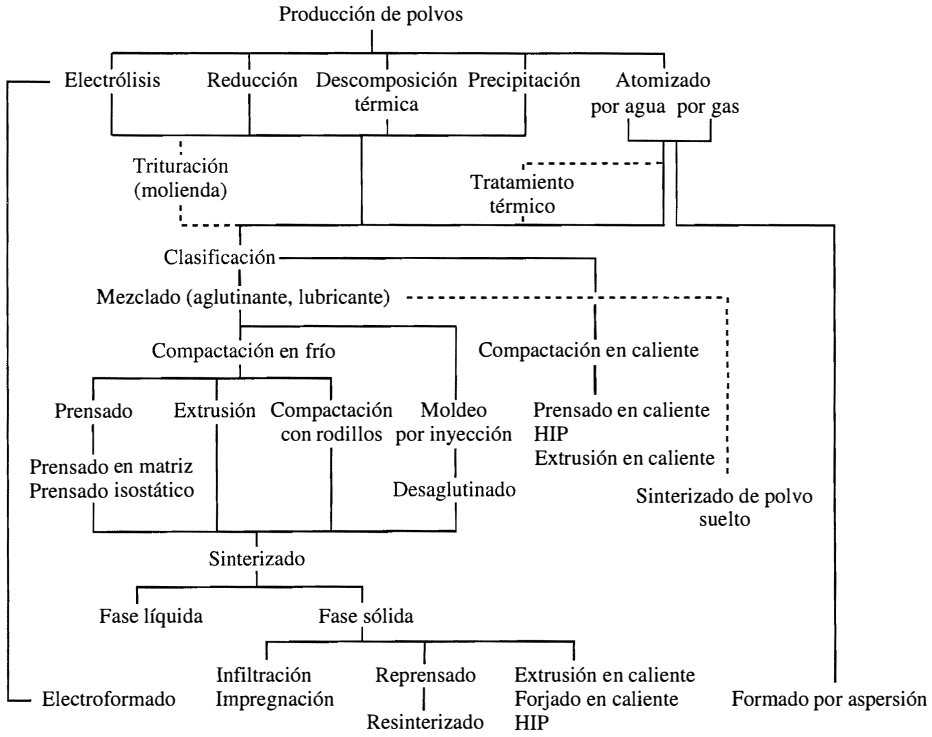


Figura 11-1 Secuencia general en la producción de piezas por metalurgia de polvos. *(Adaptada de J.A. Schey, ASM Handbook, vol. 20, Materials Selection and Design, ASM International, 1977, p. 694. Con permiso.)*

forma y resistencia temporal hasta que el sinterizado establece los enlaces metalúrgicos. Una ruta alterna desarrolla la forma y la resistencia mediante la consolidación por calor. La consolidación a escala atómica ocurre en el electroformado.

11-2 EL POLVO

Los pasos de proceso involucrados en producir, caracterizar y tratar el polvo tienen influencia decisiva en la calidad del producto final.

11-2-1 Producción de polvos

Los polvos se pueden fabricar por medio de diferentes técnicas.

Extracción El material se obtiene a partir de su compuesto.

1. La *reducción* de un óxido a través del carbono o del hidrógeno (Fe, Cu, Co, Mo, W) a menudo resulta en una masa porosa (de aquí, por ejemplo, el nombre *hierro esponja*) que se muele por medio de técnicas similares a las que se utilizan para materiales cerámicos (Secc. 12-4-1).

2. La *descomposición térmica* de un compuesto [como el $Ni(CO)_4$ carbonilo] produce partículas puntiagudas.

3. La *electrólisis* se manipula para crear un depósito altamente desigual, con frecuencia dendrítico, el cual luego se descompone (Fe, Cu, Be).

4. La *precipitación* del metal desde una solución acuosa es posible mediante la *cementación* (precipitación con un metal menos noble, por ejemplo Cu con Fe) o por la reducción con hidrógeno (por ejemplo, Ni).

Deposición La precipitación del material sólido desde la fase gaseosa produce un polvo extremadamente fino (Zn).

Atomización Éste es el proceso dominante para los materiales prealeados. Una investigación intensiva ha hecho posible el control estrecho del proceso. Con la observación directa de la formación de la partícula, ya se ha logrado un control de lazo cerrado.

1. La *atomización por agua* se emplea para obtener la mayor parte del polvo obtenido por atomización. La fusión que emerge de una tobera se descompone con chorros de agua (Fig. 11-2*a*), y se emplea para aceros de baja aleación, aceros inoxidables, aleaciones de Cu y Ni, y para Sn. El tamaño y la forma de las partículas se modifican fácilmente al controlar los parámetros del proceso (el tamaño medio de la partícula es inversamente proporcional a la presión del chorro), pero el polvo siempre se oxida.

2. La *atomización con gas* (Fig. 11-2*a*) produce polvos esféricos. Cuando se permite la oxidación o cuando el óxido se puede reducir posteriormente, el aire es adecuado (Al, Cu, Sn), pero se prefiere un gas inerte para las superaleaciones, aceros inoxidables, aceros para herramienta y aleaciones de Ti.

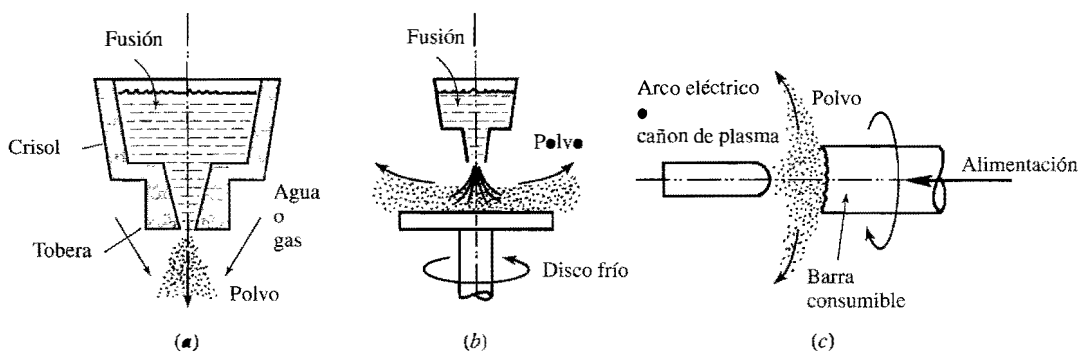


Figura 11-2 Los polvos de metal y de aleaciones se pueden obtener (*a*) por otomización de ogua o gas, (*b*) por atomización centrífuga o (*c*) por el proceso del electrodo rotatorio.

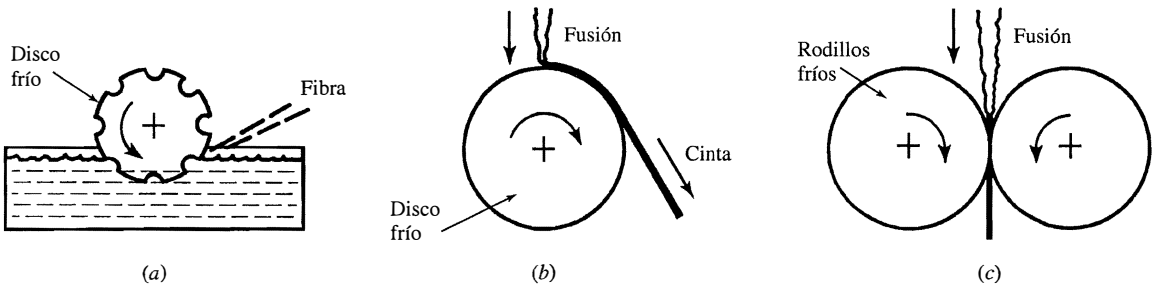


Figura 11-3 Se obtiene una rapidez de enfriamiento muy alta en (*a*) la extracción de fusión, (*b*) la rotación de fusión, y (*c*) el enfriado con rodillos.

3. La *atomización centrífuga* se basa en dirigir un chorro fundido hacia un disco enfriado en rápida rotación (Fig. 11-2*b*). En los procesos de *electrodo rotatorio*, la aleación que se va a atomizar está en forma de un electrodo de rotación rápida (15 000 r/min), el cual se funde gradualmente mediante un arco eléctrico o un arco de plasma de helio (Fig. 11-2*c*). El material fundido se lanza hacia fuera inmediatamente; las partículas esféricas se solidifican sin tocar ninguna superficie y permanecen muy limpias.

Producción de fibras En la *extracción por fusión*, un disco rotatorio ranurado, enfriado por agua se pone en contacto con la superficie del material fundido (Fig. 11-3*a*). En el *hilado de fusión*, el material fundido se dirige hacia un disco enfriado que gira rápidamente (Fig. 11-3*b*) para formar una cinta de 20 a 100 μm de espesor. También puede formarse una cinta en el *enfriado por rodillos* (Fig. 11-3*c*) entre dos rodillos enfriados.

Producción mecánica de polvo Algunos polvos metálicos (notablemente el berilio) se producen *maquinando* una palanquilla fundida de grano grueso y triturando las virutas por medio de la molienda con bolas y por trituración por impacto. Algunos polvos de aleaciones dúctiles de titanio también se producen a partir de fundiciones: se introduce gas hidrógeno para formar hidruros frágiles, los cuales se pueden moler para hacer polvo; luego se restaura la ductilidad expulsando el hidrógeno.

Estructura de los polvos En todos los procesos de atomización y de fibras (cintas), la tasa de enfriamiento es mucho más alta que en la solidificación convencional, del orden de 100°C/s en la atomización con gas, de 1 000°C/s en la atomización con agua y de más de 10^6°C/s en la atomización centrífuga y por electrodo rotatorio (de ahí el término *tecnología de solidificación rápida*, RST). Consecuentemente, las condiciones de equilibrio descritas en la sección 6-1 nunca se logran, y se forman estructuras metalúrgicas inusuales y, en muchos aspectos, altamente deseables. A una tasa de enfriamiento de 1 000°C/s, el espaciamiento de los brazos de las dendritas secundarias es muy pequeño (del orden de 1 μm) y las partículas intermetálicas se encuentran finamente distribuidas. Si la rapidez de enfriamiento es ultraalta (más de 10^6°C/s), se retienen soluciones sólidas supersaturadas, algunas fases cristalinas se suprimen; en el límite, no hay tiem-

po incluso para el reacomodo de átomos en una retícula, y el sólido (especialmente los eutécticos) permanece amorfo. Los *metales amorfos* (*vidrios metálicos*) se fabrican por medio del hilado por fusión de cintas de aproximadamente 40 μm de espesor. Algunos vidrios metálicos se desvitrifican al calentarlos de 350 a 500°C y se vuelven frágiles, pero otros se pueden transformar en una estructura microcristalina de alta resistencia (hasta de 1 250 MPa TS) y con ductilidad razonable. Ya se han encontrado aplicaciones como materiales magnéticos (Nd-Fe-B), elementos de refuerzo en cerámicos y como aleaciones para soldadura fuerte.

11-2-2 Caracterización de polvos

Las propiedades que afectan la consolidación de polvos y las propiedades del producto final se determinan rutinariamente.

Morfología La forma, tamaño y distribución de tamaño de las partículas son variables importantes.

1. La *forma de la partícula* es un factor importante para determinar las características de procesamiento y está sujeta a la norma ISO 3252. Se pueden utilizar métodos formales para análisis morfológico; en un sentido menos cuantitativo, es común hablar de partículas esferoides, nodulares (ligeramente alargadas y redondeadas), irregulares, angulares, laminares (como placas), aciculares (como agujas) y dendríticas. Las partículas laminares delgadas se aglomeran en polvos escamosos; las agujas largas y delgadas, en polvos fibrosos; y los polvos esféricos e irregulares, en polvos granulares. Algunos polvos son porosos, mientras que otros son esferas huecas más o menos completas o con otras formas.

2. El *tamaño de la partícula* no debe ser ni demasiado grande ni demasiado pequeño. Las partículas muy grandes quizás no presenten la estructura deseada, lo cual es a menudo la razón para elegir el camino del polvo, y quizá no permitan el desarrollo de altas densidades. Las partículas muy pequeñas pueden ser difíciles para manejar y tienden a aglomerarse; además, su gran razón área superficial-volumen puede introducir grandes cantidades indeseables de sustancias y óxidos adsorbidos.

3. La *distribución del tamaño de la partícula* se analiza pasando el polvo a través de una serie de tamices, con mallas de fineza progresivamente mayor (incrementando el número de agujeros por área unitaria). La fracción de partículas que pasa por un tamiz particular se da en porcentajes (normalmente, en peso). El tamaño del tamiz se proporciona como el número de malla (para números de malla 50 y mayores, el diámetro en milímetros de la partícula se obtiene de dividir 15 entre el número de la malla). El análisis por tamiz normalmente se realiza en seco, pero el tamizado al vacío o húmedo es necesario para polvos que pasan por la malla 325 (45 μm). Las técnicas que se basan en la difracción de láser, la intensidad de la fluctuación de la luz, los pulsos eléctricos o la sedimentación, son adecuadas para analizar distribuciones amplias del tamaño. La microscopia óptica y electrónica de barrido se pueden emplear para el análisis del tamaño y de la forma.

Propiedades físicas El polvo posee una variedad de propiedades que son de importancia para el procesamiento posterior.

1. El *área superficial específica* (área/masa unitaria, en unidades de m^2/g, o para metales, comúnmente cm^2/g) se determina por la adsorción física de gas o la adsorción química de un tinte. Indica la superficie disponible para el aglutinamiento y también el área sobre la cual pueden estar presentes películas o contaminantes adsorbidos.

2. La *densidad real* (también llamada *densidad teórica*) es la masa por volumen unitario del sólido, y es una propiedad del material. La *densidad aparente* o *masa por volumen unitario* (g/cm^3) es un valor muy importante porque define el volumen real lleno por el polvo suelto. Con frecuencia se expresa como un porcentaje de la densidad del material sólido (como parte de la densidad real). La *densidad apisonada* se obtiene dando golpecitos o haciendo vibrar el receptáculo, y es una medida de la compactación obtenible sin presión. Las densidades aparente y asentada dependen de la forma y distribución de, así como de la fricción entre, las partículas.

3. Las *propiedades de flujo* son dadas por la *tasa del flujo* (el tiempo necesario para que una cantidad medida de polvo fluya a través de un embudo estándar) y por el *ángulo de reposo* (el ángulo de la base de un cono de polvo que descansa sobre una placa circular).

4. La *compresibilidad* es un término que describe el cambio en la densidad cruda con el aumento de la presión de compactación. Normalmente está dada como la densidad a una presión específica o, en una forma gráfica o tabular, a varias presiones.

11-2-3 Preparación del polvo

La mayoría de los polvos se somete a diversos pasos preparatorios.

Clasificación Éste es el proceso de separación en fracciones de acuerdo con el tamaño de la partícula. Algunas veces se requiere la molienda para romper los aglomerados, aplanar (exfoliar) las partículas o modificar sus propiedades mediante el endurecimiento por deformación. Las partículas excesivamente grandes se retiran y, si se requiere, las fracciones de cada tamaño se separan *tamizando* todo el lote de producción. Las partículas finas se pueden separar tamizando una suspensión acuosa. La sedimentación de una solución líquida (*elutriación*) o la clasificación de polvos secos en una corriente de aire dentro de un *ciclón* también son útiles para separar polvos finos. Es factible remover las partículas superfinas a través de la *separación electrostática*.

Acondicionamiento de polvos Algunos metales, como el hierro, tienen óxidos que se reducen fácilmente mediante una atmósfera adecuada durante el sinterizado. Otros, como el titanio, disuelven su propio óxido, por lo que son razonablemente adecuados para el procesamiento de polvos. Los óxidos de aluminio contribuyen al reforzamiento por dispersión. Aun otras aleaciones se cubren con una película de óxido delgada, muy tenaz y persistente, que perjudica en gran medida las propiedades de la pieza terminada; estos materiales (típicamente los que contienen cromo y, en general, las superalea-

ciones para temperatura elevada) deben tratarse con técnicas especiales para mantener muy bajo el contenido de oxígeno. Algunos polvos, como los de acero atomizados con agua a velocidad elevada, se recuecen y desoxidan en una sola operación, haciéndolos más compresibles y fáciles de sinterizar. Los contaminantes que se segregan en la superficie son propensos a crear problemas no sólo de consolidación y sinterizado, sino que también disminuyen en gran medida las propiedades de servicio del material. Cualquier resto no humedecido de una película superficial en las fronteras de grano puede actuar como iniciador de grietas (Secc. 6-3-4).

Los polvos de metal finamente distribuidos pueden ser peligrosos y deben tratarse con especial cuidado. Algunos (como el berilio y el plomo) son *tóxicos*, otros (como el zirconio, magnesio, aluminio) presentan peligro de explosión; muchos otros son *pirofóricos* (se encienden espontáneamente en el aire) por debajo de un tamaño crítico de la partícula. También es factible una *reacción termita*, en la cual un óxido (como el de hierro) se reduce por otro metal más reactivo (como el aluminio), y procede a temperaturas elevadas.

11-2-4 Mezclado

Un solo polvo puede no reunir todos los requisitos de propiedades de producción o de servicio, por lo que se *mezcla* con otros. La combinación puede servir para varios propósitos: se asegura la uniformidad de la distribución de tamaños en un lote grande, se controla la respuesta a los esfuerzos impuestos (*reología*) para mejorar el manejo, se ajusta la densidad del cuerpo compactado y se cambia la composición o las propiedades de servicio. El mezclado siempre debe ser completo, con cada partícula uniformemente recubierta y con los diferentes constituyentes uniformemente dispersos. Con frecuencia se emplea el molino de bolas.

1. Al mezclar una fracción más gruesa con una más fina (Fig. 11-4*a*) se asegura que los intersticios entre las partículas grandes se llenarán. De esta manera, densidades asentadas de más de 65% de la densidad teórica se pueden obtener con polvo de forma favorable (esférica o nodular).

2. Las *aleaciones metálicas* se pueden producir al mezclar diferentes polvos elementales (para algunos aceros, bronces y aleaciones de Al y Ti). La aleación se forma en el curso del sinterizado; la fuerza de accionamiento es el gradiente de potencial químico debido a las diferencias de concentración.

3. En la molienda intensa de dos metales, que de otra forma no se podrían mezclar, el severo endurecimiento por deformación, la fractura y la soldadura en frío dan como resultado una *aleación mecánica*; la molienda de dos fases (como la de un metal y un óxido) se puede utilizar para producir materiales endurecidos por dispersión. También se producen los compuestos metal-no metal (como el WC aglutinado por Co).

4. Los *aditivos lubricantes* reducen la fricción entre partículas, y la que hay entre ellas y la pared del molde.

5. Los *aglutinantes* (como la cera o los polímeros termoplásticos) se agregan polvos que de otra manera no podrían desarrollar una resistencia adecuada en crudo.

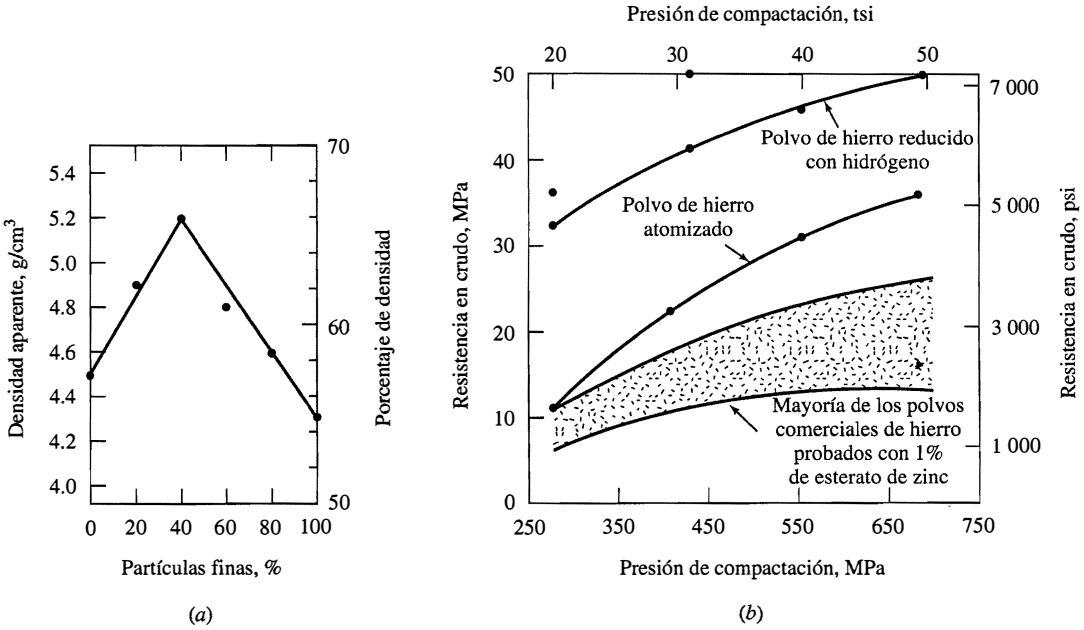


Figura 11-4 Al compactar polvos, (*a*) la densidad óptima de llenado se obtiene mediante una mezcla de polvos finos y gruesos, (*b*) la resistencia en crudo se incrementa con la presión de compactación y es mayor para el polvo formado de manera más irregular. [(*a*) *Según H.H. Hausner, en Handbook of Metal Powders, A.R. Poster (ed.), Reinhold, 1966. (b) De Metals Handbook, 9a. ed., vol. 7, ASM International, 1984, p. 289. Se reproduce con autorización.*]

6. Los *promotores de sinterizado* se agregan para acelerar la densificación en el calentamiento.

7. Cuando el polvo se va a producir en una pasta, se agregan *defloculantes* y otros químicos para impartir características reológicas favorables.

8. El *secado por aspersión* asegura una distribución uniforme de los constituyentes en polvos finos y permite el formado de polvo de flujo libre a partir de finos que de otra manera no fluirían. Los ingredientes se convierten —con agua o un líquido orgánico— en una pasta, la cual luego se *atomiza* mediante aire o gas. El líquido se evapora de las gotitas durante su vuelo y el polvo más grueso, aproximadamente esférico, formado de esta manera, se colecta. Éste es el principal método para preparar aleaciones reforzadas por dispersión del óxido y carburos cementados. Se obtienen formas menos adecuadas cuando el polvo es *granulado*: una mezcla húmeda se fuerza a través de orificios en una placa o agujeros en una malla.

11-3 CONSOLIDACIÓN DE POLVOS

El método elegido para la *consolidación*, es decir, para convertir el material particulado en la forma deseada, depende del material y de la densidad deseada para el producto.

11-3-1 Compactación en frío

Los polvos secos, los cuales se pueden recubrir con un lubricante o aglutinante seco, se *compactan* mediante la aplicación de presión para formar el denominado *cuerpo verde* (sin adhesión permanente). Para una distribución dada del tamaño de partícula, la densidad del compacto se incrementa con la presión aplicada (Fig. 11-4*b*). La densidad también es una función de la forma de la partícula: un polvo esférico se compacta con una densidad mayor que un polvo de forma irregular. En el curso del prensado, se expulsa el aire que hay entre las partículas, y éstas se deslizan una contra otra y contra la superficie de la herramienta de compactación. A presiones mayores, la fuerza aplicada se concentra en puntos de contacto entre las partículas; las presiones elevadas locales causan deformación local o fractura, y el compacto adquiere una *resistencia en crudo*, normalmente expresada como resistencia a la ruptura, medida en probetas de flexión transversal (Fig. 4-9).

Hay varias fuentes para la resistencia en crudo. El deslizamiento combinado con presión promueve la adhesión (e incluso la soldadura en frío con algunos polvos); por lo tanto, la resistencia se eleva al aumentar la presión (Fig. 11-4*b*). Otra fuente de la resistencia en crudo es el entrelazado mecánico, especialmente con partículas de forma irregular, por lo que la resistencia en crudo es menor para los polvos esféricos, aunque se empacan más densamente. Si ninguno de estos mecanismos está disponible, se agregan agentes aglutinantes que se evaporan en el curso del sinterizado. Por supuesto, la resistencia en crudo es menor cuando el polvo está recubierto con un lubricante. Varias técnicas de compactación se encuentran disponibles.

Prensado en matriz Tiene su aplicación más amplia en piezas de forma neta (o de forma casi neta). Si la pieza es relativamente sencilla y una matriz se puede fabricar de acero, las elevadas presiones aplicadas son permisibles y, si las partículas se pueden deformar plásticamente, es factible lograr densidades en exceso de 90% de la densidad teórica.

1. La efectividad del prensado con un *punzón de una sola acción* es limitada, porque el material en partículas no transmite las presiones como lo haría un sólido continuo; también la fricción de la pared se opone a la compactación. La presión disminuye rápidamente y la densidad decrece al alejarse del punzón (Fig. 11-5*a*), limitando la razón profundidad-diámetro que se obtiene. Para una presión aplicada de p_0, la presión a una profundidad l en el cuerpo es

$$p_l = p_a \exp\left(\frac{-\mu k A_{fr}}{A_0}\right) \qquad \textbf{(11-1)}$$

donde μ es la fricción en la pared, A_{fr} el área superficial donde ocurre la fricción, A_0 el área compactada, y k el factor que expresa la razón del esfuerzo radial al axial y es, para un sólido elástico

$$k = \frac{p_r}{p_a} = \frac{\nu}{1-\nu} \qquad \textbf{(11-2)}$$

donde ν es el módulo de Poisson.

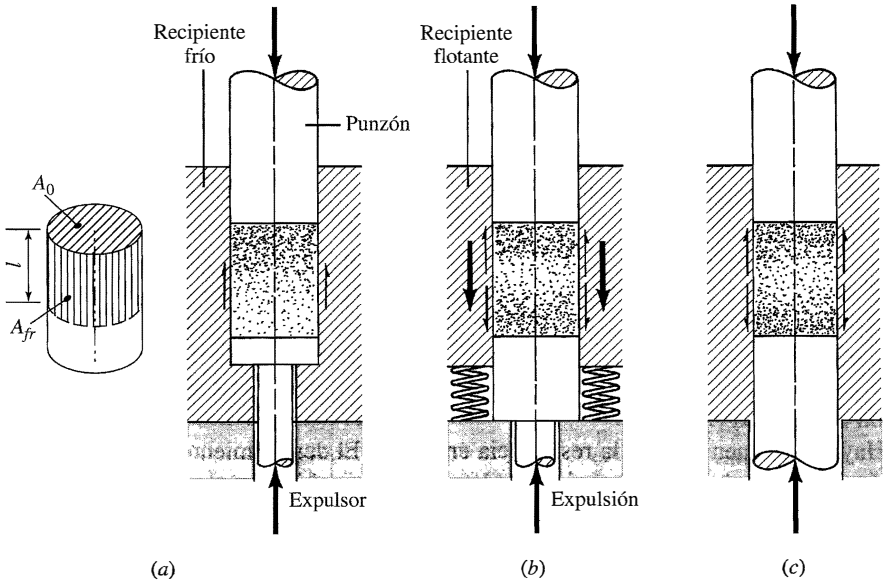


Figura 11-5 La densidad de un cuerpo crudo depende del método de compactación: (*a*) es mayor bajo el punzón cuando la compactación se hace con un punzón único en un recipiente fijo; se obtiene una mejor uniformidad con (*b*) un solo punzón y un recipiente flotante, o (*c*) con dos punzones contractuantes.

2. La situación se mejora con una *cámara flotante* (Fig. 11-5*b*), que se mueve contra el punzón estacionario mediante la fuerza de fricción entre el polvo y el recipiente.

3. Se obtienen buenos resultados en prensas especiales con dos *punzones contractuantes* que avanzan desde dos extremos de la cavidad de la matriz (Fig. 11-5*c*).

4. Cuando el espesor de la parte cambia considerablemente de punto a punto, la densidad en crudo se ecualiza construyendo matrices con *punzones múltiples* guiados uno dentro del otro (Fig. 11-6), de manera que se puede aplicar el mismo grado de compactación en todas partes. Los claros entre las partes móviles deben ser muy pequeños (menores a 25 μm) para evitar la entrada de partículas.

Normalmente las matrices están construidas con acero para herramienta de alta resistencia, o para grandes volúmenes de producción y condiciones severas de abrasión, se fabrican con carburo de tungsteno cementado. Las presiones permisibles de la matriz son como las del forjado en frío y la extrusión (Secc. 9-5-1), aunque las presiones moderadas (de 100 MPa) son comunes, y se elevan hasta 500 e incluso hasta 900 MPa en algunos casos. Las matrices se pueden llenar rápida y automáticamente por gravedad, y el exceso de polvo simplemente se remueve.

Prensado isostático en frío El polvo se introduce por vibración en un molde deformable (caucho reutilizable). Se aplica presión hidrostática (omnidireccional) por medio

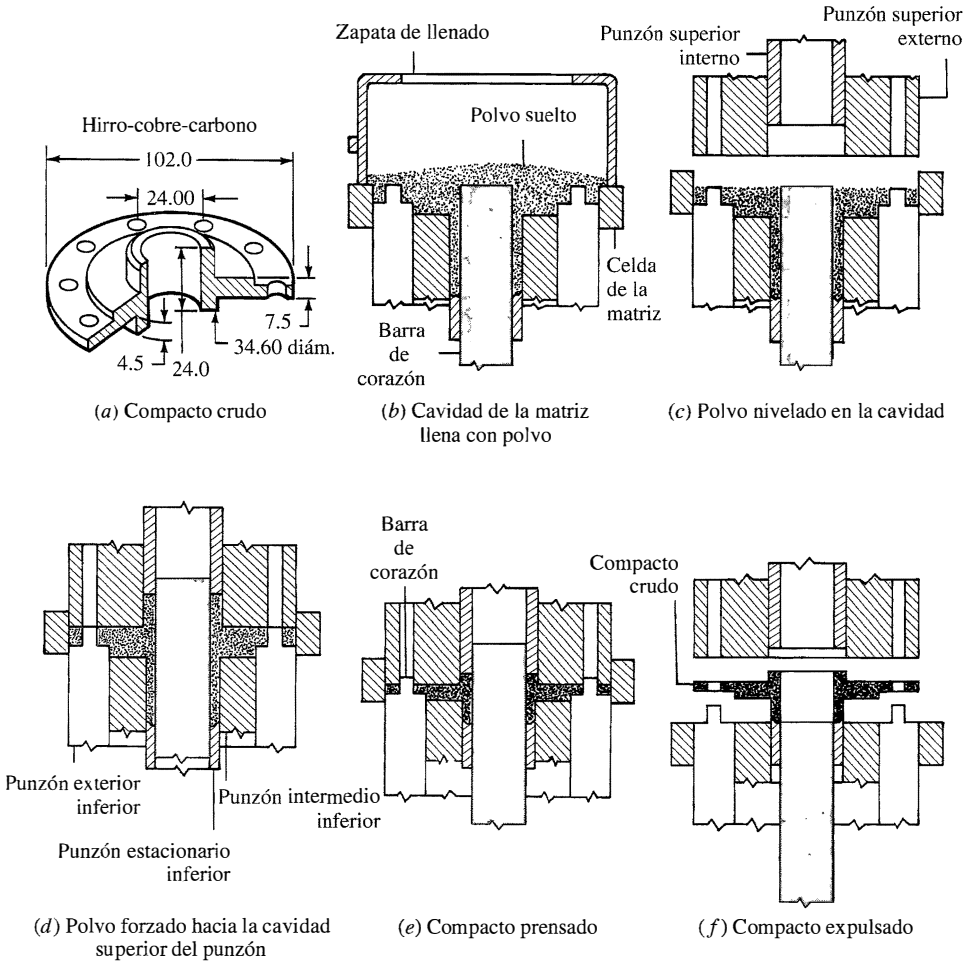


Figura 11-6 Una densidad uniforme de llenado puede asegurarse con el uso de matrices de punzones múltiples (dimensiones dadas en pulgadas). (*De Metals Handbook, 8a. ed., vol. 4, ASM International, 1969, p. 461. Con permiso.*)

de un fluido hidráulico dentro de un recipiente bajo presión (Fig. 11-7), asegurando una densidad uniforme. Normalmente el fluido es agua. Las limitaciones de la forma son pocas en el *método de la bolsa húmeda* (Fig. 11-7*a*). Se logran tiempos más cortos del ciclo con el *método de bolsa seca* (Fig. 11-7*b*), porque el fluido se introduce sólo en el espacio entre la matriz fija y el molde elastomérico, pero las formas son un poco más limitadas. En muchos casos, no se necesitan ni lubricantes ni aglutinantes. Las presiones de 300 MPa son normales y se pueden obtener presiones de hasta 550 MPa.

Laminación La compactación por laminado, seguida del sinterizado y tal vez de otra laminación, es un método importante para fabricar tiras de Ni, y también se utiliza para

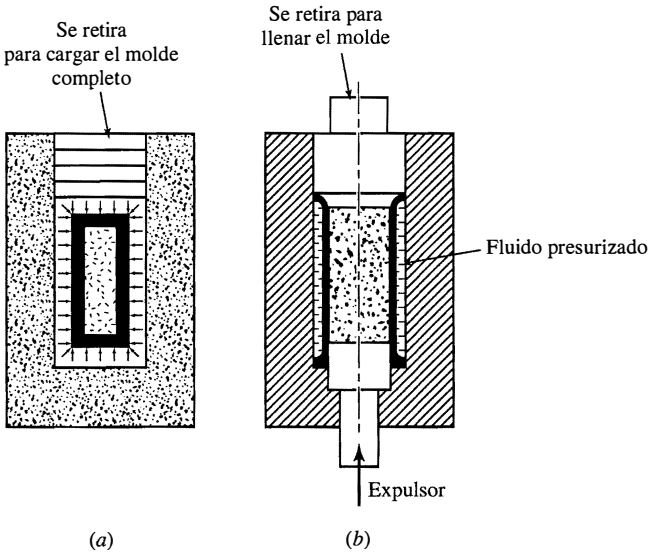


Figura 11-7 La presión omnidireccional ayuda a producir piezas con una distribución de densidad más uniforme en prensado isostático por el (*a*) método de la bolsa húmeda, y algo menor con el (*b*) método de la bolsa seca.

revestir sustratos metálicos sólidos. La *compactación por impacto* en martinetes rápidos o con la ayuda de cargas explosivas produce partes de alta densidad.

Gravedad El llenado por gravedad de un molde, con frecuencia asistido por *vibración*, produce un compacto de baja densidad y poca resistencia. Sólo con un manejo cuidadoso se puede convertir en un producto poroso sinterizado; es muy probable que se caliente el molde para al menos iniciar el sinterizado o para fraguar el aglutinante seco. En el proceso conocido como *sinterizado de polvo suelto*, el polvo es acabado por sinterizado en el molde de compactación para producir filtros porosos.

Los elementos formados que no es factible producir directamente se pueden generar maquinando el cuerpo crudo; el prensado en tibio proporciona más resistencia al cuerpo delicado.

Ejemplo 11-1

Se va a compactar por vibración polvo de níquel perfectamente esférico con partículas de diámetro de 0.1 mm. (*a*) ¿Qué porcentaje de la densidad teórica se puede alcanzar? (*b*) ¿Este porcentaje se incrementará o disminuirá si el diámetro de la partícula aumenta uniformemente a 0.2 mm?

(*a*) En el caso ideal, se logrará el empaque más cerrado, equivalente a una estructura fcc. De la figura 6-2*a*, hay (6 mitades) + (8 octavos) = 4 esferas de radio R en cada celda unitaria con arista a. La diagonal del cuerpo es $4R = a(2^{0.5})$. El factor de empaquetamiento es

$$\frac{\text{Volumen de esferas}}{\text{Volumen del cubo}} = \frac{4(4\pi/3)R^3}{a^2} = \frac{4(4\pi/3)R^3}{\left(4R/\sqrt{2}\right)^3} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} = 0.74$$

Ésta también es la razón del polvo con respecto al volumen sólido; así, se obtiene 74% de la densidad teórica. En la práctica, una densidad de menos de 67% de la teórica es más probable (véase la Fig. 11-4*a*).

(*b*) El radio R de la partícula se cancela, así que no ocurrirá un cambio en la densidad de llenado.

Ejemplo 11-2

El compactado crudo que se muestra en la figura 11-6 tiene una maza de 24 mm de altura y una brida de 7.5 mm de espesor. Calcule la posición de los punzones inferiores requeridos para llenar la cavidad de la matriz (Fig. 11-6*b*) si la densidad del polvo suelto es 38% y la del compacto crudo es 78% de la densidad teórica.

La masa de polvo suelto después de nivelar (Fig. 11-6*c*) debe ser igual a la masa del compacto crudo. No se cuenta con que el polvo fluya desde la maza a la brida o viceversa; por lo tanto, la misma masa de polvo permanece en la brida (y en la maza) antes y después del prensado. Como la masa es (volumen) × (densidad relativa), se puede escribir

$$V_l(\text{densidad relativa suelto}) = V_g(\text{densidad relativa crudo})$$

donde V_l es el volumen suelto y V_g el del compacto crudo. Como el polvo no fluye de la brida a la maza ni viceversa, se puede escribir

$$V_l = Ah_l \quad \text{y} \quad V_g = Ah_g$$

donde h_l es la altura de la columna de polvo suelto y h_g es el espesor del compacto crudo. Consecuentemente,

$$h_l = h_g\left(\frac{\text{densidad relativa en crudo}}{\text{densidad relativa suelto}}\right)$$

Para la maza, $h_l = 24(0.78/0.38) = 49.3$ mm; para la brida, $h_l = 7.5(0.78/0.38) = 15.4$ mm.

Ejemplo 11-3

Un cilindro de polvo de Ni se va a fabricar por prensado uniaxial (Fig. 11-5*a*). Calcule la longitud máxima l permisible si la caída de presión se limita a dos tercios del valor original. No se utiliza lubricante ($\mu = 0.5$) y $\upsilon = 0.31$.

De la ecuación (11-2), $k = (0.31)/(1 - 0.31) = 0.45$. $A_0 = d^2\pi/4$; $A_{fr} = d\pi \cdot l$.

De la ecuación (11-1)

$$\frac{p_l}{p_0} = \frac{1}{3} = \exp\left(\frac{-0.5(0.45)d\pi l}{d^2\pi/4}\right) = \exp\left(\frac{-0.9l}{d}\right)$$

de aquí $l = 1.22d$. Note que la fricción entre las partículas reducirá aún más la presión; por lo tanto, se debería emplear un lubricante.

11-3-2 Moldeo por inyección

Cuando la proporción del aglutinante o de otro líquido es suficientemente alta para permitir el desplazamiento relativo de partículas individuales dentro de una matriz líquida, la mezcla adquiere propiedades reológicas adecuadas para el procesamiento mediante técnicas de *formado plástico*. Las mezclas normalmente se comportan como sólidos de Bingham o cuerpos no newtonianos (seudoplásticos) (Fig. 7-5), por lo que se pueden procesar a través de las técnicas analizadas en la fundición en matrices (Secc. 7-5-6) y que también se emplean en el procesamiento de polímeros (Secc. 14-3-3).

El moldeo por inyección de polvo fino ($< 20\mu m$) es posible para piezas de pared muy delgada (de 0.5 a 5 mm). El polvo se combina con cera o con un polímero termoplástico, desde 25% hasta 40%, y se inyecta a una temperatura desde 135 hasta 200°C, a presiones desde 100 hasta 140 MPa, en moldes en máquinas estándar de moldeo por inyección. El enfriamiento en el molde fija la forma. La contracción o sinterizado es grande, pero formas complejas, incluso agujeros transversales, se pueden producir en todos los materiales, abarcando aleaciones de metal refractario. El polímero debe eliminarse por calentamiento (*desaglutinación*) en una atmósfera protectora; esto puede tomar mucho tiempo y el suavizado causa alguna pérdida de la forma. La contracción es amplia, hasta de 20% linealmente. Una mejor retención de la forma se asegura con un aglutinante de acetal, el cual se puede descomponer químicamente a baja temperatura. Avances significativos adicionales se representan mediante el *moldeo de precisión por inyección de polvos* (PPIM).[1] El polvo se recubre con una película delgada de polímero termofijo en la etapa B, donde todavía es termoplástico (véase la Secc. 13-3). El polvo recubierto se mezcla con un aglutinante soluble en agua y se moldea por inyección. La pieza se pasa por un baño de agua para eliminar el aglutinante. La polimerización se completa térmicamente, químicamente, o por luz ultravioleta, y la parte se sinteriza. Como el polvo está aglutinado con un polímero termofijo, no ocurre ablandamiento; en la temperatura de sinterizado, el polímero se descompone y escapa como gas. Así, las partes de alta precisión se pueden fabricar en una amplia gama de tamaños (Fig. 11-8). Al moldear alrededor de corazones plásticos, se pueden obtener formas internas reentrantes (U2 y 4 en la Fig. 3-1). La contracción es únicamente de 10%.

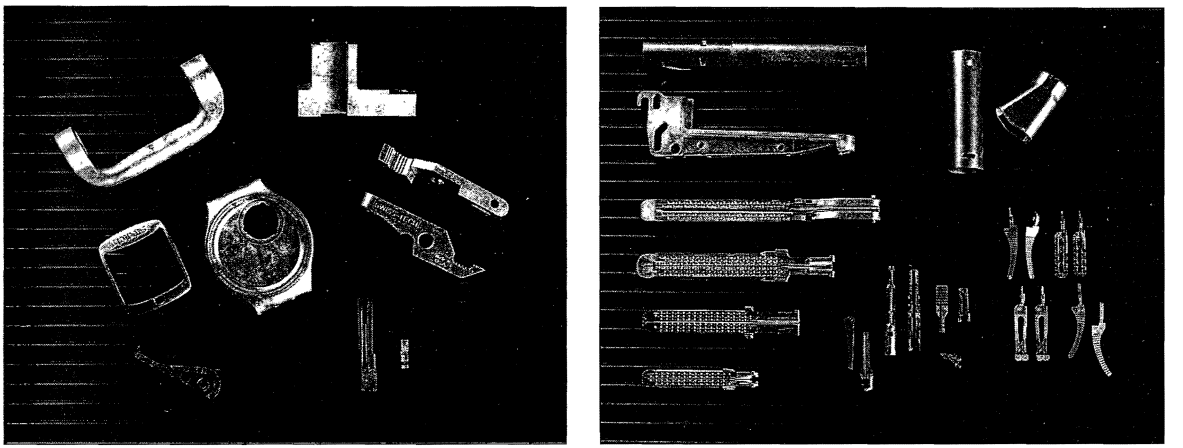
11-4 SINTERIZADO Y ACABADO

Al compacto se la da resistencia por sinterizado, y si es necesario por un procesamiento subsiguiente.

11-4-1 Sinterizado

El compacto crudo se calienta para obtener las propiedades finales requeridas. En el curso del calentamiento, tienen lugar varios cambios.

[1] Un proceso propiedad de Thermat Precision Technology Inc.



(*a*) (*b*)

Figura 11-8 Las partes de alta precisión con configuración compleja se fabrican a través del moldeo de polvo por inyección de precisión. Note en (*a*) la pieza con el agujero transversal. Las piezas menores en (*b*) son para cirugía mínimamente invasora; la más pequeña es de sólo 6 mm de longitud. (*Cortesía de Thermat Precision Technology, Corry, Pennsylvania.*)

Secado A temperaturas bajas, los constituyentes líquidos se separan. El tiempo de residencia necesario se eleva con el incremento del espesor de la pared; el calentamiento rápido causaría la vaporización repentina y podría resultar en la desintegración del compacto. El vacío acelera el secado. Si los aglutinantes orgánicos se van a quemar, debe haber suficiente oxígeno disponible para su combustión.

Sinterizado A temperaturas mayores (superiores a $0.5T_m$ pero, por lo general, en el rango del trabajo en caliente, alrededor de 0.7 a las $0.9T_m$), ocurre el sinterizado. El compacto contiene partículas del material muy cercanas entre sí. La energía del sistema disminuirá, reduciendo el área superficial total; en otras palabras, la fuerza de accionamiento para el sinterizado es la energía superficial que se reduce al unir partículas adyacentes (Fig. 11-9). Varios mecanismos intervienen, de los cuales la evaporación y la condensación normalmente son mucho menos importantes que la difusión sólida. Para comenzar, los enlaces interatómicos se establecen entre superficies adyacentes, los cuellos crecen por el movimiento de átomos de la superficie y de la masa de las partículas hacia ellos. El flujo plástico o viscoso también puede ocurrir y esto, junto con una mayor difusión masiva, reduce el tamaño de los poros (Fig. 11-9*b*). De esta manera, el volumen se contrae y la densidad se incrementa (Fig. 11-9*a*). Para lograr la misma densidad sinterizada, la contracción es mayor para densidades en crudo menores. Si ocurren cambios de fase durante el calentamiento, la contracción puede despreciarse e incluso puede ocurrir el crecimiento. Con frecuencia es necesario determinar la contracción experimentalmente: si los pasos del proceso están estrechamente controlados, la contracción es reproducible y las partes terminadas se pueden mantener dentro de tolerancias estrechas.

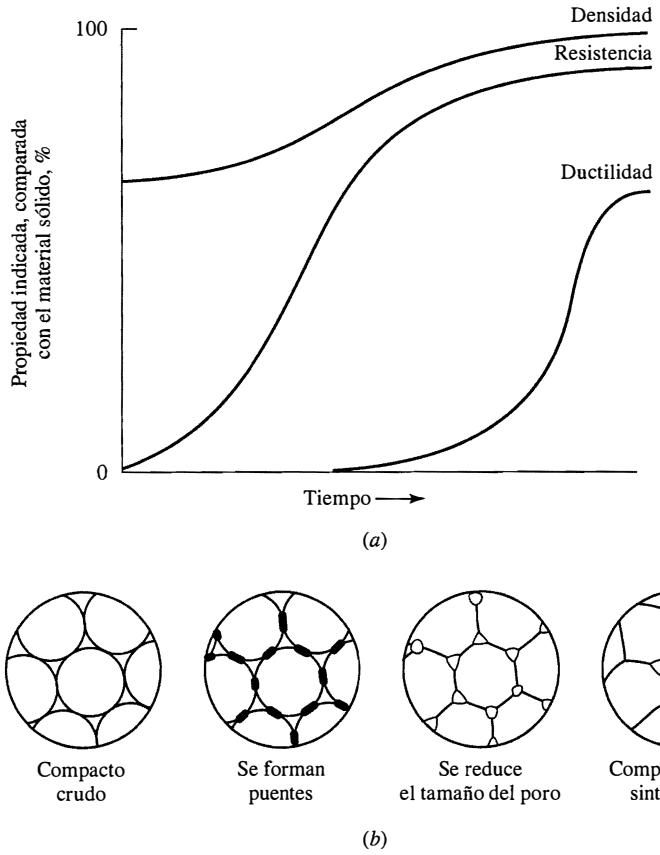


Figura 11-9 En el curso del sinterizado (*a*) el compacto adquiere una resistencia permanente, mientras que el volumen se contrae (se incrementa la densidad) como resultado de (*b*) la eliminación de la mayoría de los poros entre las partículas.

En esta etapa, la resistencia aumenta marcadamente y un material dúctil presenta un incremento en la ductilidad (Fig. 11-9*a*). Sin embargo, es factible que las propiedades ante la fatiga sean inferiores si se ha dejado alguna porosidad. El calentamiento posterior no necesariamente mejora la situación, ya que las fronteras de grano comienzan a migrar, algunos granos se consumen, el tamaño promedio de grano se eleva, con una caída consecuente en la resistencia, y los poros remanentes (dentro de los granos nuevos) se vuelven estables. Estos poros, junto con cualquier porosidad resultante de los gases atrapados, deterioran las propiedades.

Sinterizado en fase líquida El proceso se acelera cuando uno de los constituyentes se funde y envuelve al constituyente con temperatura de fusión más elevada. Un líquido que moja las partículas sólidas ejerce presión capilar que mueve y presiona físicamente a las partículas al parejo para una densificación mejor. Es posible determinar las fases

formadas por medio de los diagramas de fase aplicables; la mejor aglutinación se consigue cuando existe solubilidad mutua. Cuando los polvos elementales se mezclan y las fases transitorias de baja temperatura de fusión se forman, antes que la difusión cree una aleación homogénea (como en las aleaciones de Al, latones y bronces), se forma una fase líquida en la superficie de las partículas. La densidad puede alcanzar la densidad teórica.

Contracción Normalmente es necesario realizar pruebas para determinar el valor exacto de la contracción, pero se puede obtener una buena aproximación considerando que la contracción es uniforme en todas direcciones y que la masa no cambia (a menos que estén presentes constituyentes volátiles en grandes cantidades).

$$\text{Masa} = \text{constante} = (\rho_{\text{crudo}})(V_{\text{crudo}}) = (\rho_{\text{sinterizada}})(V_{\text{sinterizado}}) \qquad \textbf{(11-3a)}$$

$$\text{Contracción volumétrica} = \frac{V_{\text{sinterizado}}}{V_{\text{crudo}}} = \frac{\rho_{\text{crudo}}}{\rho_{\text{sinterizada}}} \qquad \textbf{(11-3b)}$$

$$\text{Contracción lineal} = \left(\frac{\rho_{\text{crudo}}}{\rho_{\text{sinterizada}}}\right)^{1/3} \qquad \textbf{(11-3c)}$$

Ejemplo 11-4

El compacto crudo que se muestra en la figura 11-6*a* se sinteriza hasta 96% de la densidad teórica. La composición es Fe-8Cu-2C. Calcule (*a*) la densidad teórica y (*b*) la contracción de la dimensión de 24 mm.

(*a*) Las densidades de los elementos constituyentes son Fe: 7.87; Cu: 8.96; C(grafito): 2.25 g/cm^3. El volumen de 100 g de polvo es

$$(90/7.87) + (8/8.96) + (2/2.25) = 13.21 \text{ cm}^3$$

La densidad teórica es 100/13.21 = 7.566 g/cm^3.

(*b*) En el ejemplo 11-2 teníamos la densidad del compacto crudo $\rho_{\text{crudo}} = 0.78$. La densidad sinterizada es $\rho_{\text{sinterizada}} = 0.96$. De la ecuación (11-3*c*),

$$\text{Contracción lineal} = (0.78/0.96)^{1/3} = 0.933$$

Así, la dimensión de 24 mm se contrae a (0.933)(24) = 22.4 mm.

Ejemplo 11-5

Un cubo con lados de 25 mm y 95% de densidad teórica se va a fabricar mediante moldeo por inyección. El aglutinante es 40% en volumen y se eliminó completamente durante el desaglutinado y el sinterizado. Determine (*a*) la contracción volumétrica y (*b*) las dimensiones del cuerpo crudo.

(*a*) El volumen cambia, pero la masa del polvo permanece constante

$$\text{Volumen inyectado} = (0.6 \text{ polvo}) + (0.4 \text{ aglutinante})$$

$$\text{Volumen sinterizado} = (0.6/0.95) = 0.6316$$

Contracción volumétrica = $1 - 0.6316 = 36.84\%$

(*b*) Contracción lineal = $(0.6316)^{1/3} = 0.858$.

Lado del cubo moldeado por inyección = $25/0.858 = 29.14$ mm.

Hornos de sinterización Son del tipo lote o de tipo continuo. Los hornos continuos tienen una zona de precalentamiento (secado o quemado), una zona de calor elevado (sinterizado) y una zona de enfriamiento. Excepto por los polvos de densidad de llenado elevada, cubiertos con un óxido protector (como el aluminio), todo el sinterizado se realiza en una atmósfera elegida para proporcionar un ambiente neutro, no oxidante o reductor. Entre los gases extensamente utilizados, el nitrógeno es neutro. El sinterizado en un horno de vacío también proporciona un medio neutro, pero a temperaturas elevadas favorece la desoxidación de muchos metales. El hidrógeno es un agente reductor muy efectivo, aunque se debe manejar con precaución para evitar explosiones. Los gases que frecuentemente se emplean son: nitrógeno con 10% de hidrógeno y metano, amoniaco disociado y gas hidrocarburo parcialmente quemado (exotérmica o endotérmicamente). Al sinterizar acero, el contenido de carbono también se controla y, en algunos casos, los aceros se carburizan en una atmósfera que contiene CO.

11-4-2 Acabado

La porosidad de una pieza completamente sinterizada aún es importante (de 4 a 15%), dependiendo de las características del polvo, la presión de compactación, la temperatura de sinterizado y el tiempo. La densidad a menudo se mantiene intencionalmente baja para preservar la porosidad interconectada para cojinetes, filtros, barreras acústicas y electrodos de baterías, o cuando los componentes se van a infiltrar. La metalurgia de polvos ofrece oportunidades únicas para adaptar las propiedades a las necesidades: al presionar secciones diferentes de una pieza a densidades distintas, la resistencia y la porosidad se pueden ajustar localmente. La porosidad residual vuelve más rugosos a los compactos sinterizados que la matriz de compactación. Las propiedades de impacto y fatiga son menores que en un material forjado, pero es posible mejorarlas. El tratamiento térmico es una de las posibilidades; otros procesos son únicos.

1. El *reimpactado en frío* (acuñado o labrado) del compacto sinterizado eleva su densidad y mejora las tolerancias dimensionales. Al *resinterizar* el compacto reprensado (Fig. 11-10) se consigue una mayor densificación y el perfeccionamiento de la resistencia. Con frecuencia se realiza el tratamiento térmico.

2. La *impregnación* de un compacto sinterizado de porosidad interconectada puede obtenerse mediante la inmersión en aceite caliente. La acción capilar distribuye el aceite; la aplicación de vacío ayuda al proceso.

3. La *infiltración* es la impregnación con un metal (por ejemplo, Cu para partes ferrosas), llevada a cabo por inmersión en el metal fundido, o al colocar el metal de infiltración en forma de una lámina arriba o debajo del compacto en un horno; de nuevo, la acción capilar llena los poros.

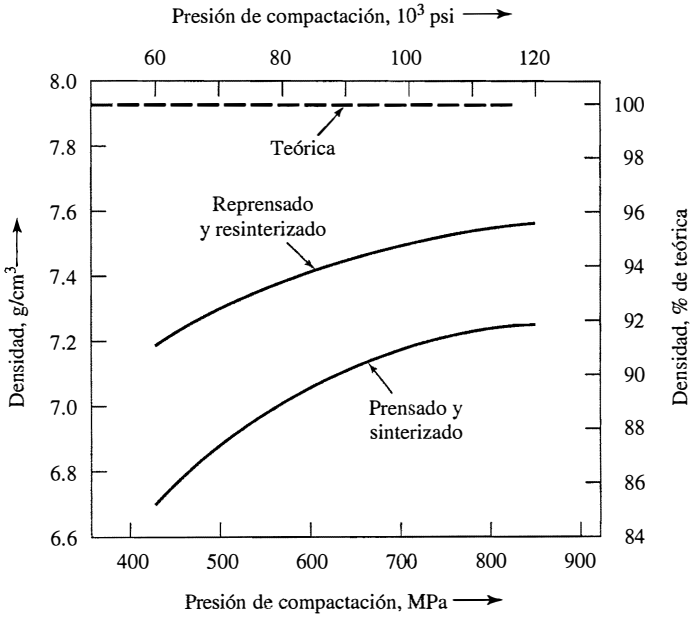


Figura 11-10 La densidad de un compacto de hierro electrolítico pulverizado se puede elevar reprensando a 700 MPa y resinterizando a 1 120°C durante 1 hora. (*De metals Handbook, 8a. ed., vol. 4, ASM International, 1969, p. 455. Con permiso.*)

11-5 COMPACTACIÓN EN CALIENTE

Todas las secuencias del procesamiento de partículas descritas hasta este punto implican la consolidación seguida del sinterizado; a menudo se obtienen ventajas combinando ambas operaciones en una operación simultánea. Se aplica presión suficiente, a la temperatura de sinterizado, para juntar las partículas y de esta manera acelerar el sinterizado. Si es posible, los granos individuales se deforman para asegurar mayor conformidad; más importante es que los granos se mueven entre sí para romper las películas superficiales que aminorarían o evitarían la difusión. Bajo tales condiciones, la porosidad puede eliminarse por completo. Como un cuerpo de partículas no tiene ninguna resistencia previa al prensado, todas las presiones aplicadas deben ser de compresión, y preferiblemente en todas las direcciones, de manera que se evite la generación de esfuerzos secundarios de tensión.

Prensado en caliente Puede hacerse en matrices de grafito o cerámico calientes, pero es difícil transmitir la presión uniformemente a todas las partes del compacto (Fig. 11-5). En el *sinterizado por chispas*, una corriente alterna elevada genera descargas eléctricas durante la primera fase de consolidación, activando así la superficie de las partículas.

Prensado isostático por calor (HIP) Este proceso ha tenido amplia aceptación. En la forma básica del HIP, el polvo se encierra (*encapsula*) en una lata o en una funda defor-

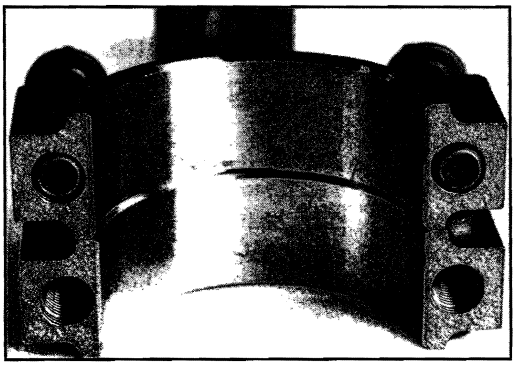


Figura 11-11 En una biela fabricada por medio del forjado de polvo, la abrazadera se retiró al separar por fractura, asegurando así un perfecto embone de las dos mitades. (*Cortesía de Ford Motor Company, Dearborn, Michigan.*)

mable de metal, el cual es evacua y luego se coloca en un horno, que a su vez está dentro de una cámara de pared fría y temperatura elevada (similar al de la Fig. 7-27). La cámara se presuriza con un gas inerte hasta 300 MPa o, más comúnmente, a 100 MPa. Las temperaturas del horno varían de 480 a 2 000°C: en forma más general a 1200°C. En una variante del HIP, el polvo se coloca en un molde de vidrio; y en otra, en uno de concha cerámica. Las piezas presinterizadas de 92 a 95% de densidad (principalmente los insertos para herramientas y los componentes pequeños similares) no tienen porosidad interconectada y se tratan sin encapsulado para remover la porosidad residual. El gas a presión elevada puede reemplazarse con un polvo cerámico o con un metal más suave; así el prensado en caliente o en una prensa convencional produce resultados similares al HIP.

Laminado y extrusión en caliente Para este proceso, se deben evitar reacciones indeseables con la atmósfera circundante. Por lo tanto, en algunas ocasiones el polvo se encierra en una lata fabricada de un metal que resista las temperaturas elevadas. Las barras sólidas se laminan o extruyen y los tubos huecos también se extruyen. Sus propiedades pueden ser superiores al material producido de manera convencional, debido a la estructura inusual de los polvos.

Forjado en caliente de una preforma de polvos El proceso puede producir piezas con propiedades superiores, incluyendo la tenacidad, y fabricar formas que de otra manera sería muy complejo obtener. Por ejemplo, las bielas se pueden forjar hasta las dimensiones terminadas (Fig. 11-11) y también es factible fabricar partes rotativas de turbinas.

Deposición por aspersión En este método de formado directo, las partículas atomizadas se depositan inmediatamente en un mandril, así que no se necesita el sinterizado. Las aplicaciones principales son para superaleaciones y tubos que se laminan subsecuentemente.

Ejemplo 11-6

Las bielas para los motores de combustión interna se han forjado tradicionalmente en caliente, con frecuencia con la abrazadera del cigüeñal por separado (como la de la Fig. 9-20). La metalurgia de polvos se ha convertido en un fuerte competidor. La preforma se prensa en frío, se sinteriza en una atmósfera reductora desde 75 hasta 85% de la densidad teórica, se transfiere directamente a una prensa de forjado donde se termina por forjado en una matriz cerrada, con una tolerancia en peso mucho más cercana que la obtenida con las forjas convencionales; además, los agujeros del pasador y del cigüeñal están completamente formados. El producto también es un raro ejemplo de la introducción intencional de una grieta: se forman muescas agudas en el extremo del cigüeñal y la abrazadera se separa mediante "división por fractura" (al imponer una fuerza interna de expansión). La superficie granular de la fractura asegura un ajuste perfecto y previene el movimiento lateral. [Fuente: D.R. Bankovic y D.A. Jager, *Adv. Mater. Proc.*, 1994 (8): 21-23.]

Ejemplo 11-7

El tungsteno, un metal bcc, es muy frágil en forma recristalizada a temperatura ambiente, pero los filamentos para las lámparas incandescentes en las que se emplea, deben ser dúctiles. Para satisfacer este requisito, W.D. Coolidge desarrolló en 1909, en la General Electric Company, un proceso que aún se utiliza. El polvo de tungsteno, producido al reducir WO_3 con H_2, se prensa en frío, se calienta empleando su propia resistencia a 2 500°C, se sinteriza a 90% de su densidad teórica, y se trabaja en caliente por encima de los 1 500°C para alcanzar una densidad completa (en este punto, la temperatura de transición de dúctil a frágil aún es de 300°C). La deformación adicional sucede a temperaturas gradualmente menores. Como la temperatura de recristalización es de 1 700°C, esto está técnicamente en el régimen de trabajo en frío; los granos se alargan y se desarrolla una estructura marcada con la dirección [110] alineada en el eje del alambre. La temperatura de transición de dúctil a frágil baja paulatinamente, por lo que el alambre es dúctil a temperatura ambiente y tiene una resistencia extraordinaria (TS = 5 000 MPa). (*Fuente*: J.P. Wittenauer, T.G. Nieh y J. Wadsworth, *Adv. Mater. Proc.*, 1992 (9): 28-37.)

11-6 PRODUCTOS DE LA METALURGIA DE POLVOS

Los embarques de productos de la metalurgia de polvos (tabla 11-1) abarca sólo cerca de 2% del peso total en la mayoría de las categorías de metales, pero su valor e importancia industrial son mucho mayores, debido parcialmente a aplicaciones especiales.

1. Las piezas estructurales son competitivas respecto a las producidas convencionalmente, porque sólo se utiliza el material necesario para la pieza terminada. Aunque el material inicial puede ser más costoso, el ahorro monetario en los pasos intermedios de procesamiento y las pérdidas por desperdicio suelen compensarlo, particularmente en piezas de forma compleja. Esto es especialmente cierto cuando se producen piezas de forma neta o casi neta.

Las mayores cantidades se hacen de polvo de hierro a menudo mezcladas con 4 a 6% de cobre y 1% de grafito para mayor resistencia, de hierro poroso infiltrado con cobre, y cada vez más, de acero atomizado. Tienen aplicaciones en la industria automotriz, en equipo para todo terreno, en artículos electrodomésticos y en máquinas para oficina en forma de engranes, partes de transmisiones y de bombas, cojinetes, y sujeta-

Tabla 11-1 Producción de piezas por metalurgia de polvos (Estados Unidos)*

	Embarques, 1 000 Mg†	
Metal	**1972**	**1997**
Hierro y acero	139.0	350.0
Cobre y aleaciones	24.3	22.0
Aluminio	81.5	40.0
Molibdeno	1.6	2.3
Tungsteno	4.6	0.6
Carburo de tungsteno		5.7
Níquel	4.3	10.4
Estaño		0.9

* Datos de Metal Powder Industries Federation, Princeton, N.J.
† Mg = 1 000 kg = tonelada métrica = 2 200 lb.

dores. Cantidades menores, pero crecientes, se fabrican de cobre y especialmente de aleaciones de aluminio, las cuales se prefieren en las máquinas para oficina debido a su bajo peso.

Los componentes estructurales son de gran importancia para aplicaciones de aeronaves, motores a reacción y propulsores de cohetes, como los discos de superaleación para turbina, mamparos y componentes de fuselaje, hechos de aleaciones de titanio y toberas para cohetes hecha de tungsteno o molibdeno infiltrado con cobre. En las superaleaciones, el método de la metalurgia de polvos evita los problemas de la segregación de las aleaciones, agrupamiento del carburo y estructuras residuales fundidas.

2. Los *cojinetes* se pueden fabricar de manera que combinen la resistencia a la carga y al desgaste de un componente con la función lubricante de otro. Algunos ejemplos son los cojinetes de hierro o de bronce impregnados con aceite "permanentemente lubricados", los cojinetes rellenos de plástico, los cojinetes de hierro rellenos de plomo y los prensados con grafito (hablando estrictamente, todos ellos se deben considerar como compuestos).

3. Una aplicación pequeña pero importante es en los *implantes quirúrgicos* (como en la Fig. 1-5). Una aplicación establecida desde hace mucho tiempo es el relleno de dientes con amalgamas dentales. Estos implantes representan el sinterizado transitorio con fase líquida a temperatura ambiente, en el cual una aleación de Ag-Sn se amalgama con Hg; el mercurio se consume en la reacción.

4. Algunos metales sólo se pueden producir mediante la metalurgia de polvos. El berilio se prensa en caliente al vacío. El tungsteno se sinteriza y se forja en caliente, en la preparación para el trefilado de alambre para filamentos de lámparas incandescentes; la contaminación controlada con pequeñas cantidades de elementos aleantes (por ejemplo, 0.5% Ni) acelera el sinterizado.

5. En la industria eléctrica, los *contactos* deben ser buenos conductores y también resistir el desgaste. El tungsteno o molibdeno (añadiéndoles de 25 a 50% de plata o

cobre), o el carburo de tungsteno (añadiéndoles de 35 a 55% de plata) cumplen los requisitos. Las *escobillas* consisten en grafito aglutinado que contiene de 20 a 97% de cobre o plata.

6. Las aplicaciones magnéticas incluyen *materiales magnéticamente suaves* como el Fe, Fe-3Si, Fe-50Ni, los cuales, debido a su suavidad mecánica, son difíciles de maquinar, pero se producen fácilmente en la forma final por medio de la metalurgia de polvos. Entre los *imanes permanentes*, los alnico (Fe-Al-Ni-Co) se pueden sinterizar en vez de fundir para la forma final. Sólo la metalurgia de polvos es adecuada para los imanes alargados, extremadamente poderosos, de un solo dominio, los cuales consisten en partículas de $R \cdot Co_5$ (donde R es una tierra rara como Sm). La compactación ocurre mientras el polvo se orienta en un campo magnético.

7. En las *aleaciones endurecidas por dispersión*, una resistencia elevada en caliente se asegura con la presencia de óxidos estables finamente distribuidos, los cuales evitan la migración y el deslizamiento de la frontera de grano. A menudo, el óxido se produce por oxidación interna después que el compacto de polvo de los metales constituyentes se ha fabricado [por ejemplo, los componentes de níquel disperso en torio para motores a reacción (TD), con 2% ThO_2, los electrodos de cobre con alúmina dispersa para soldadura y el polvo sinterizado de aluminio (SAP), hasta con 14% de Al_2O_3].

8. Cantidades cada vez mayores de *aceros para herramienta* se fabrican por medio de la metalurgia de polvos. Tales herramientas de acero de alta velocidad tienen una distribución del carburo mucho más fina, y el contenido de éste puede aumentar más allá de los límites encontrados en los aceros producidos convencionalmente; de ahí que la vida de la herramienta también se prolongue.

9. Las herramientas, las matrices y los materiales resistentes al desgaste más importantes son los *carburos cementados*. Los polvos de carburo de tungsteno (WC) se muelen con cobalto, de manera que cada partícula se recubre con el metal. Después del prensado, el sinterizado por fase líquida establece una densidad completa. Algunas veces la forma final se determina al esmerilar un compacto presinterizado, que luego se acaba por sinterizado. Los polvos con partículas de 1 a 5 μm se sinterizan para herramientas y matrices. Al incrementarse el contenido de cobalto de 3 a 15%, la dureza disminuye pero la ductilidad se eleva; los componentes de la matriz sometidos a esfuerzos de flexión suelen contener hasta 30% de cobalto. Se logran mejoras adicionales, al menos para propósitos de corte de acero, reemplazando un poco de WC con TiC. Para componentes sometidos al desgaste, el tamaño de la partícula es < 10 μm, aunque cada vez más se usan los polvos de submicrones para obtener propiedades mejores.

10. Los carburos cementados pertenecen a la clase más amplia de *cermets* (compuestos de cerámico-metal) que, por definición, incluyen materiales metálicos de fricción para trabajo pesado como: aleaciones de Cu-Sn o Cu-Zn con SiO_2, Al_2O embebidos, etcétera; elementos de combustible nuclear con UO_2 disperso en aluminio o acero inoxidable; compuestos metal-no metal (como los contactos eléctricos y las escobillas que contienen grafito), y el diamante aglutinado con metal (por lo general cobre y de 15 a 20% de estaño). Con frecuencia el término se utiliza junto con las herramientas de corte. Los miembros más nuevos de la familia son el TiC aglutinado con una aleación de Ni-Mo o con 50 a 60% de aglutinante de acero para herramienta. El último tiene la

Tabla 11-2 Características generales de los procesos de metalurgia de polvos

	Proceso				
Características	**Convencional**	**HIP**	**Moldeo por inyección**	**Moldeo por inyección de precisión**	**Forjado de preformas**
Pieza					
Metálica*	Todos	Todos (súper, AI)	Todos (acero, AI)	Todos	Acero, súper
Forma†	No S3, T2, 3, 5, 6, F3, 5, U	No T5, F5	No T5, F5, U1, 4	No T5, F5, U2, 4	No S3, T2, 3, 5, 6, F3, 5, U
Detalle superficial‡	B	B-C	B	A	A
Masa, kg	0.01-5 (30)	de 0.1 a 10 no encapsulada de 10 a 7 000 encapsulada	0.01-0.2	0.005-0.2	0.1-3
Sección mín., mm	1.5		1	0.1	3
Diámetro mín. del corazón, mm	4-6		1	0.2	5
Tolerancia, ±%	0.1	2	0.3	0.1	0.25
Costo‡					
Equipo	B-C	A	A-B	A-B	A-B
Matriz	B-D	B-C	A-B	A-B	A-B
Mano de obra	D-E	C-D	D-E	D-E	D-E
Acabado	C-E	B-D	C-E	D-E	D-E
Producción					
Habilidad del operador‡	D-E	D-E	D-E	D-E	D-E
Tiempo de entrega	Semanas	Semanas	Semanas	Semanas	Semanas–meses
Rapidez (pieza/h)	100-1 000	5-20	100-2 000	100-2 000	200-2 000
Cantidad mín.	1 000-50 000	1-100	10 000	10 000	100 000

* Metales más frecuentemente usados: súper = superaleación, AI = acero inoxidable.

† De la figura 3-1.

‡ Clasificaciones comparativas, donde A indica el valor más alto de la variable, E el más bajo. Por ejemplo, la MP convencional produce un buen detalle superficial, incluye un costo del equipo de medio a alto, el precio de la matriz es de moderado a elevado, hay costo reducido de la mano de obra, precio de acabado es de medio a bajo, y la habilidad requerida del operador es baja. Se puede utilizar para una rapidez de producción de media a alta, y requiere una cantidad mínima de 1 000 a 50 000 partes para justificar el costo de la matriz.

ventaja de que la pieza se puede maquinar después del sinterizado; la resistencia se obtiene mediante un tratamiento térmico final. Algunas aplicaciones comunes se muestran en la tabla 9-3 y en la sección 9-5-1.

11-7 CAPACIDADES DEL PROCESO Y ASPECTOS DEL DISEÑO

La metalurgia de polvos es capaz de producir piezas de forma casi neta o neta; de ahí que su aplicación principal sea para piezas de forma compleja cuyo tamaño es de pequeño a medio, como engranes, levas y palancas. Las capacidades generales de la técni-

ca se muestran en la tabla 11-2. Los materiales indicados son los que se emplean más ampliamente, aunque también es factible procesar otros. Las limitaciones de la forma se pueden deducir con facilidad por medio de comparaciones con otras técnicas analizadas anteriormente. Las limitaciones tienen esencialmente dos fuentes principales: primero, el material en partículas debe ser capaz de llenar el molde o la cavidad de la matriz; segundo, el compacto completo debe ser de una forma que se pueda liberar del molde o matriz.

En la metalurgia de polvos convencional, el tamaño está limitado por la capacidad de la prensa y por la necesidad de permitir el escape del aglutinante y del lubricante del interior del cuerpo. Las tolerancias se rigen por la capacidad de reproducir la contracción. El espesor en la dirección axial (de prensado) está restringido por la disminución de la presión en un recipiente fijo (Fig. 11-5*a*) hasta $2D$, y con punzones contractuantes hasta $4D$ (Fig. 11-12*a*). Con un punzón, los pasos se deben limitar (Fig. 11-12*b*) para evitar variaciones de la densidad. Los punzones de camisa múltiple permiten diferencias mucho mayores (Fig. 11-12*c*).

Para una vida más prolongada de la matriz, el diseño de la pieza debe proporcionar radios para los elementos de la matriz (Fig. 11-12*c*). Los punzones de filo fino se desgastan rápidamente y deben cambiarse para presentar una cara plana (Fig. 11-12*d*). Las camisas deben ser de un mínimo de 1 mm de espesor (Fig. 11-12*c*). Las cavidades

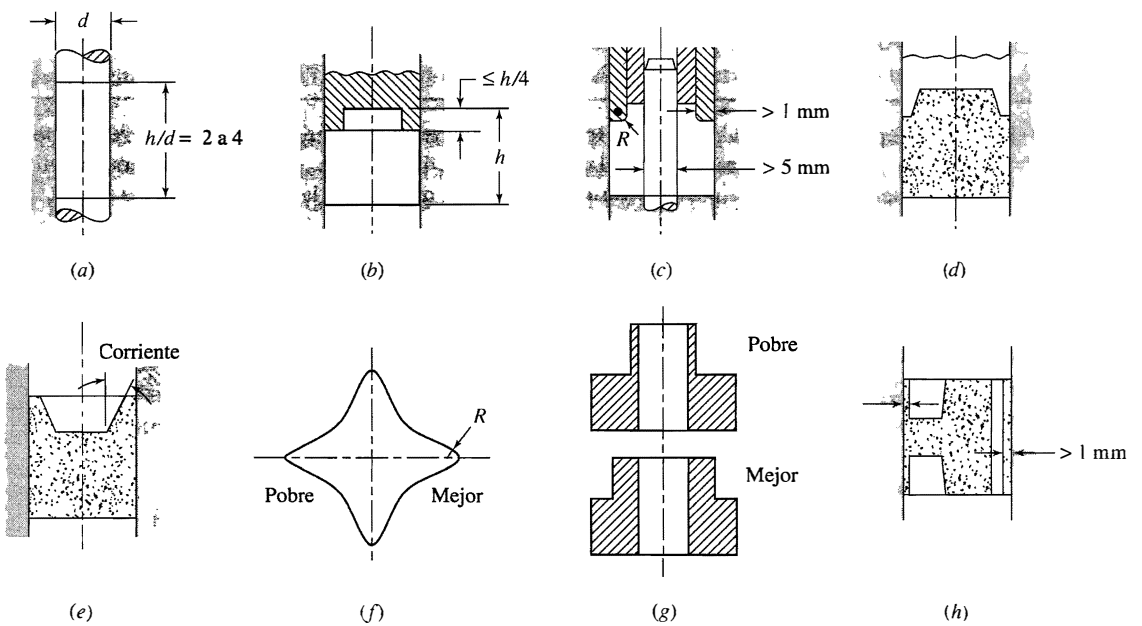


Figura 11-12 Características del diseño de piezas fabricadas por metalurgia de polvos: (*a*) razón longitud-diámetro, (*b*) extremo escalonado, (*c*) matriz de camisas múltiples, (*d*) eliminación del borde fino en el punzón, (*e*) ángulo de retiro en el punzón, (*f*) se evitan bordes agudos en el contorno del punzón, (*g*) se evita el espesor desigual de pared, (*h*) espesor mínimo de la pared. (*Adaptado de Powder Metallurgy Design Manual, 2a. ed., Metal Powder Industries Federation; Princeton, New Jersey, 1995. Con permiso.*)

internas pueden tener varias formas, pero requieren un ángulo de salida (Fig. 11-12*e*). Se deben evitar también en el punzón las esquinas agudas y los filos finos (Fig. 11-12*f*). El diámetro mínimo de los agujeros pasados es de 4 a 5 mm para evitar la falla prematura de la barra de núcleo (Fig. 11-12*c*). Las diferencias grandes en el espesor de la pared pueden causar problemas con esfuerzos de contracción (Fig. 11-12*g*). Los espacios angostos no se pueden llenar aun bajo presión; por lo tanto, el espesor de la pared debe tener un mínimo de 1 mm (o mejor de 1.5 mm, Fig. 11-12*h*).

Los agujeros transversales, los cortes sesgados y las formas reentrantes no son aceptables. A pesar de estas limitaciones, el herramental duro es el más adecuado para la producción en masa. Es factible controlar las dimensiones adecuadamente. La complejidad de la forma en la vista de planta puede ser sustancial (como en los engranes), y las tasas de producción son altas. Es posible unir varias piezas moldeadas por separado y asegurar la virtual desaparición de la junta durante el sinterizado.

Se proporciona mayor flexibilidad mediante moldes flexibles para compactación isostática, que permiten cortes sesgados o ahusados invertidos, pero no agujeros transversales.

La mayor parte de las limitaciones se supera con el moldeo por inyección del metal, que está sujeto a las mismas reglas que la fundición en matrices (Secc. 7-8-2). Es preferible tener un espesor uniforme de pared, por lo que las transiciones a uno diferente deben ser ahusadas o al menos radiadas (Fig. 11-13*a*). La localización de la masa causa contracción (*hundimiento, rechupe*), y puede evitarse de la misma manera que en la fundición (Fig. 11-13*b*).

Ejemplo 11-8

Explore la posibilidad de fabricar la brida del ejemplo 7-9, inciso (*b*) por metalurgia de polvos.

La razón altura-espesor del collar es 20/5 = 4, aceptable, y el espesor de la pared satisface plenamente el mínimo. Para considerar la carrera mucho más larga que se necesita para el collar,

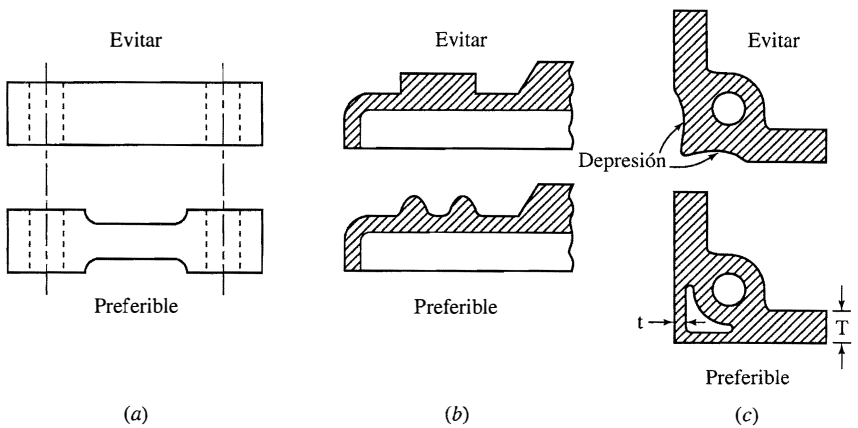


Figura 11-13 Características de diseño de piezas fabricadas por moldeo de polvo por inyección: (*a*) se minimizan las diferencias en el espesor de la pared, (*b*) descomposición de una sección gruesa, (*c*) se evitan concentraciones de masa empleando un corazón. (*Como en la figura 11-12.*)

el juego de matrices tendrá una camisa operada separadamente que también actúa como expulsor. Suponga: densidad de llenado = 35%; densidad en crudo = 72%. Así, altura de llenado = 0.72/0.35 = 2.06 (altura en crudo). La profundidad de la cavidad de la brida debe ser 5(2.06) = 10.3 mm, y para la cavidad del collar 20(2.06) = 41.2 mm.

Esto ignora la contracción. Si el sinterizado incrementa la densidad hasta 95%, la contracción volumétrica es, según la ecuación (11-3*b*), igual a 0.72/0.95 = 0.758(24.2%), y la lineal, de acuerdo con la ecuación (11-3*b*), igual a 0.9117. Por lo tanto, incremente todas las dimensiones en 1/0.9117 = 1.0968 o 9.68%.

Ejemplo 11-9

La pieza del ejemplo 7-10 se elaborará por metalurgia de polvos. Se aplican las mismas consideraciones que en el ejemplo 11-8, con la diferencia de que el movimiento de los elementos de la matriz se complica. Después del llenado, el punzón central inferior debe retraerse junto con el punzón central superior, y la compactación puede comenzar sólo después que hayan alcanzado sus posiciones adecuadas.

11-8 ELECTROFORMADO

La partícula más pequeña es el átomo (o para un compuesto químico, la molécula). Los componentes pueden obtenerse a través de la deposición controlada de átomos en una superficie; se habla de *chapado* y *recubrimiento* (Cap. 19) cuando el depósito se fija (como en el chapado de cromo de la defensa de un automóvil), y de *formado* cuando el depósito, retirado de la forma (llamada *matriz, mandril, dado,* etcétera), sirve como un componente.

En el proceso de *electroformado*, una placa o plancha de metal (el *ánodo*) se sumerge en una solución acuosa de sal del mismo metal (el *electrolito*), y se conecta al polo positivo de una fuente de potencia de cd de bajo voltaje y alta corriente (Fig. 11-14). Un molde eléctricamente conductor (matriz o mandril) con la forma deseada se sumerge a alguna distancia del ánodo y se conecta al polo negativo (de esta manera se convierte en el *cátodo*). Los átomos de metal se desprenden en forma de iones positivos del ánodo, se transportan a través del electrolito hacia el cátodo (y por lo tanto, se llaman *cationes*) y se depositan en éste como átomos neutros.

Se necesitan 96 500 coulombs (= ampere · segundo) para desprender 1 mol de metal monovalente (*constante de Faraday*). Así, la rapidez de transferencia del metal es

$$W_e = \frac{j}{96\ 500}\frac{M}{Z}\eta \qquad \textbf{(11-4)}$$

donde W_e está en g/s · m^2, j es la densidad de corriente (A/m^2); M es el peso atómico en gramos (g/mol), Z es la valencia (carga/ion) y η la eficiencia (por lo general alrededor de 0.9).

La composición, temperatura y circulación del electrolito, así como la densidad de corriente, necesitan un control cuidadoso. Una vez que se obtiene un depósito de espesor suficiente (lo cual puede requerir horas o días), se retira de la matriz.

Las *matrices permanentes* pueden fabricarse con metal, de vidrio o de plástico rígido con superficie metalizada (por ejemplo, se metalizan con una técnica de deposi-

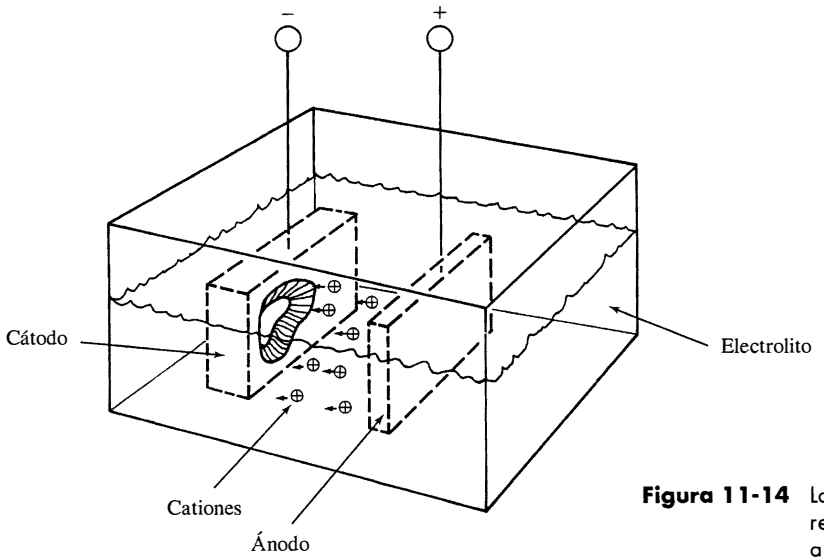


Figura 11-14 Las formas complejas se pueden reproducir con gran detalle y exactitud a través del electroformado.

ción química). La adhesión se minimiza al pasivar la superficie de metal de la matriz y al aplicar un recubrimiento delgado de un compuesto de separación. Se permite un ahusamiento ligero para facilitar el retiro.

Las *matrices desechables* están fabricadas con un metal (aluminio o zinc) que se puede disolver químicamente, con una aleación de bajo punto de fusión (como una aleación eutéctica Sn-Zn), o con cera o plástico que se pueden retirar por fusión. Como la pieza terminada no se retira, se logra una gran libertad en la complejidad de la forma (comparable con la fundición por revestimiento, Secc. 7-5-5).

El depósito de átomo por átomo reproduce la superficie de la matriz con la mayor exactitud y esto, junto con la complejidad de la forma que se obtiene, define el rango de aplicación económica del proceso para piezas terminadas (como guías de ondas, fuelles, tubos venturi, reflectores, cilindros sin costura para estarcido empleados en la impresión de textiles, filtros y ruedas de tipos) y matrices (para el estampado de discos de alta fidelidad y para el moldeo plástico en general). Los esfuerzos internos pueden ser severos, por lo que es un arte producir buenas piezas.

Ejemplo 11-10

Una vasija muy decorada se fabrica por medio del electroformado en una matriz conductora. El área total de la superficie es 0.2 m^2; la deposición procede a 6 V y 80 A mediante una solución de sulfato de cobre ($CuSO_4$). ¿En cuánto tiempo se obtendrá un espesor de pared de 0.5 mm (500 μm)?

Densidad de corriente $j = 80/0.2 = 400\ A/m^2$; $M = 63.54$ g/mol; $Z = 2$. De la ecuación 11-4

$$W_e = (400)(63.54)(0.9)/(96\,500)(2) = 0.1185\ g/s \cdot m^2$$

Como la densidad del cobre es 8.96 g/cm^3 = 8.96 Mg/m^3, el espesor de la capa es 0.1185/8.96 (10^6) = 0.013 μm/s. Así, tiempo = 500/0.0132 = 37 800 s = 630 min = 10.5 h.

11-9 RESUMEN

La materia en partículas, que varía en tamaño desde átomos hasta polvo grueso, se ha consolidado en productos útiles desde los tiempos más remotos. La técnica, aplicada primero a los cerámicos, también es adecuada para metales. Los procesos de la metalurgia de polvos abarcan varios pasos críticos para tener éxito:

1. El polvo metálico elemental se puede obtener de óxidos y otros compuestos por medio de la reducción. Una mayor cantidad de metal puro, y particularmente de polvo de aleaciones, se producen por atomización de los metales fundidos. Las altas tasas de enfriamiento en la tecnología de solidificación rápida ofrecen una variedad de beneficios: el tamaño y espaciamiento de características, como los brazos de las dendritas y las partículas de segunda fase, se reducen; las soluciones sólidas supersaturadas pueden conservarse; en el límite, se pueden producir metales amorfos (vítreos).
2. El polvo se tritura cuando es necesario, se clasifica de acuerdo con el tamaño y forma, se limpia y se mezcla para impartir la composición requerida, la densidad de llenado y las propiedades reológicas que permiten un fácil manejo.
3. Un cuerpo crudo se produce mediante varios procesos, los cuales generalmente se clasifican como consolidación en frío (prensado en matriz, prensado isostático, moldeo por inyección, laminado o extrusión).
4. Se establecen enlaces permanentes al sinterizar a temperaturas elevadas, desarrollando así resistencia al tiempo que el volumen se contrae. Los vacíos remanentes o los defectos de la frontera de grano afectan las propiedades de fatiga e impacto; uno de los objetivos de las técnicas avanzadas es mejorar la tenacidad a la fractura de las piezas terminadas. El sinterizado en fase líquida se aplica a los cermets, y el sinterizado de fase líquida parcial a aleaciones de aluminio hechas con polvos elementales.
5. Se logra una gran mejoría de las propiedades a través de la consolidación en caliente, es decir, la aplicación de presión a la temperatura de sinterizado. Las partículas se aproximan mucho y se mueven entre sí, propiciando de esta manera la adhesión mutua, por lo que se obtiene una densidad completa.
6. Además de obtenerse piezas completamente densificadas con propiedades mejoradas tales como los componentes para motores de reacción y las herramientas para corte de metal, se pueden producir otras piezas con gran complejidad de forma y con tolerancias estrictas, como engranes. El moldeo por inyección de polvos elimina muchas de las limitaciones de forma en los procesos convencionales. Con frecuencia, la metalurgia de polvos es el método más práctico para producir compuestos de propiedades poco comunes y para fabricar piezas con porosidad controlada.
7. Los procesos y el equipo de la metalurgia de polvos presentan los mismos riesgos que las operaciones de fundición y de trabajo de metal, por lo que se deben tomar medidas de protección similares.

PROBLEMAS 11A

11A-1 (*a*) En la metalurgia de polvos, ¿el término "atomización" se refiere a la producción de partículas de tamaño atómico? (*b*) Dibuje un esquema simple del proceso de atomización por agua.

11A-2 (*a*) Defina RST y (*b*) indique el producto más avanzado (inusual) que puede resultar de esta técnica.

11A-3 Haga bocetos de matrices adecuadas para compactar cilindros con razones altura-diámetro de (*a*) 0.5 y (*b*) 2. Indique el movimiento de los elementos de la matriz y la dirección de la fricción.

11A-4 Realice un boceto de una matriz que asegure densidad igual en una pieza axialmente simétrica parecida a una brida. Muestre la dirección del movimiento del elemento de la matriz.

11A-5 Dibuje un diagrama que indique cambios de (*a*) densidad, (*b*) resistencia y (*c*) ductilidad como una función del tiempo en el curso del sinterizado (grafique las características como fracciones de las propiedades de productos forjados). (*d*) Establezca la temperatura de sinterizado (en términos generales).

11A-6 Un componente de una máquina (como un engrane recto) se fabricó de un acero de baja aleación (AISI 8620) por medio de la técnica de metalurgia de polvos. Enuncie la secuencia de pasos en el curso de la producción.

11A-7 Determine los mecanismos que dan resistencia a un compacto crudo fabricado por prensado en frío.

11A-8 Haga bocetos del prensado isostático con los métodos de (*a*) bolsa húmeda y (*b*) de bolsa seca.

11A-9 (*a*) Defina HIP. (*b*) Haga un bosquejo del proceso e identifique los elementos principales.

11A-10 Enuncie los pasos para fabricar una biela por medio del forjado de polvos.

11A-11 Indique brevemente los pasos esenciales en el moldeo por inyección de polvos.

11A-12 Defina el formado por aspersión.

11A-13 (*a*) Defina el término *cermet* y (*b*) dé dos ejemplos.

11A-14 Determine la secuencia de operaciones para fabricar un cojinete permanentemente lubricado. (También explique la condición crítica para lograr el objetivo.)

PROBLEMAS 11B

11B-1 Realice bocetos para mostrar formas de polvos (*a*) aciculares, (*b*) esferoidales, (*c*) nodulares, (*d*) laminares, (*e*) dendríticas y (*f*) irregulares. (*g*) Establezca cuál de éstas proporcionará la densidad de llenado más alta.

11B-2 Indique si un polvo esférico uniformemente fino o uno uniformemente grueso dará la mayor densidad de llenado. Justifique su elección.

11B-3 Explique si, en general, las partículas frágiles o las dúctiles se pueden consolidar a una densidad mayor. Justifique su respuesta.

11B-4 Determine si, en general, las partículas suaves o las duras se pueden consolidar a una densidad mayor. Justifique su elección.

11B-5 ¿Es posible triturar un material altamente dúctil como el aluminio puro?

11B-6 Explique por qué (*a*) la porosidad afecta las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas por metalurgia de polvos y (*b*) las de tensión e impacto más que (*c*) a la resistencia a la compresión o a la dureza.

11B-7 Se necesita un engrane recto pequeño para un electrodoméstico. Sugiera al menos tres materiales con los que se pudiera fabricar por medio de la metalurgia de polvos e identifique los beneficios para cada uno.

11B-8 (*a*) ¿Es posible físicamente diseñar una matriz que permita que la pieza del problema 7B-10 se fabrique por técnicas de metalurgia de polvos? (*b*) Si ése es el caso, ¿resulta técnica y económicamente atractivo?

11B-9 Para explicar la diferencia entre una parte forjada en caliente y una por forjado de polvo, haga un bosquejo simplificado de la sección longitudinal de una biela fabricada mediante (*a*) forjado por matriz de impresión (antes de la eliminación de la rebaba) y (*b*) forjado de polvo.

11B-10 El diseño de una pieza cilíndrica incorpora un agujero transversal. (*a*) Realice un boceto para visualizar la parte. (*b*) Evalúe si se puede fabricar por medio de cualquier técnica de metalurgia de polvos.

11B-11 (*a*) Determine las fuentes de resistencia en un cuerpo crudo de polvo de metal que no contiene aglutinante. (*b*) Explique si la presión normal, por sí sola, o la presión normal combinada con deslizamiento es más efectiva para desarrollar la resistencia en crudo. Justifique su respuesta.

11B-12 En la metalurgia de polvos, ¿por qué las películas de óxido son (*a*) desastrosas para la ductilidad de productos de superaleaciones, pero (*b*) menos dañinas para los productos de aleación de titanio?

11B-13 Explique las diferencias que se deben esperar entre las estructuras de un acero para herramienta de alta velocidad producidas por metalurgia convencional de lingotes y las fabricadas por metalurgia de polvos.

11B-14 Es común hablar de herramientas de carburo de tungsteno. (*a*) Defínalo y (*b*) enuncie los pasos principales para producirlo.

11B-15 Una pieza de acero debe tener una densidad del 100%. (*a*) Explique si se puede lograr sólo por sinterizado. (*b*) Defina brevemente otros dos procesos adecuados de metalurgia de polvos.

11B-16 (*a*) Sugiera por lo menos dos métodos por los que las propiedades mecánicas de una pieza formada por metalurgia de polvos, ya sinterizada, se puedan mejorar. Justifique su respuesta. (*b*) Sugiera un método por el que una pieza con propiedades mecánicas mejoradas se podría fabricar directamente (sin sinterizar primero).

11B-17 Dibuje una matriz adecuada para fabricar una pieza en forma de copa a través de la metalurgia de polvos.

11B-18 Un diseño conceptual incluye cada una de las cuatro formas del grupo U de la figura 3-1. Analice si se pueden fabricar por medio de cualquier técnica de metalurgia de polvos. Identifique la(s) técnica(s) para cada una.

11B-19 La metalurgia de polvos es uno de los caminos para producir: (*a*) engranes de acero, (*b*) alambre de tungsteno, (*c*) herramientas de corte de AVV, (*d*) cojinetes "permanentemente lubricados," (*e*) imanes alargados de un solo dominio. Explique, en cada caso, la razón principal para elegir esta técnica.

11B-20 El disco de una turbina para un motor a reacción se va fabricar de una superaleación con base de níquel por técnicas de metalurgia de polvos. Explique, empleando sendos dibujos, los pasos esenciales del proceso; especifique la operación de prensado que proporciona la densidad más uniforme.

PROBLEMAS 11C

11C-1 Retome el ejemplo 11-3 y determine el espesor máximo (longitud) que se permite en el diseño de la pieza, si se agrega ácido esteárico ($\mu = 0.1$).

11C-2 ¿Cuál es la presión a la mitad de la longitud de un cilindro $l/d = 4$ prensado en una prensa de doble acción (Fig. 11-5*c*) si la compactación se hace (*a*) sin lubricación ($\mu = 0.5$) y (*b*) con lubricación ($\mu = 0.1$)? La relación de Poisson es 0.31.

11C-3 Una aleación de Al-5Mg tiende a la segregación intragranular. (*a*) Con la ayuda de un boceto de la porción relevante del diagrama de fase, explique por qué sucede. (*b*) Considere si la segregación se podría eliminar más rápidamente en una fundición o en una pieza de metalurgia de polvos.

11C-4 Un cuerpo compacto de polvo de hierro se sinteriza en un cilindro de 20 mm de diámetro y 45 mm de altura; al pesarlo se determi-

na que tiene una masa de 98 g. Calcule (*a*) la densidad aparente, (*b*) el porcentaje de la densidad teórica y (*c*) el volumen de vacíos (porosidad) en porcentaje.

11C-5 Suponiendo que el cilindro del problema 11C-4 se sinteriza hasta que se obtiene la densidad teórica total, y que la contracción es uniforme en todas direcciones, calcule sus dimensiones.

11C-6 Para el prensado en frío de la pieza del ejemplo 11-8, (*a*) diseñe la matriz (muestre las partes que se mueven), (*b*) estime el tamaño de la prensa si la presión de compactación en frío es 200 MPa y (*c*) determine la fuerza que el expulsor debe desarrollar para asegurar una compactación igual en el collar. (*d*) Si se desea una densidad mayor y más exactitud dimensional, la parte se sinteriza y luego se vuelve a prensar, ¿se puede emplear la misma matriz?

11C-7 Diseñe la matriz para la pieza del ejemplo 11-9. Muestre la posición de los elementos de la matriz para el llenado, y antes y después de la compactación. Por simplicidad, suponga una densidad de llenado de 33% y una densidad compacta de 66%. (*Sugerencia*: estudie los movimientos de la matriz en la Fig. 11-6).

11C-8 Un cilindro de $d_0/h_0 = 1$ se compacta a 82% de la densidad teórica al prensar en frío un polvo atomizado de una aleación de acero. Se obtendrán una densidad completa y una alta resistencia recalcando el cilindro en caliente hasta un tercio de su altura original. (*a*) ¿Qué diámetro se debe esperar, aproximadamente, después del recalcado? (*b*) ¿Habrá agrietamiento en el recalcado? Si la respuesta es afirmativa, ¿dónde y por qué? (Ilustre con un boceto.) (*c*) Si el agrietamiento es un peligro, ¿cómo se podría evitar o minimizar? (*d*) ¿Es factible evitar el agrietamiento en una matriz del diámetro final?

LECTURAS ADICIONALES

ASM Handbook, vol. 7, *Powder Metallurgy*, ASM International, 1998.

Atkinson, H.V. y B.A. Rickinson: *Hot Isostatic Pressing*, Adam Hilger, 1991.

Dowson, G.: *Powder Metallurgy: The Process and Its Products*, Adam Hilger, 1990.

German, R.M.: *Sintering Technology and Practice*, Wiley, 1996.

German, R.M.: *Powder Metallurgy Science*, Metal Powder Industries Federation, 1985.

German, R.M. y A. Bose: *Injection Molding of Metals and Ceramics*, Metal Powder Industries Federation, 1997.

Hausner, H.H. y M.K. Mal: *Handbook of Powder Metallurgy*, Chemical Publishing Co., Nueva York, 1982.

Karlsson, L. (ed.): *Modeling in Welding, Hot Powder Forming and Casting*, ASM International, 1997.

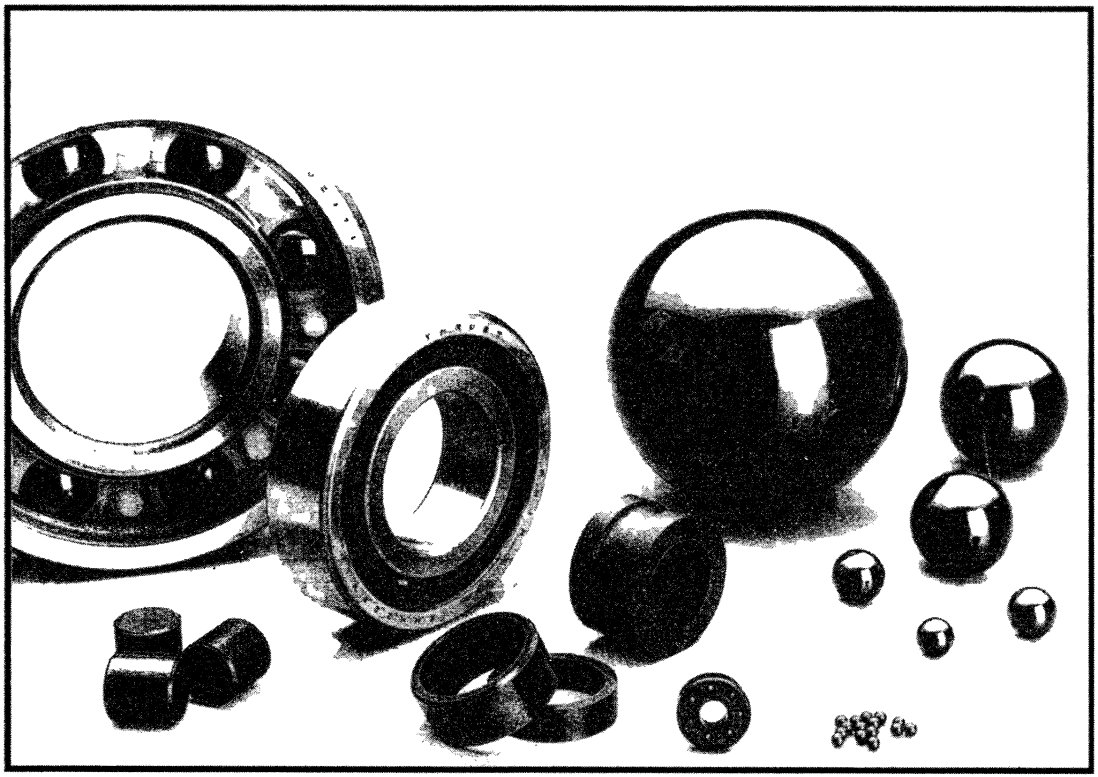
Kuhn, H.A. y B.L. Ferguson, *Powder Forging*, Metal Powder Industries Federation, 1990.

Lawley, A.: *Atomization: The Production of Metal Powders*, Metal Powder Industries Federation, 1992.

Lenel, F.V.: *Powder Metallurgy: Principles and Applications*, Metal Powder Industries Federation, 1980.

Liebermann, H.H. (ed.): *Rapidly Solidified Alloys*, Dekker, 1993.

Powder Metallurgy Design Manual, 2a. ed., Metal Powder Industries Federation, 1995.



Los avances en el procesamiento de cerámicos han dado como resultado el desarrollo de elementos cerámicos de máquinas. La baja densidad de las bolas de nitruro de silicio permite que los rodamientos de rodillos operen a mayor rapidez; todos los cojinetes cerámicos pueden operar en medios hostiles. (*Cortesía de Norton Advanced Ceramics, Worcester, Massachusetts.*)

capítulo

12

Procesamiento de cerámicas

Después de revisar las propiedades básicas de las cerámicas, exploraremos:

La manufactura de los materiales cerámicos técnicos

La consolidación y el sinterizado

Las medidas para mitigar la naturaleza frágil de las cerámicas

Las diversas aplicaciones de los cerámicos técnicos

Los vidrios y su manufactura

Las cerámicas, aunque frágiles, han sido indispensables en el desarrollo de la humanidad como materiales de construcción, envases, recipientes de cocina y, generalmente, como materiales resistentes a la corrosión. En efecto, sin las cerámicas, gran parte de la evidencia de la vida y del arte de nuestros ancestros se habría perdido. Las cerámicas no han perdido su importancia, y los nuevos miembros de la familia solamente han expandido su campo de aplicación. Las cerámicas de alta tecnología con propiedades eléctricas y magnéticas excepcionales han hecho posible la revolución de los dispositivos microelectrónicos; otras han abierto la posibilidad de producir componentes estructurales con resistencias a la temperatura y al desgaste hasta ahora inalcanzables. Muchos de los procesos de las cerámicas son muy antiguos, pero otros están en la vanguardia del desarrollo (tabla 1-1).

En su definición más simple, las *cerámicas* están compuestas de elementos metálicos y no metálicos; esto deja fuera a materiales como el diamante, el SiC y el Si_3N_4. Una definición más amplia considera a los cerámicos como todo lo que no es un metal o un material orgánico y que se somete a temperatura elevada durante su manufactura o uso. Además de una gran variedad de silicatos y óxidos encontrados en la naturaleza, la definición incluye materiales manufacturados, algunas veces con composición similar pero de mayor pureza, y en otras carburos, nitruros y demás compuestos que no se encuentran en la naturaleza. Por definición, el vidrio es un cerámico y por tanto se analiza en este capítulo.

12-1 CARACTERÍSTICAS DE LAS CERÁMICAS

Antes de iniciar un análisis de los procesos, es preciso examinar las características particulares de las cerámicas; esto será un repaso para quienes han tomado un curso introductorio en ciencia de los materiales.

12-1-1 Enlace y estructura

En los metales, los átomos son móviles porque el enlace se realizaba mediante una nube de electrones; en los cerámicos, la movilidad está excesivamente limitada por los diferentes enlaces.

Naturaleza de los enlaces cerámicos Distintas formas de enlaces pueden tener una función específica:

1. Los *enlaces covalentes* se forman por electrones compartidos entre átomos adyacentes. Éstos son enlaces muy fuertes; su naturaleza direccional a menudo conduce a la formación de una estructura espacial en la cual los átomos no necesariamente tienen empaque cerrado. La alta resistencia del enlace se refleja en el elevado punto de fusión, la gran resistencia, y la enorme dureza que está asociada con la fragilidad; con frecuencia, la dilatación térmica es baja, y la resistencia eléctrica es alta. El carbono en forma de diamante es un material enlazado de manera puramente covalente (Fig. 12-1*a*).

2. Los *enlaces iónicos* se forman cuando un átomo cede uno o más electrones para completar la capa exterior de electrones de otro átomo o átomos. El balance de la carga

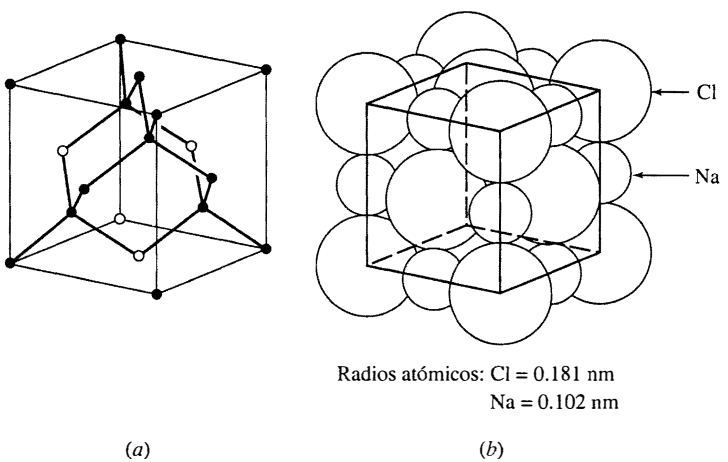


Figura 12-1 Los dos tipos básicos de enlaces en cerámicos son (*a*) enlace covalente, como en el diamante, en el que cada átomo de carbono comparte electrones con cuatro átomos adyacentes, y (*b*) enlace iónico, como en el NaCl, en el que los iones de sodio y de cloro se alternan regularmente.

eléctrica se mantiene, pero el átomo donante ahora es deficiente en electrones y se convierte en un centro de carga positiva (*ion positivo* o, como está atraído al polo negativo, también se llama *catión*), mientras que el átomo receptor tiene un exceso de carga negativa (*ion negativo* o *anión*). La atracción entre cargas opuestas (atracción de Coulomb) proporciona la resistencia del enlace.

Un ejemplo es la sal común, NaCl, en la cual la carga de cada ion Na^+ se equilibra mediante la carga del ion Cl^-. De nuevo se forma una red espacial, pero esta vez es de empaque cerrado. Por ejemplo, la retícula del NaCl se puede visualizar como retículas cúbicas de Na y Cl interpenetradas (Fig. 12-1*b*). La conductividad eléctrica es baja a temperaturas bajas, pero se eleva a temperaturas altas, cuando los iones se mueven y portan la carga eléctrica (*conductividad iónica*). En una estructura regular, las dislocaciones se pueden propagar como lo hacen en los metales; de ahí que, aunque las estructuras son frágiles a temperatura baja, es evidente cierta ductilidad a temperaturas altas y cuando se aplica presión hidrostática. La resistencia del enlace y el punto de fusión aumentan con el incremento de la carga eléctrica. De esta manera, el NaCl es relativamente suave; el MgO (carga doble) es más duro, el Al_2O_3 es aún más duro, y el SiC (en el cual hay cuatro enlaces) es el más duro.

3. Los *enlaces duales* existen en muchos cerámicos en donde los electrones tienden a concentrarse hacia los centros atómicos, dando a los enlaces un carácter covalente incluso en los compuestos iónicos. El enlace se vuelve más covalente en carácter con una diferencia decreciente en la *electronegatividad* entre los elementos participantes (la electronegatividad es una medida de la capacidad de los átomos para atraer electrones). El grado del carácter covalente puede estimarse para diferentes cerámicos: MgO = 0.25; $SiO_2 = 0.5$; $Si_3N_4 = 0.7$; SiC > 0.9; C = 1. Las cerámicas más complejas pueden incorporar ambos tipos de enlaces: en el yeso ($CaSO_4$), el S está enlazado de manera covalente respecto al O, pero el grupo SO_4^{2-} está enlazado iónicamente al Ca^{2+}.

4. Los *enlaces secundarios* son extremadamente importantes cuando las cerámicas forman estructuras de laminillas en capas. Dentro de las laminillas los enlaces fuertes, predominantemente covalentes, aseguran gran resistencia; entre las laminillas sólo actúan enlaces secundarios y la resistencia de éstos puede variarse mediante la adición de moléculas de un gas o un líquido. Esas moléculas se adsorben en las superficies de las laminillas, permitiendo el movimiento fácil y haciendo más sencillo así el procesamiento.

5. Los *cerámicos multicomponentes* se forman con dos o más cerámicos sencillos como óxidos y se consideran como las contrapartes cerámicas de las aleaciones metálicas. Las fases resultantes se muestran en diagramas de equilibrio que revelan características similares a las encontradas en los diagramas de fase de los metales (Secc. 6-1). Cuando los cerámicos forman fases separadas, se habla de cerámicos *multifase*. Así, es factible que un material cerámico sea más tenaz mediante una fase dispersa en la matriz formada por la otra fase.

Cristalinidad En la forma estable, de mínima energía, la mayoría de los cerámicos son *cristalinos*. Los átomos ocupan sitios definidos en una retícula de gran extensión. A medida que la temperatura o la presión cambian, diferentes estructuras cristalinas (*polimorfas*) se pueden volver más estables. Como hay un cambio en la estructura cristali-

na, a las *transformaciones polimorfas* les sigue una variación del volumen. La magnitud de este cambio normalmente es mayor que la causada por las transformaciones alotrópicas en los metales y puede conducir al agrietamiento superficial, la fractura, o la destrucción total de la pieza. En una *transformación por desplazamiento*, los enlaces se conservan pero se distorsionan para permitir la formación de una nueva estructura cristalina, en cierto modo como en la transformación austenita-martensita en el acero (Secc. 6-4-3). En una *transformación reconstructiva*, la nueva estructura se forma rompiendo enlaces existentes; esto implica más energía de accionamiento y la transformación se puede suprimir mediante un enfriamiento rápido.

Algunos cerámicos son no cristalinos (*amorfos*), así que se llaman *vidrios*. Un vidrio se forma cuando una cerámica normalmente cristalino se calienta más allá de su punto de fusión y luego se enfría tan rápido que la cristalización se suprime. Los enlaces son los mismos que en un cerámico cristalino, pero el ordenamiento de red de largo alcance no existe en este *estado vidrioso* (también llamado, del latín, *estado vítreo*). Aunque es precisa una rapidez de enfriamiento extremadamente elevada para fabricar vidrio metálico (Secc. 11-2-1), los vidrios cerámicos se forman con tasas de enfriamiento usadas en la práctica industrial. Si un vidrio como ése se mantiene a temperaturas elevadas por un gran periodo, se obtiene de nuevo la forma cristalina más estable (el vidrio cristaliza o, como se dice con frecuencia, se *desvitrifica*). Un análisis más detallado de los vidrios se da en la sección 12-5. Los sólidos no cristalinos también se pueden formar por reacción química; los *geles* resultantes son estructuras coloidales relacionadas con la gelatina común pero con resistencia considerable.

En general, las propiedades de los cerámicos amorfos y de algunos cerámicos que cristalizan en forma cúbica son isotrópicas, mientras que las de los que cristalizan en formas más complejas pueden ser altamente anisotrópicas.

12-1-2 Propiedades de las cerámicas

Las cerámicas se emplean como materiales de ingeniería debido a su resistencia, dureza, resistencia al calor y a la corrosión elevadas, así como a sus propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas deseables.

Propiedades mecánicas Se miden por medio de las técnicas descritas en el capítulo 4. Una característica común de las cerámicas son las grietas diminutas. En consecuencia, son frágiles y sus propiedades mecánicas están sujetas a variaciones aleatorias (son *probabilísticas* por naturaleza, en contraste con la mayoría de los metales, en los cuales son *determinísticas*). Esto significa que se debe realizar un número suficiente de pruebas para obtener una medición significativa de la dispersión esperada. La evaluación se basa a menudo en un tratamiento estadístico; el diseño debe tomar en cuenta estos hechos. Un tratamiento resumido del tema se encuentra en *Engineered Materials Handbook Desk Edition*, ASM International, 1995.

1. El ensayo de tensión es difícil. Se debe tener cuidado extremo para no generar defectos superficiales durante la preparación de la probeta y para evitar la carga excéntrica en la prueba. Es más fácil realizar pruebas de flexión para determinar el módulo de

ruptura (Secc. 4-1-7), pero la preparación de la probeta es igualmente crítica. Se prefiere la prueba de flexión de cuatro puntos porque con la distribución más uniforme del esfuerzo hay más probabilidades de que se descubran grietas (véase el ejemplo 4-6). Las grandes concentraciones de esfuerzos introducidas por grietas agudas vuelven a los cerámicos vulnerables a la falla por fatiga, así que los componentes cerámicos se diseñan cada vez más por medio del enfoque de la mecánica de la fractura.

2. Las grietas son menos dañinas en la compresión (Secc. 4-3), y la resistencia a la compresión generalmente es varias veces mayor que su resistencia a la tensión. La alineación de las platinas es crítica si hay que evitar los esfuerzos de flexión en el ensayo de compresión. En la ausencia de deformación plástica, la deformación elástica termina con una desintegración catastrófica cuando se alcanza una densidad crítica de los defectos. También se utilizan los ensayos de dureza.

3. Los cerámicos retienen su resistencia y su dureza a altas temperaturas, y los destinados a aplicaciones en temperaturas elevadas se someten a pruebas de termofluencia con dichas condiciones térmicas de larga duración, ya que la tasa de termofluencia es extremadamente baja. Algunas cerámicas presentan una plasticidad importante únicamente cerca de su punto de fusión.

Debido a la función crítica de las grietas, los componentes cerámicos se prueban meticulosamente por medio de varios métodos NDT (Secc. 4-8).

Ejemplo 12-1

En el ejemplo 4-6 el Si_3N_4 tuvo una resistencia a la ruptura de 930 MPa en un ensayo de flexión de tres puntos, pero sólo de 725 MPa en una de cuatro puntos. La distribución uniforme de esfuerzos entre los puntos de carga en esta última (Fig. 4-9*b*) evidenció ligeras imperfecciones que no se detectaron en el ensayo de tres puntos. Un ensayo de tensión en el mismo material dio una carga máxima de 11.3 kN en una probeta de 3.2 × 6.4 mm de sección transversal. De la ecuación (4-8), TS = 11 300/[(3.2)(6.4)] = 552 MPa. Así, el ensayo de tensión es el más crítico y el mejor para detectar defectos; sin embargo, sus resultados se alteran en gran medida debido a la flexión que se puede introducir inadvertidamente por la más ligera desalineación en el aparato de ensayo. Por lo tanto, es preferible el ensayo de flexión de cuatro puntos.

Mejora de las propiedades mecánicas Se dispone de diversas técnicas:

1. *Reducir el tamaño de la partícula.* Las propiedades de tensión y la tenacidad mejoran con la disminución del tamaño de la partícula, porque los defectos son generalmente del tamaño de los granos constituyentes; en consecuencia, las cerámicas de tamaño submicrónicos de partícula se emplean con frecuencia en aplicaciones de alta tecnología. Se obtienen mejores propiedades con partículas a *nanoescala* (< 0.1 μm).

2. *Retardar la propagación de grietas grandes.* Las grietas muy pequeñas pueden ser inevitables, pero es factible limitar el daño al incorporar características que retarden la propagación de grietas en la estructura. Esas características son más efectivas si son más pequeñas y su espaciamiento es pequeño. Hay tres metodologías posibles:

a. Incorporar partículas que sufran *transformación de fase*. Un ejemplo importante es la *circonia parcialmente estabilizada* (PSZ). La circonia tiene una estructura tetragonal a altas temperaturas, y al enfriarse se transforma en una forma monoclínica con un desastroso cambio de volumen (3.25%). Sin embargo, al agregar cantidades pequeñas de Y_2O_3, MgO o CaO es posible hornearla para obtener una estructura predominantemente cúbica. Dentro de esta matriz cúbica estable se incluyen islas pequeñas de la fase tetragonal metaestable. La presión ejercida por una propagación de grietas a través del material causa la transformación de estas islas a la forma monoclínica; algo de la energía se absorbe en la transformación y, lo más importante, la expansión del producto de la transformación pone a la matriz en compresión.

b. Incorporar *fibras* finas (fibras de grafito o de carburo de silicio con un diámetro menor a 50 μm); la grieta sigue la interfase débil y se detiene.

c. Crear intencionalmente interfases débiles que produzcan una multitud de *microgrietas* retardadoras enfrente de la grieta principal. La propagación de grietas también se puede detener incorporando partículas con dilatación térmica diferente, de manera que al enfriarse se induzca un agrietamiento muy fino; aunque estas grietas reducen la resistencia estática, evitan la propagación de otras mayores.

3. *Inducir esfuerzos residuales de compresión.* Se ha visto que es factible mejorar las propiedades de resistencia al impartir esfuerzos residuales de compresión a la superficie del componente (Secc. 4-7). En los cerámicos esto se puede lograr mediante distintas técnicas: templado (Secc. 12-5-2); reemplazo de algunos iones superficiales con iones mayores (intercambio de iones o relleno de iones, Secc. 12-5-2); formación de una superficie de baja expansión a temperaturas altas, la cual se pone luego en compresión al enfriarse (como cuando se recubren partes de Al_2O_3 con Al_2O_3-Cr_2O_3); formular el cerámico de manera que una transformación polimórfica de desplazamiento resulte en la expansión de una capa superficial; y esmerilar bajo condiciones que conduzcan a la deformación superficial.

4. *Reducir la termofluencia.* La resistencia y la dureza de los cerámicos cristalinos permanece alta cerca del punto de fusión. Sin embargo, están sujetas a la termofluencia. En los cristales únicos, ésta sólo puede ocurrir mediante un movimiento de dislocación, que puede bloquearse por partículas precipitadas. En los cerámicos policristalinos, la termofluencia implica difusión y deslizamiento de la frontera de grano; ambos se provocan en facilidad cuando hay porosidad. De ahí que la *minimización de la porosidad* sea uno de los objetivos de los procesos de manufactura. Sin embargo, si la densificación se propició por la formación de un vidrio en las fronteras de las partículas, la fluencia viscosa de este vidrio permite el deslizamiento de los granos y acelerará la termofluencia de todo el cuerpo.

Propiedades físicas Como los cerámicos enlazados de manera covalente no son muy compactos, pueden acomodar amplitudes vibratorias atómicas de mayor tamaño sin un cambio en las macrodimensiones; así, su dilatación térmica es menor que la de los metales. Algunas cerámicas policristalinas como el silicato de litio y aluminio ($LiAlSi_2O_6$) tienen cero dilatación y se pueden calentar o enfriar rápidamente sin daño alguno.

Las propiedades eléctricas (Secc. 4-9-3) de los cerámicos varían desde los conductores (grafito), pasando por semiconductores (SiC), hasta los aislantes (Al_2O_3). Muchas

cerámicas también tienen una resistencia dieléctrica alta, por lo que soportan campos eléctricos elevados sin descomponerse; lo que permite la miniaturización de capacitores. Algunos cerámicos presentan *piezoelectricidad*: un cristal sometido a carga mecánica genera una diferencia de potencial y se puede usar como transductor de fuerza; de modo inverso, una diferencia de potencial aplicada al cristal causa un cambio dimensional que se puede aprovechar como transductores ultrasónicos y generadores de potencia. La resistividad volumétrica de los materiales *piezorresistivos* cambia significativamente con la imposición de un esfuerzo. Otros cerámicos son *piroeléctricos*: desarrollan un voltaje en respuesta a una diferencia de temperatura. Las cerámicas también presentan el rango completo de propiedades magnéticas (Secc. 4-9-4). Sin cerámicos, la revolución de los dispositivos electrónicos de estado sólido hubiera sido imposible.

Los cerámicos pueden formularse para proporcionar la gama completa de *propiedades ópticas* (Secc. 4-9-6). Los cristales individuales de cerámicos enlazados iónicamente suelen ser transparentes, mientras que los cerámicos de enlace covalente pueden variar de transparentes a opacos. Las fronteras de grano y los defectos como poros y grietas, que crean superficies internas reflectantes, reducen la transparencia; sólo los cerámicos isotrópicos son transparentes en forma policristalina. Por medio de adiciones apropiadas, se puede adsorber una longitud de onda selectiva del espectro visual, dando a los cerámicos la gama más amplia de colores. El índice de refracción también es controlable; esto afecta el cambio de dirección cuando un haz de luz entra en un sólido (en el punto *B* en la figura 3-17*a*), y es muy importante en aplicaciones como en lentes o en el vidrio "cristal" decorativo.

Los tubos luminosos, las terminales de presentación de video, y la televisión a color se basan en la *fosforescencia*: los fósforos cerámicos emiten luz de una longitud de onda característica cuando se estimulan mediante una descarga eléctrica o un haz de electrones. Los láseres tienen una importancia industrial que se incrementa rápidamente (Secc. 17-5-2), algunos de los cuales utilizan una varilla monocristalina de cerámico.

Propiedades químicas Una gran ventaja de las cerámicas es que con frecuencia son resistentes al ataque químico por gases, líquidos e incluso por materiales fundidos a elevada temperatura. Ello, combinado con su extraordinaria resistencia a la alta temperatura, los hace adecuados para aplicaciones como recubrimientos resistentes a la temperatura para hornos (*refractarios*), aislantes e incluso como componentes mecánicos como discos y álabes de turbinas, así como componentes diversos para máquinas de combustión interna.

12-2 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS PARA CERÁMICAS

Ya se mencionó que algunas cerámicas se encuentran en la naturaleza y otras se manufacturan. Las materias primas naturales han predominado durante miles de años y son el material inicial para lo que ahora se describe como *cerámicas tradicionales*. La alta demanda impuesta por las aplicaciones de ingeniería condujo al desarrollo de las cerá-

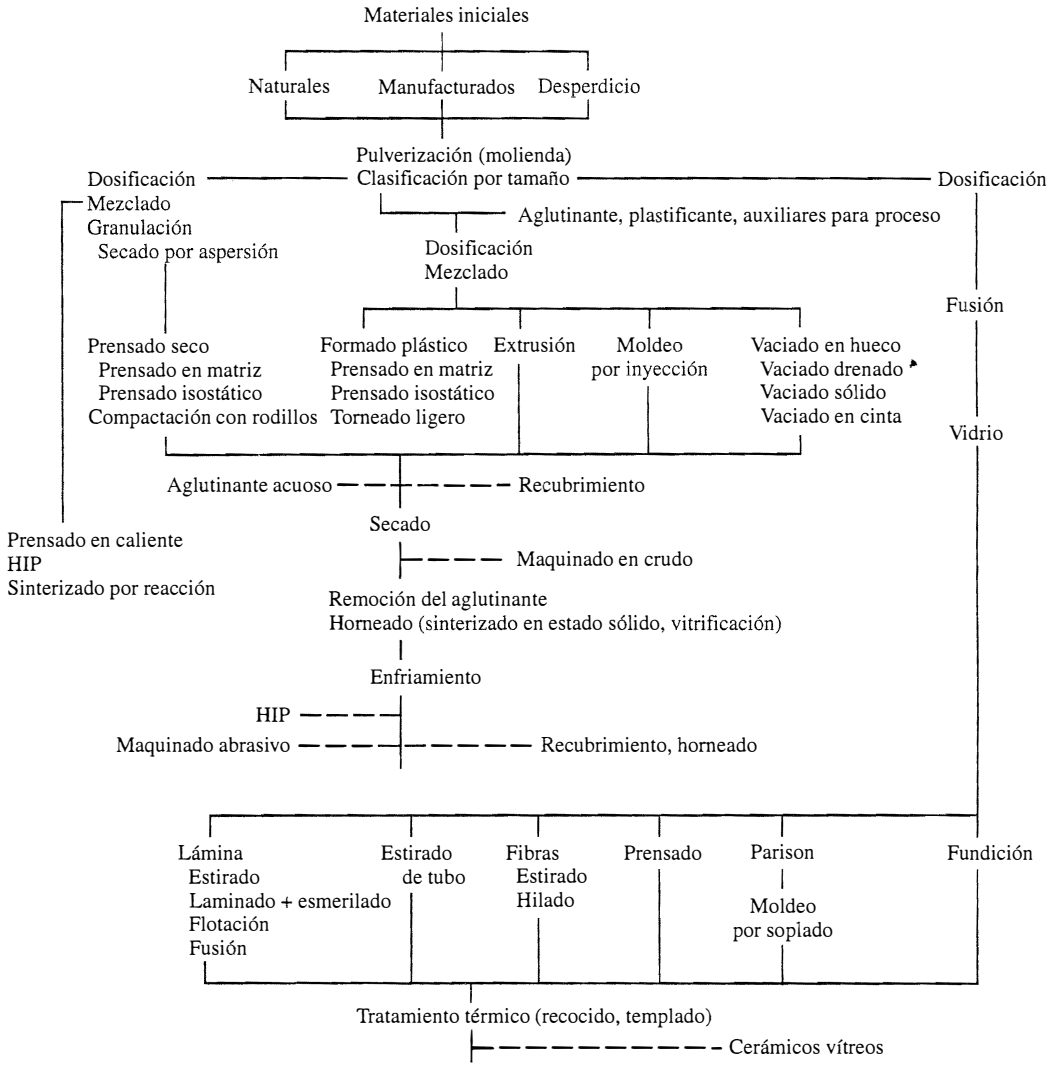


Figura 12-2 Secuencias de procesamiento en la manufactura de cerámicas. (*Adaptada de J.A. Schey, ASM Handbook, vol. 20, Materials Selection and Design, ASM International, 1997, p. 698. Se reproduce con autorización.*)

micas modernas: algunas cerámicas naturales se reemplazan por versiones manufacturadas (sintéticas) de pureza, tamaño de grano y porosidad controladas, aunque se fabrican otras que no se encuentran en la naturaleza. A las formas avanzadas de estos cerámicos normalmente se les llama *cerámicos avanzados* o *de alta tecnología* o, en Japón, *cerámicos finos*. Las rutas de procesamiento son similares para todos (Fig. 12-2).

12-3 MATERIALES CERÁMICOS

La secuencia típica del proceso para las cerámicas (Fig. 12-2) muestra que los materiales iniciales incluyen una proporción significativa de desperdicio. Éste siempre se ha reciclado, pero el costo creciente de su eliminación ha propiciado el incremento de su reúso, una vez que el cliente desecha el producto, sobre todo en la fabricación de vidrio.

12-3-1 Cerámicos naturales

Las cerámicas naturales se extraen de minas, y de minas a cielo abierto siempre es posible. Después de su pulverización (reducción en tamaño), se remueven los componentes indeseables por medio del tamizado, la separación magnética, el filtrado, o la flotación. En la *flotación*, la masa en partículas se suspende en agua, y se le agrega un agente espumante, que preferiblemente se une en alguna de las especies minerales, causando que se eleve hacia la superficie. De esta manera, ya sea el mineral deseado o las especies indeseables (*ganga*) pueden separarse en forma económica. Las cerámicas naturales usadas con mayor frecuencia son:

1. El *sílice* (SiO_2) es abundante en la naturaleza. Forma una fusión de alta viscosidad a 1 726°C. Al enfriarse, cristaliza y experimenta varias transformaciones polimórficas. Como el Si es tetravalente, forma un tetraedro con cuatro átomos de oxígeno (Fig. 12-3). Luego los tetraedros se unen en una red espacial, con cada átomo de O colocado entre dos átomos de Si, dando como resultado la razón SiO_2. La forma hexagonal se llama *cuarzo*. Los grandes monocristales que se encuentran en la naturaleza, o que se fabrican en plantas de manufactura, son valiosos porque presentan piezoelectri-

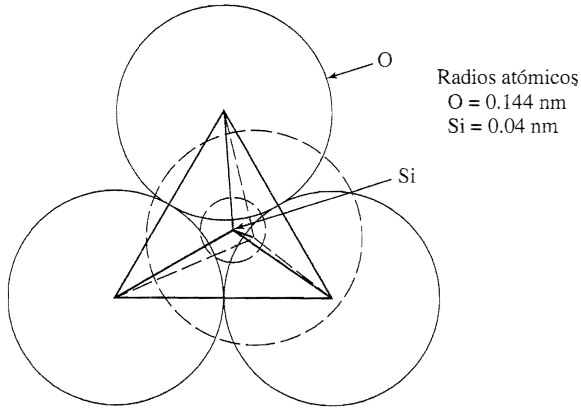


Figura 12-3 El silicio tetravalente forma un tetraedro SiO_4 con el oxígeno; las valencias restantes del oxígeno están disponibles para la formación de una red espacial de sílice, de compuestos o de vidrios.

cidad, y al rebajarlos hasta un espesor exacto, se usan para controlar la frecuencia de los osciladores.

2. Los *silicatos* se obtienen al introducir otros átomos u óxidos en la estructura de la sílice. Existe una variedad tremenda. Algunos forman cadenas o cristales fibrosos (familia de los *asbestos*). En otros, los tetraedros SiO_4 se unen en láminas, con la carga negativa de los átomos superiores de oxígeno disponible para enlazarse con otros cationes, dando origen al vasto número de *silicatos estratificados*, incluyendo talcos, micas y arcillas. En algunos minerales laminares como la mica, la exfoliación ocurre sobre distancias amplias en el mismo plano; antes del descubrimiento de los dieléctricos manufacturados, se utilizaba extensamente la lámina de mica. Ahora, ésta frecuentemente se pulveriza y luego se aglutina con vidrio para fabricar aislantes de alta precisión. También se pueden introducir iones u óxidos adicionales en la red espacial del SiO_4. Por ejemplo, al rellenar la estructura con iones de Na o Ca se obtienen los *feldespatos*. Los vidrios son redes tridimensionales en las cuales se pierde la cristalinidad.

3. Los *minerales arcillosos* constituyen la familia más importante de cerámicos naturales. Se pueden describir generalmente como aluminosilicatos hidratados de una estructura estratificada. Cada cristal estratificado consiste de varias láminas, como se muestra en el ejemplo de la celda unitaria de la kaolinita (Fig. 12-4). Cada celda unitaria está en equilibrio eléctrico, y los cristales estratificados se mantienen juntos sólo por las fuerzas relativamente débiles de van der Waals de los iones O^{--} y OH^- entre las láminas superficiales. Por lo tanto, la arcilla seca es frágil y quebradiza. La polarización débil de la superficie es suficiente para adsorber agua (*agua físicamente adsorbida*), la cual facilita el deslizamiento de las placas delgadas (aproximadamente 50 nm de espesor) entre sí, convirtiendo a la arcilla en plástica.

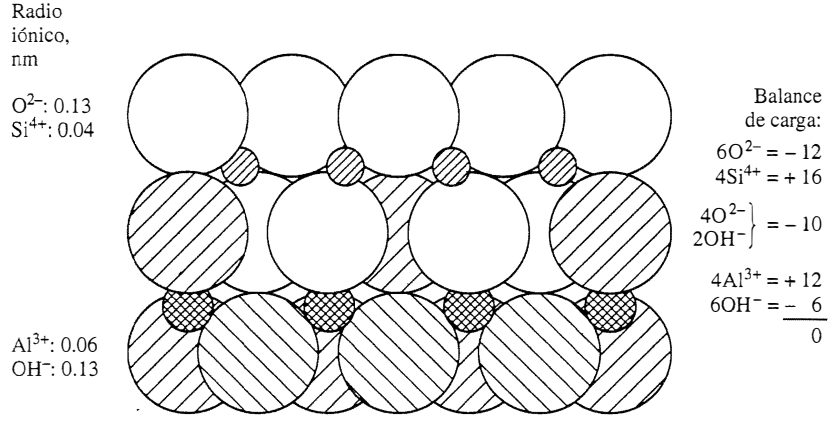


Figura 12-4 Un constituyente de la arcilla es la kaolinita; cuya fórmula química, $2(OH)_4Al_2Si_2O_5$, no revela que las capas de O^{2-}, OH^-, Al^{3+} y Si^{4+} se combinan para formar una estructura de capas que tiene carga eléctrica en equilibrio.

12-3-2 Cerámicos manufacturados

Aquí se analizan las metodologías generales para fabricar materiales iniciales; los cerámicos específicos, incluyendo el grafito y el diamante, se analizan en la sección 12-4-6.

La *síntesis de fase sólida* se basa en las reacciones a elevada temperatura. Un ejemplo de una reacción sólida-sólida es la mezcla de un aerosol de Si o SiO_2 con uno de C, para producir polvo muy fino de *carburo de silicio* (SiC). Se obtienen grandes cantidades de SiC pasando una corriente eléctrica a través de un montículo grande de coque rodeado por arena de alta pureza. El producto más puro de la reacción, localizado en el núcleo del montículo, es adecuado para aplicaciones eléctricas como elementos de calefacción de alta temperatura; el de la capa adyacente, menos puro, es adecuado para abrasivos. Un ejemplo de una reacción sólido-gas es la reacción a alta temperatura del silicio con gas nitrógeno para producir *nitruro de silicio* (Si_3N_4), un cerámico que no se encuentra en la naturaleza.

La *síntesis química* es el método para producir muchos de los cerámicos avanzados de gran pureza y homogeneidad. La *síntesis de fase líquida* produce hidróxidos, carbonatos u oxalatos de alta pureza. A partir de éstos, el óxido se obtiene por *calcinación*, una descomposición endotérmica a temperatura elevada. Las partículas pueden ser muy finas (del tamaño de submicrones) y tener un área superficial específica amplia (100 m^2/g y mayores). Las partículas más gruesas se producen a temperaturas más elevadas. La aplicación a mayor escala se realiza sobre la *alúmina* (óxido de aluminio, Al_2O_3). Ésta se encuentra en la naturaleza como corindón o como gemas monocristalinas (rubí, coloreado por iones de Cr, y zafiro), pero la mayor parte del polvo de alúmina industrial se produce por la reducción térmica del hidróxido de aluminio. Al controlar el proceso y la rapidez de enfriamiento, la cristalización y las propiedades de la alúmina se pueden ajustar para generar productos que van de los relativamente suaves a los duros. La *magnesia* (*óxido de magnesio*, MgO) también se encuentra naturalmente, pero para su uso industrial se fabrica a partir del carbonato o hidróxido.

La *síntesis de fase de vapor* por medio de PVD (deposición física de vapor) y CVD (deposición química de vapor) (Seccs. 19-6 y 19-7) está tomando mayor importancia industrial. Se fabrican muchas variedades de óxidos, carburos, nitruros, boruros y cerámicos más complejos.

Los *cementos hidráulicos* contienen silicatos de calcio y aluminatos de calcio. El cemento se pulveriza finamente y se mezcla con agua, después de lo cual ocurre la hidratación. El agua reacciona para formar, en un lapso de días, un cerámico parcialmente cristalino de resistencia sustancial. Los cementos se usan principalmente en el *concreto*, un compuesto de *agregados* (arena y grava) y cemento. Un compuesto aún más complejo se forma cuando el concreto se vuelve más resistente a los esfuerzos de tensión, por medio de la incorporación de barras de acero para refuerzo e incluso de fibras de metal, polímero o cerámico.

12-4 PROCESAMIENTO DE CERÁMICOS EN PARTÍCULAS

Los pasos básicos del procesamiento son los mismos para cerámicos y metales pero, principalmente debido a las diferencias en el tipo de enlace, también hay distinciones en las funciones de varios mecanismos.

12-4-1 Preparación de polvos

Varios pasos de procesamiento preceden a la consolidación.

Pulverización La mayoría de las cerámicas naturales se extraen de minas en trozos gruesos, y gran parte de las cerámicas manufacturadas a temperaturas elevadas se encuentran en una masa gruesa; por lo tanto, frecuentemente se necesitan algunos procesos de *pulverización* (reducción en tamaño).

1. La *trituración* en máquinas de quijadas, giratorias, de cono o de rodillos (Fig. 12-5*a*) es adecuada para las primeras etapas de la preparación.

2. El *impacto* de partículas entre dos cuerpos duros resulta en polvo más fino. Los cuerpos duros pueden tener una variedad de formas, pero siempre están hechos de un metal o cerámico elegido para evitar contaminación. En un *molino de bolas* (Fig. 12-5*b*), la energía del impacto se obtiene de esferas que caen dentro de un tambor rotatorio parcialmente lleno, de eje horizontal. Se imparte una energía mayor a las bolas y la molienda se acelera por medio de vibración (*molino vibratorio*, Fig. 12-5*c*) o por la acción de brazos horizontales colocados en una flecha vertical giratoria, dentro de un tambor de eje vertical (*molino de frotamiento*, Fig. 12-5*d*). Una acción similar se ejerce con varillas colocadas en un tambor giratorio de eje horizontal (*molino de varillas*, Fig. 12-5*e*) y por cuchillas giratorias llamadas martillos (*molino de martillos*, Fig. 12-5*f*).

3. La *molienda por impacto* produce polvo más fino aún al lanzar las partículas contra una superficie estacionaria dura, ya sea por medio de aire o de un chorro de gas o en una lechada, normalmente una suspensión acuosa (Fig. 12-5*g*). Alternativamente, las partículas arrastradas en dos corrientes fluidas opuestas se trituran por el impacto de una con otra (*molienda de energía fluida*, Fig. 12-5*h*).

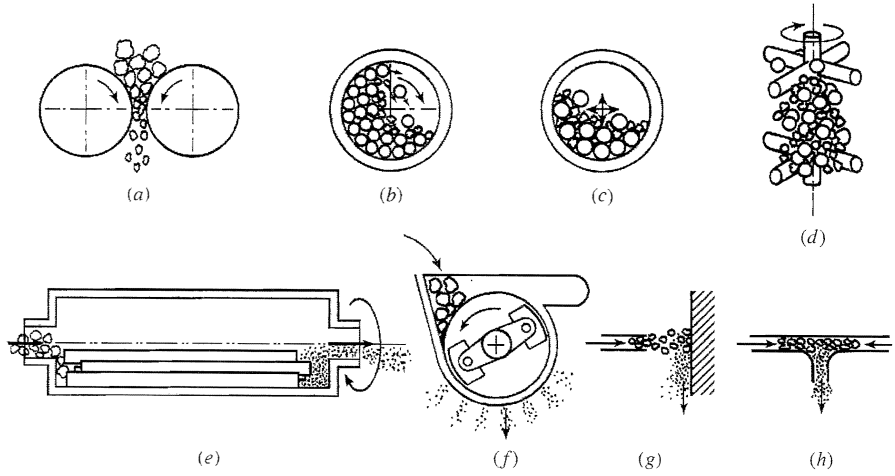


Figura 12-5 El material en partículas se puede pulverizar (reducir a un tamaño menor) por medio de muchas técnicas, algunas de las cuales son: (*a*) la trituración con rodillos; (*b*) la molienda con bolas; (*c*) la molienda vibratoria con bolas; (*d*) la molienda por frotamiento; (*e*) la molienda con varillas; (*f*) la molienda con martillos; (*g*) la molienda por impacto, y (*h*) la molienda con energía de fluido.

Un polvo es granular cuando el tamaño de partícula es mayor de 44 μm (tamizado por la malla núm. 325). Cuando el tamaño de partícula ha disminuido hasta cierto valor (por lo regular, a menos de 1 μm), las fuerzas secundarias de enlace (van der Waals) conducen a la *aglomeración*, es decir, a la formación de agrupamientos mayores de partículas. La aglomeración no controlada es indeseable y se puede evitar con aditivos apropiados. En la molienda húmeda hay químicos que imparten una carga eléctrica a la superficie de las partículas, por lo que éstas se repelen unas a otras. Así la *floculación* (formación de masas indefinidas imprecisamente enlazadas) se evita mediante estos *defloculantes*.

Dimensionamiento La distribución del tamaño, la forma, el área superficial específica y las propiedades físicas de la partícula se determinan a través de los métodos descritos para los polvos de metales (Secc. 11-2-2). Los cerámicos naturales y muchos manufacturados son angulares y las fracciones de tamaño se separan rápidamente por medio del *cribado*. Las partículas finas se pueden separar de nuevo por medio de las técnicas de clasificación descritas en la sección 11-2-3.

Granulación Los polvos producidos por reacción en fase de vapor o a partir de precursores químicos son muy finos y puede requerirse formar *agregados* duros para hacer más fácil su procesado. Con frecuencia se emplean el secado por aspersión y la granulación (Secc. 11-2-3). Un proceso relacionado es el *secado por congelación*, en el cual una solución de agua de sal se atomiza, las gotitas se congelan rápidamente, el agua se *sublima* (evaporada sin descongelarse) y el polvo seco resultante se calcina para descomponer las sales cristalinas y obtener el cerámico en forma de polvo puro y seco. Debido a las cortas trayectorias de la difusión en las gotitas finas, esas partículas son homogéneas y su tamaño se puede controlar muy bien.

Dosificación y mezclado Muchos cerámicos se mezclan con otros cerámicos, aglutinantes, lubricantes y demás auxiliares de procesamiento. Los *aglutinantes* son sustancias que proporcionan resistencia temporal al compacto crudo y se deben *plastificar* para hacer posible la consolidación. Los aglutinantes inorgánicos (arcillas, silicatos, fosfatos, etcétera) se plastifican comúnmente con agua. Los aglutinantes orgánicos (polímeros, ceras, gomas, almidones, etcétera) se plastifican con solventes orgánicos de bajo peso molecular, o si son compatibles, con agua. Los *plastificantes* se agregan durante la trituración, tamizado fino, clasificación, o en un proceso separado de mezclado. Si se controlan las proporciones de los distintos constituyentes, se obtiene la consistencia adecuada para el formado subsiguiente. El mezclado profundo es esencial. Cuando el polvo se va a transformar en lechada, se agregan defloculantes y otros químicos para asegurar características reológicas favorables. Las propiedades de prensado y la contracción también se pueden controlar al agregar cerámicos presinterizados triturados al cuerpo en partículas.

12-4-2 Consolidación de polvos cerámicos

Además de las técnicas descritas en la sección 11-3, existen procesos particularmente adecuados para los cerámicos.

Prensado seco Los cerámicos secos por aspersión con tamaño de partícula muy controlado (por lo general, de 20 a 200 μm) se consolidan con técnicas familiares provenientes de la metalurgia de polvos. El *prensado en frío* en matrices de metal (Figs. 11-5 y 11-6) requiere presiones de 20 a 300 MPa, tolerancias estrictas de la matriz (< 50 μm) y, debido al carácter abrasivo de los cerámicos, matrices bastante costosas; sin embargo, permite la producción en masa de piezas con tolerancias cerradas (por lo general, ±1%). De esta manera se prensan decenas de millones de aislantes de bujías, dieléctricos para capacitores cerámicos, substratos de circuitos y recintos, algunas veces hasta con un espesor menor a 1 mm. Los lubricantes y los aglutinantes se utilizan según se requiera. El *prensado isostático* por medio del método de la bolsa húmeda (Fig. 11-7*a*) es lento y requiere mucha mano de obra, pero es adecuado para la producción en bajas cantidades y de prototipos, con presiones de hasta 500 MPa. Las tolerancias son amplias (±3%) y normalmente la pieza requiere de maquinado en crudo. El molde de caucho permanece en el recipiente a presión en el método de la bolsa seca (Fig. 11-7*b*); así, la rapidez de producción es alta y el proceso se puede automatizar. Con un mandril de metal es posible fabricar piezas huecas. Las presiones son comúnmente de 200 MPa. La *compactación con rodillos* se practica para sustratos de película gruesa.

Prensado húmedo Si se agrega más líquido, el cerámico se comporta como un seudoplástico o cuerpo de Bingham (Fig. 7-5*b*, líneas *C* y *D*); es deformable pero soporta su propio peso. De esta manera se puede procesar por medio de las técnicas empleadas para los metales y polímeros.

1. La *extrusión* con un émbolo (Fig. 9-28) suele hacerse pero la extrusión por tornillo (véase la Secc. 14-3-2) asegura un mejor mezclado de los constituyentes y permite la operación continua. Las matrices son ahusadas (Fig. 9-28*b*) y el ángulo de la matriz se elige para evitar el defecto de estallido central (Fig. 9-33). Como las corrientes divididas se pueden reunir, también es factible extruir tubos huecos y filtros con agujeros múltiples con matrices del tipo puente (araña) (Fig. 9-30*c*). El mayor contenido de agua o de portador orgánico resulta en una contracción mayor y en tolerancias menos cerradas (±2%).

2. El *moldeo por inyección* a presiones de 200 MPa está adquiriendo importancia para cerámicos de alta tecnología. El *moldeo por compresión* y el *moldeo por transferencia* están relacionados con las técnicas similares para el procesamiento de polímeros (véase la Secc. 14-3-4).

3. El *torneado ligero* es la versión mecanizada del torno de alfarero. Se crean formas huecas, placas, etc., presionando la masa plástica contra un molde giratorio con eje vertical usando plantillas o rodillos apropiadamente formados y perfilados. En este aspecto, el proceso se parece al rechazado (Secc. 10-9).

Vaciado Cuando se agrega suficiente líquido para permitir el flujo viscoso (Fig. 7-5*b*, línea *A*), es posible el vaciado. La suspensión se denomina *acuosa* o *pasta*. Una suspensión de partículas menores (menos de 20 μm) presenta flujo viscoso no newtoniano. Los defloculantes y dispersantes, combinados con el control de la acidez (pH) se usan para evitar la floculación de las partículas finas (por lo general < 5 μm). Normalmente,

las suspensiones acuosas con una concentración sólida dada tienen una viscosidad mínima para un valor pH específico. Las suspensiones acuosas de polvo muy fino (< 1 μm) tienden a dilatarse (Fig. 7-5*b*, línea *B*) y son más difíciles de manejar. El alto contenido de líquido contribuye a una contracción grande y las tolerancias son muy amplias, excepto cuando la pieza es de forma sencilla, como en el vaciado de cinta de sustratos cerámicos para circuitos electrónicos (véase más adelante).

Se pueden aplicar las técnicas familiares para la fundición (Secc. 7-5). La diferencia es que el molde regularmente es poroso, para que el fluido de la pasta sea absorbido por acción capilar, dejando atrás un polvo compacto. Para fabricar el molde, se agrega agua a yeso ($CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$); ocurre una reacción de hidratación que resulta en la precipitación de yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) en forma de cristales aciculares, configurados en una red orientada aleatoriamente. El exceso de agua (atrapada) se retira secando el molde. El resultado es un molde con estructura sólida con poros de diámetro menor a 1 μm. Normalmente se aplican agentes desmoldantes en la superficie del molde, y luego se vacía la pasta.

1. Para producir un *vaciado sólido*, la cavidad del molde se debe rebosar con la suspensión acuosa hasta que se llene con un cuerpo de polvo. El vacío ayuda al llenado del molde y acelera el proceso de extracción del líquido. El centrifugado también ayuda al llenado (Fig. 7-26).

2. El *vaciado en hueco* es la variante que se usa con más frecuencia. Es análogo de la fundición hueca (Secc. 7-5-6): el molde se llena con la suspensión acuosa; después que ha transcurrido un tiempo suficiente para formar una concha en partículas deshidratada, el molde se voltea para vaciar el exceso de suspensión, dejando atrás un producto hueco.

3. El *vaciado de cinta* es una variante importante del vaciado de pasta. Se forman cintas delgadas (de 0.025 a 1.5 mm de espesor), normalmente con aglutinantes orgánicos, por medio de varias técnicas: la pasta se puede vaciar como una película plástica delgada en movimiento, mientras que el espesor de la cinta se controla con un rasero; la pasta se puede vaciar en un portador de papel, que se quema posteriormente (*proceso papel-cinta*). La cinta cruda obtenida a través de estos procesos es lo suficientemente flexible para enrollarse. Se puede procesar en piezas brutas, rayar mecánicamente o marcar con un haz de láser antes de hornearla, de manera que es factible fabricar componentes pequeños como sustratos para dispositivos de película delgada (Secc. 20-4-1).

12-4-3 Secado y maquinado en crudo

El agua libre con frecuencia se reduce reposando el crudo a temperatura ambiente. Una etapa inicial de calentamiento a baja temperatura (*secado*) es muy importante cuando el *agua físicamente adsorbida* (también llamada *agua mecánica*) debe recorrer distancias amplias para alcanzar la superficie. La humedad atrapada en el centro explotaría el compacto. Las partes vaciadas en hueco y las extruidas se contraen de 3 a 12% (sin contracción de las partes prensadas en seco). Los aglutinantes orgánicos se expulsan (con contracción acompañante) y se queman para evitar la decoloración del cerámico.

Aunque la resistencia de los compactos crudos es baja, se pueden maquinar, normalmente en tornos verticales, si se sujetan con aditamentos adecuados. Debido que se permite que el compacto se contraiga por secado antes del maquinado, es posible crear partes muy complejas con tolerancias muy cerradas, como en la manufactura de aislantes eléctricos para alta tensión fabricados de porcelana.

12-4-4 Sinterizado

Durante el sinterizado (*horneado*) de cerámicos, distintos fenómenos suceden cuando se eleva la temperatura:

1. El agua contenida en forma de *agua de cristalización* (también llamada *agua químicamente enlazada*) se elimina a temperaturas relativamente bajas (entre 350 y 600°C). En los cerámicos arcillosos también ocurre la *deshidroxilación* (descomposición de los grupos hidroxi-). En algunos casos, las sales no se calcinan antes de la compactación, y entonces la conversión a óxidos debe ocurrir durante el calentamiento a temperaturas de sinterizado. Por todas estas razones, la rapidez de calentamiento es lenta y es probable que la temperatura deba mantenerse por un periodo considerable.

2. A temperaturas aún más elevadas, comienza el *sinterizado*:

a. En los cerámicos de un solo componente (como óxidos, boruros y carburos) domina el crecimiento difusional de puentes (Fig. 11-8). En el calentamiento prolongado tiene lugar el crecimiento de grano igual que en los metales. Pueden ocurrir transformaciones polimórficas, pero el cambio dimensional se acomoda en el cerámico parcialmente sinterizado.

b. En los diversos cerámicos formulados con más de un componente, ocurren reacciones entre las partículas adyacentes. La difusión de fase sólida puede conducir a la formación de soluciones sólidas y de otras fases, como lo dicta el diagrama de fase. También pueden ocurrir diversas transformaciones.

c. Algo más importante es la formación de fases líquidas a temperaturas mayores, que ayudan a la densificación pero también incrementan el riesgo de crecimiento de grano. Las cantidades relativas de líquidos se pueden estimar por medio de los diagramas de fase. Igual que los elementos menores que forman eutécticos de bajo punto de fusión en los metales conducen a la fragilidad en caliente, los contaminantes menores que forman fases de bajo punto de fusión en los cerámicos afectan la resistencia en caliente.

d. En algunos sistemas, un líquido está presente pero se ocupa en reacciones posteriores; ese *sinterizado con líquido reactivo* a menudo produce productos con muy buenas propiedades de alta temperatura porque la fase vítrea está ausente.

e. El tamaño de partícula muy fino de los cerámicos de alta tecnología contribuye a las trayectorias cortas de difusión y permite el sinterizado a temperaturas significativamente menores, evitando así el crecimiento de grano que reduciría su resistencia.

f. En el *sinterizado por reacción* se forma o se introduce un gas reactivo para cambiar la química (por ejemplo, el polvo de Si se hace reaccionar con nitrógeno para

producir Si_3N_4 enlazado por reacción). La porosidad es alta pero la estabilidad dimensional es buena.

En la mayor parte de los casos hay una contracción significativa (de 35 a 45%) durante el sinterizado.

3. Después de que se completa el sinterizado, el cerámico se *enfría* a temperatura ambiente a una rapidez muy controlada. En los cerámicos que contienen una fase vítrea, la rapidez de enfriamiento determina el grado de cristalización. Los cerámicos con alta dilatación térmica podrían fracturarse al enfriarse repentinamente. Las transformaciones polimórficas también pueden ocurrir y el consecuente cambio de volumen resulta en microagrietamiento.

La necesidad de calentamiento y enfriamiento lentos contribuye a largos tiempos de ciclo (días o incluso semanas), aunque el sinterizado en sí es muy rápido. Los hornos son fuentes potenciales de contaminantes del aire. El proceso se realiza para generar el mínimo de polvo, pero los gases indeseables (o controlados) y los gases de combustión se filtran a través de un equipo efectivo de precipitación del polvo y de tratamiento de gases para minimizar los contaminantes peligrosos del aire (HPA).

12-4-5 Compactación en caliente

Se obtienen propiedades excelentes consolidando a alta temperatura.

Prensado en caliente El polvo fino (< 0.1 μm) se puede prensar en caliente a presiones de 7 a 70 MPa, usando matrices de grafito respaldadas por cerámicos. Es factible mantener las temperaturas más bajas que en el sinterizado estático, ya que la aplicación simultánea de la presión ayuda a la densificación. Así, junto con la exposición corta a alta temperatura, se permite la producción de cerámicas de grano fino (*microcristalinas*) de alta resistencia. De esta manera, la técnica encuentra amplia aplicación para componentes cerámicos estructurales de alta tecnología, pero las formas se limitan severamente por la disminución de la presión con la distancia.

HIP Muchas restricciones de forma se eliminan aplicando una presión de gas de 70 a 200 MPa a los cerámicos encapsulados. Algunas veces la pieza se consolida dentro de un envoltorio de vidrio de metal fundido (*compactación omnidireccional rápida*). La HIP a presiones de únicamente 0.1 a 10 MPa se usa para densificar completamente cerámicos presinterizados hasta una densidad de 92 a 96%; para ello no se necesita encapsulado.

Formado superplástico Los cerámicos nanocristalinos presentan superplasticidad a altas temperaturas, donde los granos pueden deslizarse entre sí, permitiendo que se formen piezas de alta precisión.

La mayoría de los cerámicos se sinterizan (hornean) hasta las dimensiones finales. Sin embargo, en algunas aplicaciones críticas la superficie del cuerpo sinterizado se rectifica con un cerámico aún más duro para mejorar el acabado superficial, las tolerancias dimensionales, o para impartir una forma más compleja.

Ejemplo 12-2

Un bloque de grafito (densidad: 1.9 g/cm^3) tiene una longitud de 36.34 mm, un ancho de 24.28 mm, y una altura de 12.70 mm. Su peso seco es 18.878 g. Cuando se pesa en ftalato dietílico (densidad: 1.120 g/cm^3), su peso es 6.919 g. Luego se pesa de nuevo (saturado con el fluido), y se determina que pesa 19.235 g. Calcule (*a*) el volumen real, (*b*) el volumen total; la porosidad (*c*) abierta, cerrada y total, y (*d*) la densidad volumétrica y la aparente.

(*a*) Volumen total = peso seco/densidad = 18.878/1.9 = 9.936 cm^3.

(*b*) Volumen total, de la geometría: (36.34)(24.68)(12.7) = 11.390 cm^3. A menudo la parte es de forma irregular y se puede emplear el principio de Arquímedes:

Fluido desplazado por el bloque saturado de fluido = 19.235 – 6.919 = 12.316 g.

Como la densidad del fluido es 1.120 g/cm^3, el bloque desplaza 12.316/1.120 = 10.996 cm^3 de fluido. Éste es el volumen total, incluyendo la porosidad cerrada.

(*c*) Porosidad total = (vol. total – vol. real)/vol. total = (11.390 – 9.936)/11.390 = 0.12766 o 12.766%. La porosidad abierta (o aparente) = vol. absorbido del fluido/vol. total = (peso saturado – peso seco)/(densidad del fluido)(vol. total) = (19.235 – 18.878)/(1.120)(11.390) = 0.027985 o 2.80%. Porosidad cerrada = porosidad total – porosidad abierta = 0.12766 – 0.027985 = 0.099675 o 9.968%.

(*d*) Densidad volumétrica = masa/vol. total = 18.878 g/11.390 cm^3 = 1.657 g/cm^3 (como el grafito y el fluido se pesan en el mismo campo gravitacional, el peso es una medición directa de la masa).

Densidad aparente = masa/(vol. total – vol. de poros abiertos) = (18.878 g)/(11.390 cm^3)(1 – 0.027985) = 1.705 g/cm^3.

Compruebe el cálculo: densidad = masa/(vol. total – vol. de poros abiertos) = 18.878/(11.390)(1 – 0.027985 – 0.099675) = 1.9 g/cm^3.

Compruebe la exactitud de las mediciones: volumen del cuerpo = vol. real + porosidad encerrada = 9.936 + (11.390)(0.099675) = 11.0713 cm^3, de acuerdo con los 10.996 cm^3 determinados en el inciso (*b*).

12-4-6 Aplicaciones

Los materiales cerámicos se utilizan en todas las fases de nuestra vida. Aquí el énfasis será en las aplicaciones técnicas.

Cerámicos con base de arcilla Algunos productos se hacen con arcillas naturales. Las arcillas con contenido alto de SiO_2 (de 60 a 80%) y bajo de Al_2O_3 (de 5 a 20%) se prensan para formar ladrillos y baldosas, y se hornean a una temperatura de entre 900 y 1 000°C hasta obtener una condición porosa pero razonablemente fuerte.

Todos los demás materiales cerámicos con base de arcilla se hacen de mezclas de composición controlada. Como se usan tres componentes, cuarzo (pedernal), arcilla y feldespato (aluminosilicatos de K, Na y Ca), se habla de *cuerpos triaxiales*. Los feldespatos reducen la temperatura de horneado al incrementar la cantidad de eutéctico fundido. Las proporciones dependen del campo de aplicación (Fig. 12-6). La *alfarería* o *loza de barro* sólo se hornea una vez, a una temperatura de entre 1 150 y 1 280°C, hasta obtener un cuerpo ligeramente poroso. El *gres* se hornea a una temperatura de entre 1 200 y 1 300°C para lograr cuerpos densos. Los *artículos vitrificados de porcelana* para accesorios para baño normalmente se vacían en hueco y se recubren con un barniz antes de hornearlos a 1 260°C. Las baldosas de piso prensadas en seco y las porcelanas

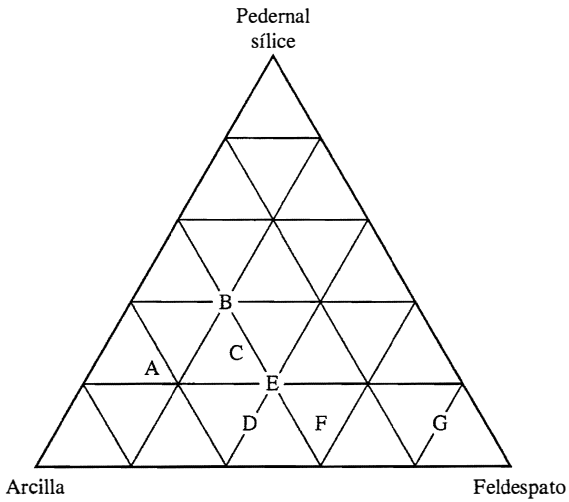


Figura 12-6 Las cerámicas tradicionales a menudo son cuerpos triaxiales. A: azulejo; B: loza semivítrea; C: porcelana dura; D: loza vítrea; E: porcelana eléctrica; F: baldosas; G: porcelana dental.

eléctricas torneadas también se barnizan y luego se hornean a 1 290°C. La mayor parte de los artículos de porcelana restantes, como las vajillas semivitrificadas y la porcelana dura, se hornean dos veces. El *horneado de bizcocho* o primer horneado sinteriza en líquido al cuerpo, haciéndolo translúcido pero a costa de una resistencia y una resistividad eléctrica menores; después de enfriarse, se aplica el esmalte y luego se funde éste en el *horneado de barniz* o segundo horneado.

Refractarios Igual que los metales refractarios, los cerámicos refractarios son notables por su resistencia a temperaturas elevadas. Se formulan para resistir condiciones específicas de fusión y atmosféricas. De esta manera pueden ser ácidos (basados en SiO_2), neutros (Al_2O_3), de mulita $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ o de cromita $FeO \cdot Cr_2O_3$), o básicos (magnesita MgO, dolomita Ca–Mg–O). Las partículas mayores de la mezcla comúnmente están embebidas en una matriz cerámica más fina para fabricar ladrillos. Los hogares para horno construidos *in situ* se fabrican de gránulos refractarios aglutinados con cemento. Algunos refractarios se funden y vacían para darles forma. Los polvos y bloques porosos refractarios sirven como aislantes térmicos en aplicaciones de alta temperatura.

Cerámicos de óxido Los cerámicos de grano fino de un solo óxido pueden tener resistencia elevada. El más difundido es la *alúmina*, Al_2O_3 (punto de fusión 2 054°C), que se sinteriza para fabricar brocas para herramientas de corte, aisladores para bujías, tubos para alta temperatura, crisoles para fusión, componentes de desgaste y sustratos para circuitos y resistencias electrónicos. Adiciones pequeñas de MgO permanecen concentradas en las fronteras de grano, facilitando la densificación y evitando el crecimiento de grano. El material de grano más fino se obtiene por medio del prensado en

caliente. La *circonia*, ZrO_2 (punto de fusión 2 710°C) es más resistente al calor pero, como ya se indicó, sufre una transformación polimórfica con un catastrófico cambio volumétrico. Se obtiene una solución sólida cúbica estable agregando de 5 a 15% de Y_2O_3 o CaO, y esa *circonia estabilizada* es útil hasta 2 400°C como revestimiento para horno, y como elemento de calefacción por arriba de 1 000°C. La circonia parcialmente estabilizada se emplea como matriz para la extrusión de metales en caliente.

Cerámicos de óxidos complejos Muchos de los cerámicos manufacturados más importantes consisten en combinaciones cuidadosamente controladas de diversos óxidos.

1. En el sistema $MgO–Al_2O_3–SiO_2$ hay varias composiciones adecuadas para aplicaciones eléctricas y electrónicas. Por ejemplo, las *esteatitas* se utilizan como aislantes en circuitos de alta frecuencia.

2. Las *ferritas* generalmente se componen de un óxido metálico MeO (donde Me puede ser cualquier metal bivalente) y Fe_2O_3. Para evitar una confusión con la ferrita de los hierros y aceros (Secc. 6-2-1), también se usa el término *ferroespinela*. Las ferritas son parte de dos grupos mayores:

a. La estructura de las ferritas $MeFe_2O_4$ (donde Me puede ser Ni, Mn, Mg, Zn, Cu o Co) es cúbica, la misma que la del mineral espinela ($MgAl_2O_4$ o $MgO \cdot Al_2O_3$). Tienen una histéresis magnética baja combinada con una resistencia eléctrica alta, de ahí que las pérdidas debidas a las corrientes parásitas sean bajas. Crean excelentes núcleos para aplicaciones de alta frecuencia en radios, televisión y cabezas de grabación. En forma de polvo, se pueden depositar en un sustrato aislante (plástico) para proporcionar medios de grabación magnética. Las ferritas de granate de tierras raras, depositadas en un sustrato no magnético, sirven como memoria de burbuja.

b. Las ferritas más complejas, especialmente las de Ba, Sr y Pb, tienen una estructura hexagonal. Combinan alta resistividad con una fuerza coercitiva elevada por lo que son excelentes imanes de bajo costo para altavoces, motores pequeños (como los que se usan también en automóviles) y con polímeros, como sellos elastoméricos magnéticos (empleados en las puertas de los refrigeradores).

3. Los *superconductores de alta temperatura* se basan en óxidos de cobre, como el $(Bi,Pb)_2 Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$. Tienen aplicaciones como películas delgadas o alambre recubierto en plata (Secc. 15-5), el cual es capaz de transportar altas densidades de corriente a la temperatura del nitrógeno líquido (77 K).

4. Los *titanatos* contienen TiO_2. El más importante es el $BeTiO_3$, que tiene una constante dieléctrica alta que lo hace adecuado para capacitores. También presenta *ferroelectricidad* (alineación espontánea de dipolos eléctricos), y debido a la anisotropía de sus propiedades, piezoelectricidad.

Carburos, nitruros, boruros y siliciuros Estos cerámicos son notables por su alta dureza (véase la tabla 16-3).

Los *carburos* tienen el punto de fusión más elevado de todas las sustancias; un cerámico 80TaC-20HfC tiene un punto de fusión de 4 050°C. El carburo de silicio (SiC) es difícil de sinterizar, pero los cuerpos sólidos de SiC, como los elementos de alta

temperatura de calentamiento por resistencia, las toberas para cohetes y toberas para trabajo por chorro de arena, se pueden obtener mediante el sinterizado a presión o por reacción. Los crisoles de fusión se hacen con un aglutinante de arcilla. El polvo es uno de los abrasivos más importantes para esmerilar (Secc. 16-8-3). El extremadamente duro B_4C se usa como polvo abrasivo y, en una forma sinterizada, para partes resistentes al desgaste y en protección corporal antibalas. Otros carburos son importantes como recubrimientos (Cap. 19) y como carburos cementados.

Los *nitruros* tienen puntos de fusión sólo ligeramente menores que los de los carburos. Una forma del nitruro de boro (BN) es hexagonal (también llamado *grafito blanco*). Se puede emplear como lubricante de alta temperatura; también es un buen aislante y se puede procesar en cuerpos grandes. La forma cúbica (CBN) tiene una estructura similar a la del diamante y es, después de éste, el material más duro, por lo que resulta adecuado para herramientas para corte de metales.

El *nitruro de silicio* (Si_3N_4) tiene una buena conductividad térmica, baja dilatación y alta resistencia al calor, lo que lo convierte en el primer candidato para componentes cerámicos de motores, discos para turbinas y toberas para cohetes. Se puede procesar a través del prensado en caliente, del aglutinamiento por reacción, por deposición de vapor y por moldeo por inyección. Los *oxinitruros* (nombre comercial: sialon, de Si–Al–O–N) tienen mejor resistencia a la oxidación y se utilizan como herramientas para corte y pernos para soldadura.

Los *boruros* (TiB_2, ZrB_2, CrB y CrB_2) tienen puntos de fusión elevados, y una gran resistencia a la oxidación; se usan como álabes para turbinas, toberas para cohetes y revestimientos de cámaras de combustión.

El *disiliciuro de molibdeno* ($MoSi_2$) tiene alta resistencia a la oxidación y sirve como elemento de calentamiento.

Carbono Puede ser amorfo (negro de humo), pero las formas más importantes para la industria son cristalinas.

El *grafito*, de estructura hexagonal, se encuentra en la naturaleza. La adsorción de fluidos volátiles o de gases reduce la resistencia de enlace en la dirección *c* (Fig. 6-2*c*), permitiendo el deslizamiento a lo largo del plano basal; por lo tanto, el grafito es un buen lubricante sólido hasta los 1 000°C (aunque comienza a oxidarse a 500°C). Mezclado con arcilla, forma la "mina" de los lápices. Los cuerpos sólidos técnicamente importantes están hechos de coque, constituidos en su forma final con un aglutinante de betún o resina, y convertidos en grafito por arriba de 2 500°C. Es un buen conductor eléctrico, tiene baja dilatación térmica, y resiste temperaturas elevadas; de ahí que se use para elementos de calentamiento, electrodos, electrodos EDM (Secc. 17-4), matrices para compactación y crisoles. El grafito de alta pureza se emplea para moderadores y reflectores en plantas nucleoeléctricas.

Las *fibras de grafito* se producen mediante la conversión de una fibra de polímero, como el poliacrilonitrilo. Manteniendo la fibra bajo tensión a 2 500°C, se obtienen fibras de grafito orientado con un diámetro aproximado de 10 μm, con resistencias entre 2.0 y 3.5 GPa (el módulo elástico de la fibra más débil es mayor, 400 GPa, comparado con el de 200 GPa de la fibra más resistente, véase la tabla 15-1).

El *diamante* está enlazado de manera covalente en su totalidad en una estructura cúbica (Fig. 12-1*a*), es un aislante, y es el material más duro conocido. Los diamantes

naturales se utilizan en aplicaciones de resistencia al desgaste como matrices para trefilado de alambre, herramientas de corte y ruedas abrasivas. Se pueden fabricar cristales de diamante pequeños pero relativamente libres de defectos a partir de carbono, a presiones y temperaturas elevadas; el diamante manufacturado supera al natural en muchas aplicaciones. Se puede sinterizar para producir cuerpos policristalinos (*megadiamantes*) o capas de 0.5 a 1.5 mm de espesor en un sustrato más tenaz, como el carburo cementado.

Los *fullerenos* son los miembros más nuevos de la familia del carbono (véase la Secc. 20-5-2). El C_{60} en forma de balón de fútbol es el que más se investiga.

12-4-7 Capacidades del proceso y aspectos del diseño

La elección de los procesos cerámicos (tabla 12-1) se realiza en gran medida de acuerdo con la forma de la parte.

Las piezas para prensado seco están diseñadas mediante las reglas dadas para las partes convencionales de metalurgia de polvos (Secc. 11-7, Fig. 11-12). Las tolerancias son buenas, en el rango de ±1 %. La siguiente libertad amplia se obtiene a través de moldes flexibles de compactación isostática, los cuales permiten cortes sesgados o ahusados invertidos. La profundidad de los cortes sesgados está limitada por la necesidad de retirar la pieza del molde elastomérico; las tolerancias son más amplias (±3%) y los agujeros transversales no son posibles. El prensado en caliente está restringido a formas simples por la dificultad de manipular las matrices a temperaturas muy elevadas. El formado plástico (torneado ligero, prensado) se concreta únicamente a la necesidad de liberar la pieza del molde rígido. Por la naturaleza del proceso, la compactación y la extrusión con rodillos son adecuadas sólo para formas bidimensionales.

El moldeo por inyección está sujeto a las reglas de la fundición en matriz (Secc. 7-8-2). El vaciado en hueco es el proceso más versátil y se pueden crear cualesquiera formas (incluyendo las huecas y las sesgadas), a condición que se puedan liberar del molde. Es posible unir varias piezas moldeadas separadamente y asegurar la virtual desaparición de la junta durante el sinterizado. Basta con pensar en las figurillas complejas, cuya producción en masa es de bajo costo, hechas de porcelana y otros cerámicos, para darse cuenta del potencial del proceso. Las tolerancias son relativamente amplias (±3%).

Las limitaciones se derivan en parte por la capacidad del equipo común, y en parte por las dificultades del procesamiento: la remoción de los aglutinantes del cuerpo crudo, así como la prevención del desarrollo de esfuerzos peligrosos durante el horneado y durante el enfriamiento en piezas de pared gruesa. La elección del proceso también está en función de las tolerancias obtenibles (tabla 12-1).

12-5 VIDRIOS

Ya se puntualizó que los vidrios son, por definición, cerámicos, los cuales difieren de otros cerámicos en que se producen mediante el procesamiento del material fundido.

Tabla 12-1 Características generales de los procesos de manufactura de cerámicos*

	Proceso							
Características	**Prensado en seco**	**Prensado isostático**	**Prensado en caliente**	**Compactación con rodillos**	**Extrusión**	**Formado plástico**	**Vaciado en hueco**	**Moldeo por inyección**
Pieza								
Forma†	No S3, T2, 3, 5, 6, F3, 5 U	No T3, 5, F5	R0, B0, F0, 4	R0, B0, S0, F0	Todo 0	No T3, 5, 6, F5	Todo	No T5, F5, U2, 4
Detalle superficial‡	A-B	B-D	C	A	A	A-B	A-B	A-B
Masa, kg	0.05-30	0.1-100 bolsa húmeda 0.1-50 bolsa seca	0.01-100	no limitada	no limitada	0.02-30	0.05-200	0.02-3
Sección mín, mm	1	1	1	0.02	0.2	1.5	0.2	1
Tolerancia‡	A-B	B-D	B-C	A-B	C	C	D-E	A-B
Costo‡								
Equipo	A-C	A-B	A	A	A	C-E	C-E	A-B
Matriz	A-B	C-E	B-C	A-B	A-C	C-E	B-C	A-B
Mano de Obra	C-E	A-C bolsa húmeda C-E bolsa seca	B-D	D-E	D-E	B-E	C-D	D-E
Acabado	C-E	B-D	B-D	D-E	D-E	C-E	B-D	C-E
Producción								
Habilidad del operador‡	D-E	B-C bolsa húmeda C-E bolsa seca	C-E	D-E	D-E	D-E	D-E	D-E
Tiempo de entrega	Semanas-meses	Semanas	Semanas-meses	Semanas-meses	Semanas	Semanas	Semanas	Semanas-meses
Rapidez (pieza/h)	1 000-10 000	1-10 bolsa húmeda 50-1 000 bolsa seca	10-100	continua	continua	10-100	1-100	100-1 000
Cantidad mín.	1 000-50 000	1-10	10-1 000			1 000-50 000	1-100	10 000

* Adaptada de J.A. Schey, *ASM Handbook*, vol. 20, *Materials Selection and Design*, ASM International, 1997, p. 697. Se reproduce con autorización.

† De la figura 3-1.

‡ Clasificaciones comparativas, donde A indica el mayor valor de la variable y E el menor. Por ejemplo, el prensado en seco produce buen acabado superficial y buenas tolerancias, implica un costo del equipo de medio a alto, un costo de la matriz de alto a muy alto, un costo de mano de obra de medio a bajo, un costo de acabado de medio a bajo, y mínima habilidad del operador. Se puede emplear una rapidez de producción de media a alta y requiere una cantidad mínima de 1 000 a 50 000 partes para justificar el precio de la matriz.

En consecuencia, los materiales iniciales son característicos de los cerámicos, mientras que las técnicas de procesamiento son más parecidas a las de los polímeros termoplásticos (Cap. 4). Es esencial un conocimiento elemental de la estructura para el entendimiento de las tecnologías del procesamiento de los vidrios.

12-5-1 Estructura y propiedades de los vidrios

La base del vidrio es el tetraedro de sílice (SiO_4) (Fig. 12-3). En la forma no cristalina vítrea (*sílice fundida*), las valencias libres se unen en una red sin empaquetar, tridimensional, de enlace covalente (Fig. 12-7*a*). Como cada ion oxígeno es compartido por dos iones de silicio, el vidrio de sílice es realmente un polímero $(SiO_2)_n$. Otros óxidos (como el B_2O_3 y el P_2O_5) también son *formadores de redes* por sí mismos, pero algunos más (como el Al_2O_3) entran en la red SiO_2. Otro grupo de óxidos, los *modificadores de red*, despolimerizan la red al descomponer los enlaces O–Si–O; su oxígeno se une entonces a un enlace libre Si, mientras que el catión del metálico se distribuye aleatoriamente; su carga la equilibra la carga negativa de los iones no apareados de oxígeno (Fig. 12-7*b*), manteniendo un equilibrio global. Los *óxidos intermedios* (MgO, BeO, TiO_2) pueden entrar en la red o despolimerizarla. Existe amplio conocimiento fundamental que permite la formulación de vidrios para propósitos especiales. En general, el Al_2O_3 incrementa la dureza y reduce la dilatación térmica, mientras que el PbO disminuye la dureza y eleva el índice de refracción. Se debe notar que algunos elementos (S, Se, Te), los compuestos monóxidos (por ejemplo, As_2S_3) y los orgánicos (por ejemplo, el ácido abiético) también forman vidrios.

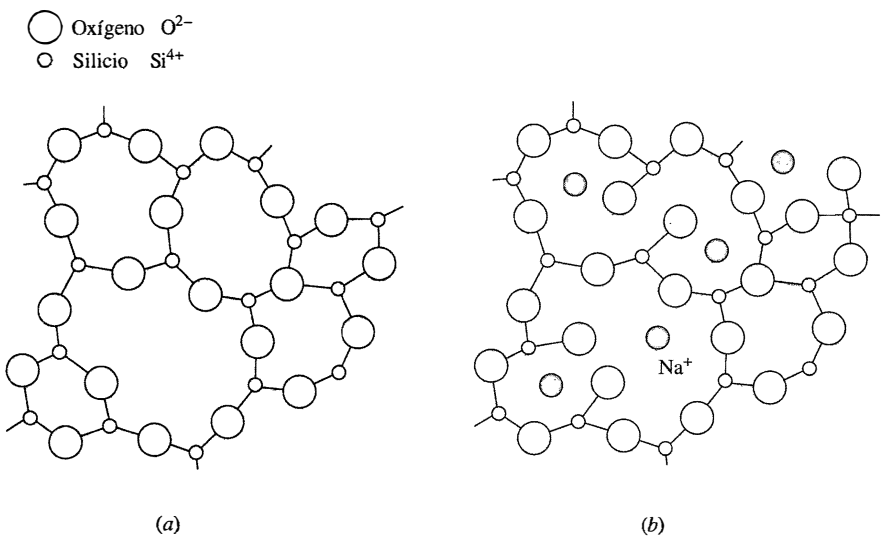


Figura 12-7 Representación bidimensional simplificada de: (*a*) una red sílice completamente polimerizada y (*b*) de un vidrio parcialmente despolimerizado (los cuartos enlaces están fuera del plano de la ilustración).

Al enfriarse a partir del estado fundido, la red espacial de la figura 12-7 se forma sin un cambio súbito en el volumen específico (como se muestra en la figura 13-5*a* para los polímeros amorfos) y el vidrio puede considerarse como un *líquido subenfriado metaestable*. Debido a la amplitud cada vez más reducida de las vibraciones térmicas, el volumen específico disminuye gradualmente con el decremento de la temperatura hasta que, a una *temperatura crítica* T_g, el vidrio tiene propiedades características de un sólido: ahora se considera en un estado vítreo no en equilibrio. La *temperatura de transición del vítrea* T_g depende de la rapidez de enfriamiento, y es mayor para enfriamiento rápido. De ahí que, como en la tecnología de polímeros, se hable de un rango de temperatura de transformación.

Propiedades mecánicas La distinción es importante desde un punto de vista mecánico:

1. Por encima de la T_g, el líquido subenfriado presenta un comportamiento de flujo viscoso newtoniano (Fig. 7-5*b*, línea *A*). Por lo tanto, el vidrio no se puede usar como material estructural por arriba de la T_g; un fluido newtoniano se deforma aún con el esfuerzo más ligero (ecuación 7-1). Al mismo tiempo, el flujo viscoso es extremadamente deseable para los procesos de manufactura, ya que el fluido se puede someter a tensión sin el peligro de estricción localizada (Secc. 8-1-6).

2. Por debajo de T_g, el vidrio es un sólido elástico frágil. Por convención, se considera que el vidrio alcanza una forma sólida cuando la viscosidad se eleva hasta $10^{13.5}$ P (la unidad poise aún se utiliza ampliamente, y algunas veces se expresa en la unidad SI de dPa · s). La resistencia calculada por medio de la resistencia de enlace nunca se obtiene en la práctica, porque las mellas y grietas actúan como concentradores de esfuerzos en el estado frágil (ecuación 4-11*b*). La presencia de grietas hace que el vidrio se someta a la *fatiga estática*: con la imposición de una carga de tensión, la fractura puede ocurrir repentinamente después que ha transcurrido un tiempo considerable.

Ejemplo 12-3

Demuestre que una fibra de un fluido newtoniano, como un vidrio, se adelgaza en proporción a la fuerza aplicada

$$\sigma = P / A = k\eta\dot{\varepsilon}$$

donde k es una constante de proporcionalidad. Por definición, $\varepsilon = dl/l = -dA/A$ [la integración de este diferencial conduce a la ecuación (8-3)]. La tasa de deformación, por definición, $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon / dt = (-d A / A) / dt = -\dot{A} / A$.

Entonces $P = k\eta\dot{\varepsilon}A = -k\eta\dot{A}$ o $\dot{A} = -P / k\eta$. Así, para una viscosidad dada, la fibra se adelgazará más rápidamente si se aplica una fuerza mayor.

Propiedades químicas y físicas Con frecuencia, los vidrios se eligen por su resistencia a la corrosión por líquidos o gases. Sin embargo, esto no significa que todos los vidrios sean resistentes a la corrosión, aun bajo condiciones moderadas. En efecto, la

fuente principal de grietas superficiales es la *corrosión atmosférica.* El vapor de agua presente en el aire se fija a la superficie del vidrio; los iones hidrógeno reemplazan a los cationes monovalentes (principalmente Na^-) por un mecanismo de corrosión por esfuerzo, creando grietas de radios de punta muy pequeños. El ataque es rápido, por ello, la fibra de vidrio recién trefilada pierde rápidamente la resistencia muy alta típica del vidrio libre de defectos. La corrosión se puede reducir al reemplazar los metales alcalinos monovalentes con calcio. La alta resistencia se retiene si la fibra recién trefilada (o pulida al fuego) se recubre con un polímero impermeable al agua. La corrosión por agua se aprovecha en el vidrio soluble, es decir, un vidrio completamente despolimerizado $Na_2O \cdot SiO_2$ que se disuelve en agua; cuando se trata con CO_2, se forma un gel resistente que sirve como aglutinante para moldes de arena (Secc. 7-5-4) y para ruedas de esmeril (Secc. 16-8-4). Al vidrio al alto plomo lo atacan los ácidos; por lo tanto, ahora hay límites fijos para el plomo lixiviable en los artículos de vidrio, tales como jarras y vasos.

Los vidrios son aislantes eléctricos a temperatura baja, pero se convierten en conductores iónicos en el régimen de fusión, permitiendo el calentamiento eléctrico de las fusiones.

Las propiedades ópticas son las más importantes. El vidrio amorfo es transparente y se puede colorear por medio de adiciones adecuadas de óxido o de metal. Los lentes *fotosensibles* se fabrican con vidrio que contiene AgCl. Cuando este vidrio se energiza con rayos ultravioleta, los iones Ag^+ se ordenan e imparten un color más profundo al vidrio.

Cerámicos vítreos Ya se mencionó que el estado vítreo es metaestable. En consecuencia, todos los vidrios se pueden convertir, al calentarlos por un periodo prolongado, a la forma cristalina. En algunas aplicaciones, los vidrios se formulan para evitar la cristalización indeseada. Por contraste, otros vidrios se producen para la conversión controlada a la forma cristalina. Esos *vidrios cerámicos* completamente densos por lo general se basan en el sistema Li_2O–Al_2O_3–SiO_2. Los agentes de nucleación (metales como Cu, Ag, Au, Pt, Pd, u óxidos como TiO_2) se agregan para promover la formación de muchos cristales pequeños. La dilatación térmica muy baja, combinada con la alta resistencia, hace a estos cerámicos vítreos adecuados para artículos de cocina (por ejemplo, el Pyroceram de Corning Glass Works) y para muchas aplicaciones industriales.

Los materiales de construcción de cerámicos vítreos se fabrican a partir de materiales naturales y de desperdicio baratos, que cristalizan espontáneamente (por ejemplo, el basalto fundido y la escoria de los altos hornos para baldosas de piso, los revestimientos de edificios y los bloques de pavimentación).

12-5-2 Procesos de manufactura

La fusión completa de una carga cerámica es un proceso lento, por lo tanto, los componentes de la carga se pulverizan finamente, se mezclan y luego se difunden en la parte superior de un baño fundido mantenido en un lote o, con mayor frecuencia, en un horno de fusión continua. Los *desperdicios de vidrio roto* ayuda al proceso de fusión; ésta es una de las razones para reciclar vidrio de desechado por el consumidor. Con frecuencia,

los hornos se calientan con gas, aunque se emplea un calentamiento eléctrico auxiliar porque crea convección intensa.

Una carga típica para vidrio plano se hace de cuarzo (arena, con tamaño de partículas de 0.1 a 0.6 mm), piedra caliza ($CaCO_3$) y ceniza de sosa (Na_2CO_3). Durante la fusión, los carbonatos se descomponen y reaccionan con el SiO_2. El desprendimiento de gas ayuda a homogeneizar la fusión, pero las burbujas permanecen. En la etapa final o *afino* (refinamiento) se permite que las burbujas se eleven, un proceso que se acelera al agregar, por ejemplo, As_2O_3. Se hacen adiciones posteriores para controlar el color. Así, el verde-azul del FeO se puede cambiar al amarillo mucho más claro del Fe_2O_3, el cual luego puede disfrazarse al agregar óxidos que proporcionan un color complementario. El vidrio fundido es altamente corrosivo para revestimientos refractarios de hornos; por lo tanto, los revestimientos se eligen por su resistencia al ataque y para no introducir componentes dañinos en el vidrio. La temperatura del baño suele controlarse en una *antecámara de fusión* (una extensión del horno de fusión), con el fin de impartir la viscosidad óptima para el proceso subsecuente de formado. El vidrio se mantiene

Tabla 12-2 Propiedades de manufactura de algunos vidrios*

	Número de código y tipo de Corning Glass Works						
Propiedad	**7940 Sílice fundida†**	**Vidrio-E**	**7740 Borosilicato**	**1720 Aluminosilicato**	**0080 Silicato de sosa y cal**	**8871 Potasa-plomo**	**8830 Sosa-boro-silicato**
Composición, peso %							
SiO_2	99.9	54	81	62	73	42	65
B_2O_3		10	13	5			23
Al_2O_3		14	2	17	1		5
Na_2O			4	1	17	2	7
K_2O						6	
Li_2O						1	
CaO		17.5		8	5		
MgO		4.5		7	4		
PbO						49	
Viscosidad, P‡ a °C	956	507	610	667	473	350	460
$10^{14.5}$ (punto de deformación)							
10^{13} (punto de recocido)	1 084	657	560	712	514	385	501
$10^{7.6}$ (punto de ablandamiento)	1 580	846	821	915	695	525	708
10^{4} (punto de trabajo)			1 252	1 202	1 005	785	1 042
Coeficiente de dilatación lineal $\times 10^{-7}$/°C	5.5	60	33	42	92	102	49.5
Usos característicos	Ventanas aeroespaciales de alta temperatura	Fibra	Químico, artículos para horneado	Tubo de ignición	Recipiente, lámina, placa	Vidrio artístico, óptica, capacitores	Sellos de vidrio para kovar

* Datos recopilados de D.C. Boyd y D.A. Thompson, *Glass*, en *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 3a. ed., vol. 11, Wiley, Nueva York, 1980, pp. 807-880.

† Producida por deposición de vapor.

‡ Multiplique poise por 0.1 para obtener $N \cdot s/m^2$.

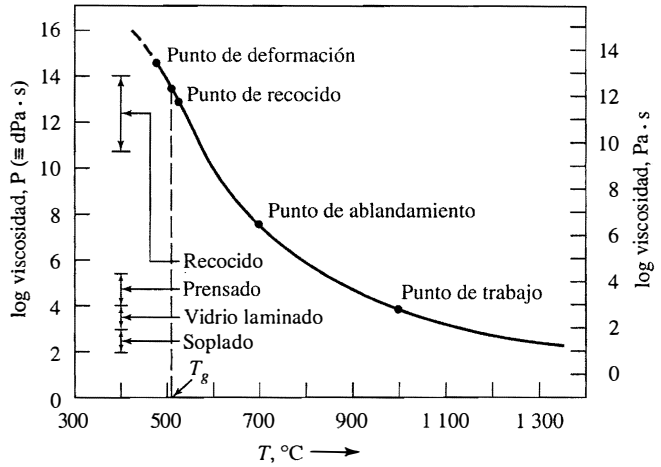


Figura 12-8 Los vidrios se ablandan gradualmente; su viscosidad depende de la composición.

agitado mediante una corriente eléctrica o por agitadores mecánicos, para mantener la uniformidad.

Las composiciones del vidrio se eligen para aplicaciones específicas (tabla 12-2). La composición también determina la relación viscosidad-temperatura (Fig. 12-8). La viscosidad η disminuye con el incremento de la temperatura T, de acuerdo con

$$\log_{10} \eta = C + \frac{B}{T} \qquad \textbf{(12-1)}$$

donde C y B son constantes, y T es la temperatura absoluta. La temperatura más baja, a la cual el formado aún es práctico, se denota por el punto de ablandamiento de Littleton, en el cual una fibra estándar se extiende bajo su propio peso.

Ejemplo 12-4

El vidrio 0080 de la tabla 12-2 ocasionalmente se usa como lubricante para la extrusión en caliente (Secc. 9-4-2). ¿Cuál es su viscosidad a 1 200°C?

De la tabla 12-2, la viscosidad es $10^{7.6}$ P a 695°C, y 10^4 P a 1 005°C. De la ecuación (12-1):

$$7.6 = C + \frac{B}{695 + 273} \quad \text{y} \quad 4.0 = C + \frac{B}{1\,005 + 273}$$

Resolviendo simultáneamente ambas ecuaciones se obtiene B = 14 366 y C = −7.24. Así, a 1 200°C,

$$\log_{10} \eta = -7.24 + \frac{14\,366}{1\,200 + 273} = 2.51$$

La viscosidad es $10^{2.51}$ P a 1 200°C, lo cual concuerda razonablemente con la tabla 8-4, donde se indica una viscosidad de 100 a 300 P, a la temperatura de trabajo.

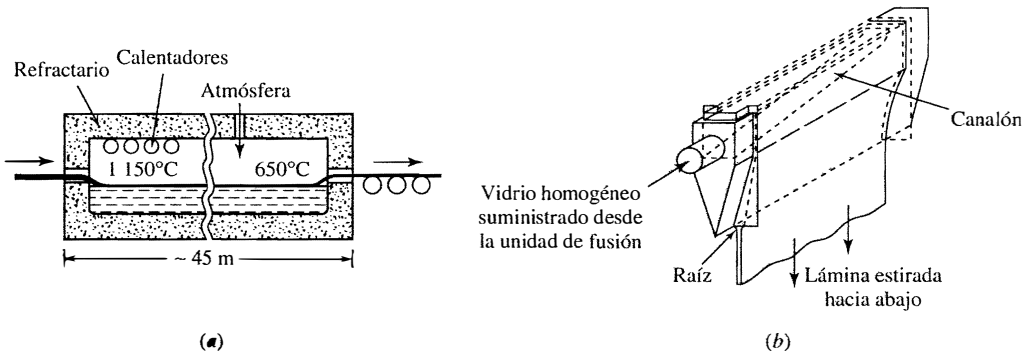


Figura 12-9 El vidrio laminado se fabrica por medio de los procesos: (*a*) de vidrio flotado o (*b*) de vidrio fundido. (*Parte (b) cortesía de Corning Inc., Corning, Nueva York.*)

Procesos de formado

1. Los vidrios planos se formaban antaño estirando o laminando desde la antecámara de fusión. Estos procesos se han sustituido por el de *vidrio flotado*, en el cual éste fluye (a una viscosidad típica de 10^4 P) sobre la superficie de un baño de estaño fundido en una atmósfera controlada (Fig. 12-9*a*). La superficie inferior es atómicamente lisa, y la superior se alisa debido al efecto de la tensión superficial. La tensión superficial mantiene el vidrio en un espesor de 67 mm. El ancho es hasta de 4 m. La tira de vidrio se puede reducir hasta espesores de 1.5 mm alargándola con rodillos. La lámina sale del horno a 600°C aproximadamente y luego se sostiene en rodillos, sin marcarse. El vidrio plano grueso se fabricaba fundiendo una placa gruesa y puliéndola mecánicamente; en la actualidad todo se realiza mediante el proceso de flotación. Éste se limita a vidrio de sosa y cal.

2. Todas las variedades de vidrio se pueden fabricar por medio del proceso de *vidrio fundido*, en el que se unen dos corrientes de vidrio viscoso (2×10^5 P), derramándose de un canalón (Fig. 12-9*b*). El espesor se controla mediante la velocidad de extracción, y puede variar de 0.4 a 10 mm. La superficie no la toca ninguna herramienta y se alisa por tensión superficial.

3. El *tubo de vidrio* se fabrica circulando el vidrio hacia un mandril hueco rotatorio, a través del cual se sopla aire (Fig. 12-10*a*); el tubo, que se endurece gradualmente, se estira mecánicamente hasta dimensiones más delgadas.

4. Un principio similar se emplea para fabricar *fibra de vidrio* continua de 3 a 20 μm de diámetro para tela aislante y como fibra de refuerzo para plásticos. Un vidrio de alta resistencia eléctrica y a la corrosión (de aquí que se llame vidrio E) se funde en (o se transfiere desde la antecámara de fusión hasta) un crisol de platino llamado *dado*, en el cual hay de 200 a 400 toberas (Fig. 12-10*b*). El vidrio fluye a una rapidez q determinada por las dimensiones de las toberas (radio r y longitud l), por la viscosidad cinemática υ (la viscosidad dinámica η dividida entre la densidad ρ) de la fusión y por la presión hidrostática generada por la altura h del material fundido

$$q = \frac{khr^4}{\upsilon l}$$

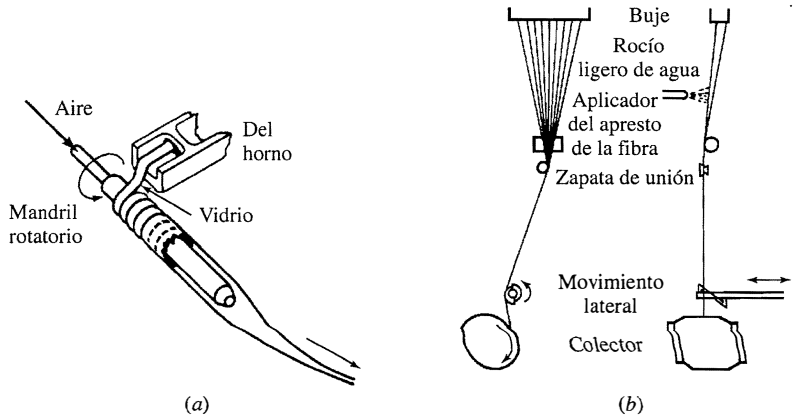


Figura 12-10 Métodos para fabricar: (*a*) tubo y (*b*) fibra por métodos continuos [(*a*) *adaptada de P.C. Boyd y D.A. Thompson, en Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 3a. ed., Wiley, 1980, vol. 11, p. 864; (b) K.L. Loewenstein, The Manufacturing Technology of Continuous Glass Fibers, 2a. ed., Elsevier, 1983, p. 29. Con permiso.*]

donde k es una constante. Las fibras que emergen se enfrían y se someten a una *atenuación* mecánica (alargamiento) al girar el tambor de almacenamiento a una velocidad mayor (de 50 a 60 m/s). La fibra se recubre con un *apresto* orgánico (como almidón en aceite), lo que permite el procesamiento con mínimo daño. Las fibras se pueden cortar, o pueden fabricarse fibras cortas directamente atenuando con aire comprimido o con vapor, lo que las rompe mientras las adelgaza. La *lana de vidrio* de fibras de 20 a 30 μm de diámetro se hila (se expulsa) por medio de cabezas rotatorias; a menudo se apila inmediatamente para formar fieltros aislantes.

5. Una clase especial de fibras se utiliza como *guía de luz* en fibras ópticas y como guías de onda de fibra óptica para la transmisión a larga distancia de señales digitales enviadas por láser de pulsos o fotodiodo. La atenuación (pérdidas) debe ser muy baja; por ello, se hace todo lo posible para asegurar el paso de la luz sin obstrucción, al tiempo que se previene su escape de la fibra. El primer objetivo se logra fundiendo materias primas extremadamente puras (Fig. 12-11) o formando la fibra por deposición de vapor. El segundo objetivo se alcanza al rodear el núcleo de vidrio (con frecuencia, sílice contaminada con germanio) con una envolvente de índice refractario menor (sílice pura), de manera que ocurra reflexión en la interfase entre ambas. La fibra óptica es un candidato prioritario para la manufactura en el espacio.

6. Se pueden fabricar los artículos individuales *prensando* una cantidad medida de vidrio (*trozo*) en moldes de acero o de hierro fundido. El proceso está relacionado con el forjado en matriz cerrada (Secc. 9-3-2).

7. Con frecuencia se necesitan artículos con paredes más delgadas y formas reentrantes. Para ello, el trozo se deja caer en un molde (o el vidrio se succiona en el molde mediante el vacío) y una preforma ("párison") se crea por soplado de aire o al prensar

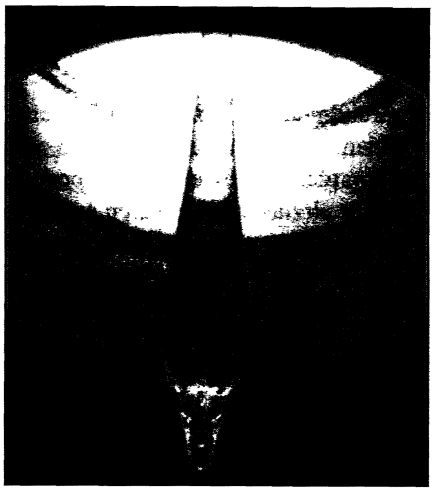


Figura 12-11 Pieza pura de sílice que se va a estudiar en forma de hilo fino de fibra óptica. (*Cortesía de Corning Incorporated, Corning, Nueva York.*)

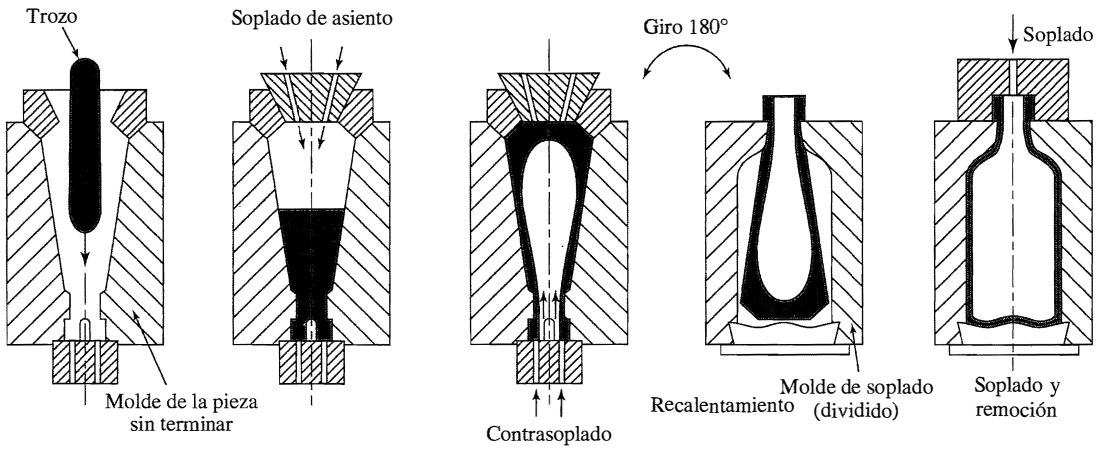


Figura 12-12 Una botella se puede fabricar formando un trozo de vidrio en un ducto ("parison") que luego se moldea por soplado hasta la forma final.

con un punzón (Fig. 12-12). Después de realizar una trasferencia a un segundo molde dividido, se permite que la parte sea recalentada y luego *moldeada por soplado* hasta la forma final. El flujo viscoso newtoniano asegura que la pared se adelgace uniformemente. Para mantener un buen acabado superficial, el molde se recubre con un aceite mineral, con una emulsión, o con una mezcla de aserrín-cera que luego se convierte en carbono. Antes de soplar, la capa de carbono se humedece ligeramente; el vapor generado durante el soplado separa el molde de pasta del vidrio y proporciona un acabado liso.

Las bombillas se producen en unidades de soplado de etapas múltiples, a la rapidez de 2 000 por minuto. El soplado a mano está limitado actualmente al trabajo artístico.

Operaciones de acabado Algunos vidrios (especialmente la sílice fundida) tienen una dilatación térmica baja y se pueden enfriar rápidamente. Sin embargo, en la mayor parte de los vidrios el enfriamiento rápido origina esfuerzos residuales que podrían causar la desintegración explosiva, por lo que se deben aliviar *recociendo* en un horno llamado *horno de túnel.* La temperatura se selecciona para permitir el alivio de esfuerzos en un tiempo razonable sin peder la forma del artículo. El alivio de esfuerzos ocurre (el esfuerzo se reduce a 2.5 MPa) en 4 h a la *temperatura inferior de recocido* o *punto de deformación,* y en 15 min a la *temperatura mayor de recocido* o *punto de recocido* (Fig. 12-8). Para evitar la reintroducción de esfuerzos, la pieza se debe enfriar lentamente a partir de la temperatura del punto de recocido hasta la del punto de deformación.

El vidrio que no ha estado en contacto con ninguna herramienta presenta una superficie extremadamente lisa (*acabado horneado natural*); por lo tanto, los bordes de corte se *pulen* al fuego con un soplete.

La resistencia del vidrio típico es de alrededor de 70 MPa. La resistencia a los esfuerzos de tensión se puede incrementar al inducir esfuerzos de compresión en la superficie, y así se mantienen las grietas bajo compresión. Esto se consigue sometiendo

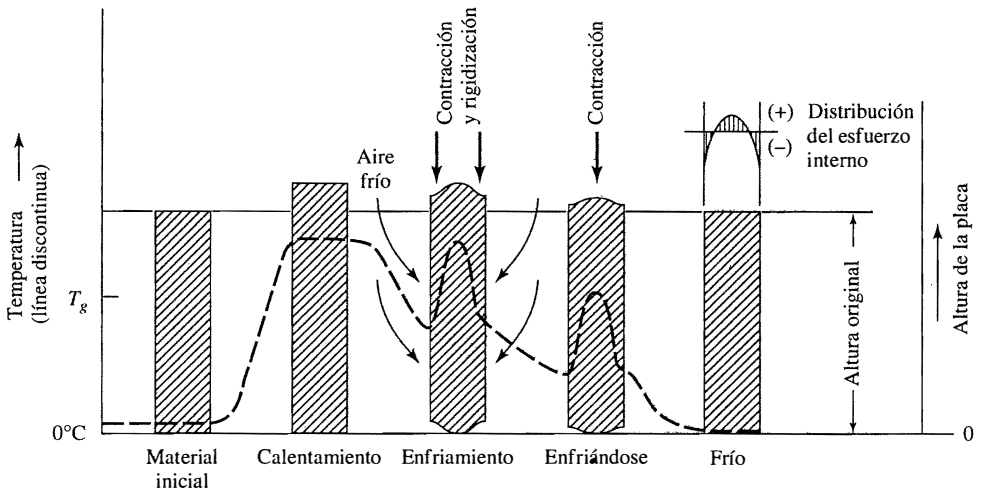


Figura 12-13 El vidrio hace más tenaz por medio de la secuencia de operaciones que se muestra; los elevados esfuerzos residuales superficiales de compresión lo hacen resistente a la carga de tensión. La variación de la altura a través del espesor de la placa se señala esquemáticamente para cada paso de procesamiento. La línea discontinua indica la distribución correspondiente de la temperatura.

el artículo de vidrio terminado (para horno doméstico, recipientes, lentes, etcétera) a un tratamiento térmico o químico.

1. El *templado* es un proceso térmico, el cual se ilustra en la figura 12-13 para el ejemplo de una placa. Ésta se calienta por arriba de la T_g, luego su superficie se templa con un chorro de aire, causando que las superficies se contraigan y endurezcan. En este punto, el centro aún está suave, y sigue la contracción de las capas superficiales. Luego de un enfriamiento posterior, el centro también se enfría y en consecuencia se contrae; como ahora las superficies son rígidas, no pueden seguir la contracción del centro y se ponen en compresión. Los esfuerzos superficiales de compresión, del orden de 140 MPa o mayores, se equilibran mediante los esfuerzos internos de tensión; son inofensivos porque no hay grietas en el centro.

2. El *intercambio de iones* introduce esfuerzos de favorable compresión en una capa superficial mucho más delgada. Cuando un vidrio de sosa y cal se sumerge, por debajo de la T_g (a cerca de 400°C), en KNO_3 fundido, los iones de Na se sustituyen por los iones mayores de K (o los de Li pueden sustituirse por iones de Na en un baño de $NaNO_3$). Alternativamente, los iones de Na o de K se cambian por iones más pequeños de Li, a temperaturas mayores que la T_g; la superficie tiene un coeficiente menor de dilatación y puesto que se contrae menos, se somete a los esfuerzos de compresión por la masa del vidrio.

Ejemplo 12-5

Un recipiente de vidrio se calienta en un horno a 350°C y se sumerge en agua hirviendo (100°C). Suponiendo que el esfuerzo superficial no debe exceder al de tensión (70 MPa) del vidrio, determine qué vidrios de la tabla 12-2 se pueden someter con seguridad al tratamiento descrito arriba.

En el caso más sencillo, el estado de esfuerzos es uniaxial, y de la ecuación (4-5),

$$\sigma = Ee_t = E\alpha\,\Delta T$$

donde E es el módulo de Young (por lo común $E = 70\,000$ MPa) y α el coeficiente de dilatación lineal (tabla 12-2).

Vidrio	α, 10^{-7} por °C	σ, MPa
Sílice fundida	5.5	9.6
Borosilicato	33	57.8
Aluminosilicato	42	73.5
Sosa-cal	92	161
Potasa-plomo	102	178.5

El cálculo para la sílice fundida es: $\sigma = 7(10^4)(5.5)(10^{-7})(350 - 100) = 9.6$ MPa.

La ventaja de un vidrio de dilatación baja es obvia. Un tratamiento ligeramente más complejo toma en cuenta que el estado de esfuerzos en la superficie de una placa o recipiente normalmente es biaxial.

12-5-3 Recubrimientos

Se depositan capas cerámicas superficiales en componentes metálicos y cerámicos, por razones tanto estéticas como técnicas.

Los *barnices* y los *esmaltes* son recubrimientos vítreos o parcialmente cristalinos que se aplican en forma de suspensión acuosa (lechada). Para el control óptimo de la composición, con frecuencia el vidrio se prefunde y granula en agua. La frita resultante se tritura y está suspendida en agua, y agregándosele antifloculantes, etc. Para que exista adhesión en superficies verticales, se ajustan sus propiedades al añadir arcilla o aglutinantes orgánicos para impartir un comportamiento seudoplástico o de Bingham (Fig. 7-5*b*).

La composición se elige de manera que el barniz o esmalte tenga un coeficiente de dilatación térmica ligeramente menor al de la pieza de tal manera que sea puesto en compresión al enfriarse. El plomo reduce las temperaturas de horneado pero se debe evitar en todas las aplicaciones relacionadas con alimentos debido a su toxicidad. Los recubrimientos varían de transparentes a completamente opacos y se puede obtener una amplia gama de colores y efectos especiales.

Los esmaltes vítreos se aplican al acero al bajo carbono, a hierro fundido o artículos de aluminio, para mejorar su resistencia a la corrosión. El carburo de hierro reacciona con los esmaltes para formar CO_2; por lo tanto, se obtiene mejor calidad y adhesión en acero de muy bajo contenido de carbono (de ahí la preferencia por el acero calmado con su segregación, Fig. 7-4*a*, y por el acero especial descarburizado con 0.03% de C). La adhesión sobre hierro fundido es puramente mecánica; para el aluminio se le ayuda primero al formar un óxido superficial.

Ejemplo 12-6

Las coronas y los puentes dentales normalmente se hacen de una aleación de oro o paladio como fundiciones a la cera perdida. Por razones estéticas, se cubren con varias capas de porcelana, elegida por su transparencia, color y dilatación térmica acoplada controladas. La adhesión a los metales nobles es pobre; en consecuencia, las aleaciones contienen indio o estaño que permiten el desarrollo de un óxido al cual se enlaza la porcelana.

Los barnices se aplican a los cerámicos para hacerlos impermeables. Algunos barnices se fabrican de materias primas, pero se obtiene un mejor control el uso de fritas.

12-5-4 Capacidades del proceso y aspectos del diseño

El ablandamiento gradual del vidrio lo convierte en uno de los materiales más versátiles en términos de la forma. El artesano crea productos de alta complejidad con sólo algunas herramientas, a menudo uniendo varias piezas, de diferentes colores si se desea.

La producción industrial está mucho más limitada por la necesidad de usar moldes de metal (matrices), que deben tener una forma específica para liberar la parte, abrien-

do una matriz dividida si resulta necesario. En contraste con todos los otros materiales considerados previamente, el vidrio permite la formación de cavidades simplemente soplando, sin una matriz, por lo que muchas partes se crean con forma interna reentrante (F5 y U4 en la figura 3-1).

Las limitaciones de tamaño son pocas. El espesor de pared puede ser muy pequeño (como en los ornamentos navideños de vidrio) o inmenso (como en los espejos de telescopios), pero la rapidez de enfriamiento y en consecuencia, la de producción, disminuye precipitadamente con el incremento del espesor. El recocido para aliviar esfuerzos también se vuelve imperativo.

12-6 RESUMEN

Las cerámicas tienen una función excepcionalmente amplia en la vida humana. Se enfatiza el estudio de los cerámicos técnicos, caracterizados por sus propiedades mecánicas altamente controladas y a menudo inusuales, así como por su resistencia al desgaste o a la temperatura elevada, y por sus propiedades ópticas, eléctricas o magnéticas controladas. Se pueden obtener a partir de óxidos, silicatos y minerales arcillosos naturales, o se manufacturan en forma de materiales de pureza excepcional, o con una composición no encontrada en la naturaleza, como carburos o nitruros.

1. El material inicial se somete a pasos de preparación, incluyendo la trituración, la clasificación y, cuando sea necesario, la aglomeración para impartir las propiedades reológicas deseadas cuando se combinan y mezclan con un aglomerante.
2. La consolidación se realiza mediante procesos familiares de la metalurgia de polvos (incluyendo prensado en seco, prensado isostático y moldeo por inyección) y también por extrusión con tornillo. Los cerámicos también se pueden fabricar en pastas que presentan flujo viscoso, de ahí que sea factible tratarlos a través de procesos de vaciado, incluso el vaciado en hueco en moldes de yeso que permiten una mayor complejidad de forma.
3. El aglutinante se retira en el secado y en las primeras etapas de sinterizado, y se forman enlaces permanentes a temperaturas elevadas mediante mecanismos de difusión. La fusión parcial (vitrificación) incrementa la densidad, pero puede afectar la resistencia en caliente.
4. El vidrio es amorfo y se ablanda gradualmente, permitiendo el procesamiento basado en el flujo viscoso. Los vidrios también han entrado a la era de la alta tecnología; se fabrican a la medida para aplicaciones específicas y se someten a tratamientos especiales. El líquido subenfriado metaestable se puede transformar a una forma cristalina estable; tales vidrios cerámicos vítreos tienen densidad completa.

El procesamiento de cerámicos invariablemente implica temperaturas elevadas, por lo que se deben tomar medidas de protección similares a las de la fundición y a las de las de plantas de trabajo de metales.

PROBLEMAS 12A

12A-1 Diga en qué diferencian los cerámicos, los vidrios y los cerámicos vítreos.

12A-2 Describa brevemente los pasos involucrados en la fabricación de varias copias de una estatuilla de porcelana.

12A-3 Indique qué afirmaciones son válidas para los cerámicos: (*a*) un cuerpo crudo se llama así debido a su color verde; (*b*) los cerámicos vítreos son cerámicos con una estructura amorfa; (*c*) la desvitrificación significa la cristalización de un vidrio; (*d*) una sustancia vítrea es amorfa, (*e*) una sustancia vítrea usualmente es transparente.

12A-4 ¿Qué significa el término *polimorfismo*?: (*a*) un monocristal caracterizado por muchas facetas; (*b*) que la sustancia experimenta una transformación alotrópica; (*c*) que la sustancia puede poseer diferentes estructuras cristalinas, dependiendo de la temperatura y de la presión; (*d*) que la forma de los granos individuales varía dentro de un cuerpo policristalino.

12A-5 (*a*) Indique si los cerámicos tienen la misma resistencia a la tensión y a la compresión. (*b*) Justifique su respuesta.

12A-6 (*a*) Establezca qué ensayos se realizan normalmente para determinar la resistencia a la tensión de los cerámicos. (*b*) Indique cuál de los ensayos dará el menor valor y por qué.

12A-7 Defina: (*a*) torneado ligero; (*b*) vaciado en hueco; (*c*) vaciado drenado, y (*d*) vaciado de cinta.

12A-8 Defina: (*a*) alfarería; (*b*) loza; (*c*) porcelana y (*d*) refractario.

12A-9 En una serie de bocetos y con oraciones breves, muestre los pasos involucrados para temblar una placa de vidrio.

12A-10 Use bocetos simples a fin de definir las características principales de la fabricación de: (*a*) vidrio laminado; (*b*) vidrio flotado, y (*c*) parison.

12A-11 Defina la temperatura de transición vítrea (indique las propiedades por encima y por debajo de ella).

12A-12 Defina el término *reología*.

PROBLEMAS 12B

12B-1 Explique por qué las propiedades mecánicas de los cerámicos mejoran con la disminución del tamaño del cristal.

12B-2 Sugiera al menos dos métodos para mejorar las propiedades de impacto de los cerámicos. Justifique su respuesta.

12B-3 (*a*) Defina el término *sinterizado de fase líquida.* Dé ejemplos de: (*b*) productos de metalurgia de polvos y (*c*) productos cerámicos hechos con esta técnica.

12B-4 Una pieza cerámica se fabrica para el servicio a temperatura elevada. Se argumenta que las propiedades de termofluencia mejoran a una mayor densidad, por lo tanto se debe usar el sinterizado de fase líquida. ¿Está de acuerdo y por qué?

12B-5 Sugiera técnicas apropiadas de formado para fabricar: (*a*) un ladrillo común con agujeros aislantes; (*b*) un ladrillo aparente con configuración superficial decorativa; (*c*) un tubo de alúmina; (*d*) un tubo de vidrio; (*e*) una taza de inodoro; (*f*) una teja de campo; (*g*) una figurilla de porcelana; (*h*) un plato de porcelana; (*i*) un aislante eléctrico de porcelana para las líneas de potencia de alta tensión.

12B-6 Muchos procesos que se emplean para la consolidación de polvos cerámicos tienen sus contrapartes en los utilizados para fabricar componentes de metal. Para los siguientes procesos, indique sus contrapartes y resalte las diferencias en los mecanismos que permiten su aplicación: (*a*) prensado en seco; (*b*) prensado húmedo; (*c*) torneado ligero; (*d*) moldeo por inyección, y (*e*) vaciado en hueco.

12B-7 A cuál de los siguientes materiales se le puede aplicar el término *ferrita*: (*a*) un hierro de estructura FCC; (*b*) una ferroespinela; (*c*) un cerámico de propiedades magnéticas deseables; (*d*) uno de los constituyentes de la perlita; (*e*) una aleación hierro-carbono de muy bajo contenido de carbono a temperatura ambiente y (*f*) un hierro de dureza excepcional.

12B-8 Explique las similitudes y diferencias en: (*a*) composición; (*b*) estructura, y (*c*) propieda-

des mecánicas del negro de humo, del grafito y del diamante.

12B-9 (*a*) Determine por qué el vidrio es débil en tensión. (*b*) Sugiera dos métodos para elevar la resistencia a la tensión (o flexión) del vidrio; explique brevemente por qué deben funcionar.

12B-10 Establezca por qué una botella de vidrio se puede soplar hasta un espesor de pared uniforme, sin peligro de fractura.

12B-11 Defina los términos: (*a*) *vitrificación* y (*b*) *desvitrificación* cuando se aplican a los cerámicos. (*c*) Indique si un fenómeno equivalente se puede encontrar en los metales. Dé ejemplos para cada uno.

12B-12 Determine cuál sería la mejor caracterización del vidrio de ventana desde el punto de vista de: (*a*) la estructura; (*b*) la composición y la reología a: (*c*) temperatura elevada y (*d*) temperatura ambiente.

12B-13 Explique por qué es posible una deformación sustancial en (*a*) metales y (*b*) vidrios, pero no en (*c*) cerámicos.

12B-14 Muchos objetos de vidrio de gran antigüedad se exhiben en museos. Algunos presentan áreas opacas. ¿Por qué?

12B-15 Las tinas de baño con frecuencia se fabrican de lámina esmaltada de acero. La tina de baño está normalmente a temperatura ambiente, pero se somete a un calentamiento repentino mediante el agua caliente. La dilatación térmica del esmalte ¿debe ser mayor o menor que la del hierro?

12B-16 Un estudiante escribió "un vidrio se puede distinguir de un cerámico por su transparencia". ¿Está usted de acuerdo?

12B-17 El vidrio recién estirado es muy resistente. (*a*) Explique por qué pierde gran parte de su resistencia y (*b*) sugiera una forma de mantenerla elevada.

12B-18 ¿Cuál es más fácil de reciclar, el (*a*) cerámico o el (*b*) cerámico vítreo? Justifique la respuesta.

PROBLEMAS 12C

12C-1 Un bloque aislante eléctrico de dimensiones $10 \times 20 \times 150$ mm se vacía en hueco. Inmediatamente después de retirarlo del molde pesa 48 g. Luego de secarlo, el peso es 35 g, y la longitud se contrajo a 130 mm con contracciones proporcionales en las direcciones del espesor y del ancho. Calcule: (*a*) la pérdida de peso, en porcentaje; (*b*) el coeficiente de contracción lineal; (*c*) las dimensiones y el volumen en seco.

12C-2 Vuelva a calcular los esfuerzos generados por el templado descrito en el ejemplo 12-5. Considere que en la tensión biaxial equilibrada $\sigma_1 = \sigma_2$ y $\sigma_3 = 0$. Aplique la ley de Hooke generalizada (υ es la razón de Poisson).

$$e_1 = \frac{1}{E}\left[\sigma_1 - \upsilon(\sigma_2 - \sigma_3)\right] = \frac{1}{E}\sigma_1(1-\upsilon)$$

$$\sigma_1 = \frac{eE}{1-\upsilon} = \frac{E}{1-\upsilon}\alpha\,\Delta T$$

12C-3 (*a*) Explique qué modelos reológicos describen mejor el comportamiento de un vidrio por debajo y por encima del punto de fusión; (*b*) escriba las ecuaciones que gobiernan la carga bajo tensión; (*c*) dibuje los modelos correspondientes resorte/amortiguador; (*d*) demuestre por qué una varilla de vidrio se adelgaza uniformemente si se alarga por encima de la T_g (utilice un argumento físico basado en el comportamiento de una estricción incipiente).

12C-4 Una broca cuadrada de alúmina de lados $a =$ 20 mm y espesor $h = 10$ mm se prensa a una presión de $p = 100$ MPa. El módulo de Poisson es 0.23. Determine: (*a*) la fuerza de la prensa, y la presión que prevalece en el fondo del prensado si se usa un solo punzón en un recipiente fijo (*b*) seco ($\mu = 0.5$) y (*c*) con un lubricante ($\mu = 0.1$).

LECTURAS ADICIONALES

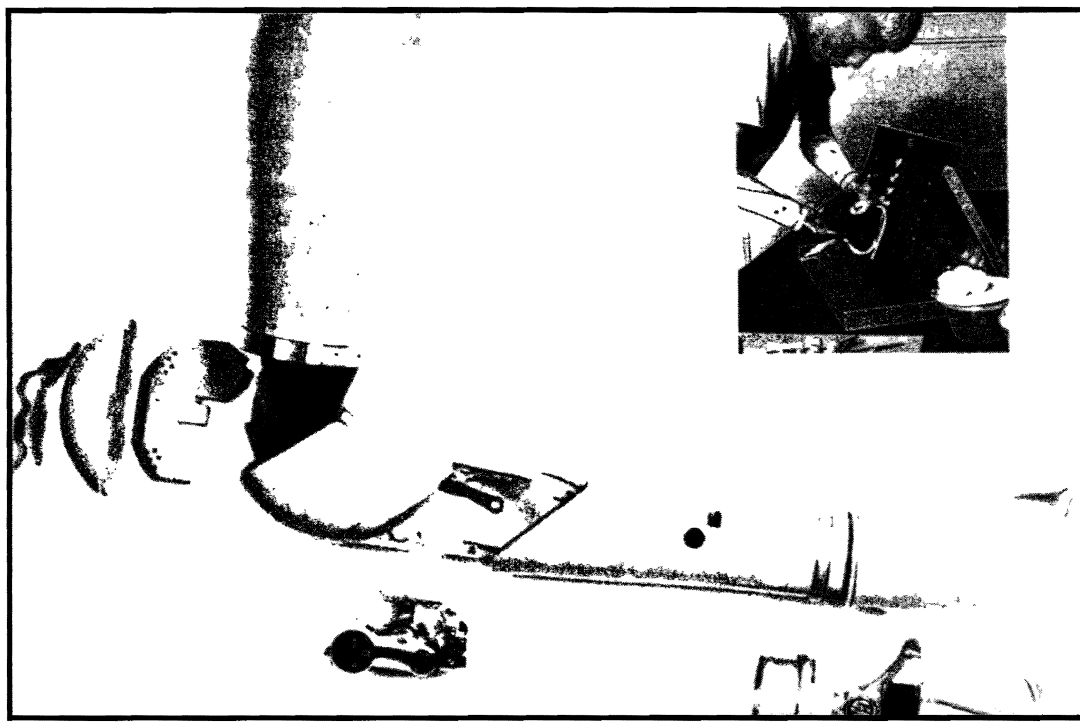
ASM Engineered Materials Handbook, vol. 4, *Ceramics and Glasses*, ASM International, 1991.
ASM Engineered Materials Handbook: Desk Edition, ASM International, 1995.

Cerámicos

Barsoum, M.: *Fundamentals of Ceramics*, McGraw-Hill, 1997.
Brook, R.J. (ed.): *Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials*, Pergamon, 1991.
Cheremisinoff, N.P.: *Handbook of Ceramics and Composites*, 3 vols., Dekker, 1991.
Chiang, Y-M: *Physical Ceramics: Principles for Ceramics Science and Engineering*, Wiley, 1995.
Cranmer, D.C. y D.W. Richerson: *Mechanical Testing Methodology for Ceramic Design and Reliability*, Dekker, 1998.
Jones, J.T. y M.F. Berard: *Ceramics–Industrial Processing and Testing*, 2a. ed., Iowa State University Press, 1993.
Kingery, W.D., H.K. Bowen y D.R. Uhlmann: *Introduction to Ceramics*, 2a. ed., Wiley, 1976.
Lu, H.Y.: *Introduction to Ceramics Science*, Dekker, 1996.
McHale, A.: *Phase Diagrams and Ceramic Processes*, Chapman and Hall, 1998.
Musikant, S.: *What Every Engineer Should Know About Ceramics*, Dekker, 1991.
Norton, F.H.: *Elements of Ceramics*, 2a. ed., Addison-Wesley, 1974.
Phillips, G.C.: *A Concise Introduction to Ceramics*, Van Nostrand Rheinhold, 1991.
Rahaman, M.N.: *Ceramic Processing Technology and Sintering*, Dekker, 1995.
Reed, J.S.: *Principles of Ceramics Processing*, 2a. ed., Wiley, 1995.
Richterson, D.W.: *Modern Ceramic Engineering*, 2a. ed., Dekker, 1992.
Schwartz, M.M.: *Handbook of Structural Ceramics*, McGraw-Hill, 1992.
Terpstra, R.A., P.P.A.C. Pex y A.H. DeVries (eds.): *Ceramic Processing*, Chapman and Hall, 1995.
Vincenzini, P.: *Fundamentals of Ceramic Engineering*, Elsevier, 1991.
Nanoceramics, Institute of Materials, 1993.

Vidrios

Doremus, R.H.: *Glass Science*, 2a. ed., Wiley, 1994.
Hlavac, J.: *The Technology of Glass and Ceramics,* Elsevier, 1983.
Lewis, M.H. (ed.): *Glasses and Glass-Ceramics*, Chapman and Hall, 1989.
Loewenstein, K. L:. *The Manufacturing Technology of Continuous Glass Fibers,* 2a. ed., Elservier, 1983.
Tooley, F.V. (ed.): *The Handbook of Glass Manufacture,* Ashlee Publishing Co., 1984.
Zarzycki, J.: *Glasses and the Vitreous State,* Cambridge University Press, 1991.



Los polímeros se combinan con varios aditivos de manera que los plásticos resultantes resultan adecuados para una amplia variedad de aplicaciones. Se pueden fabricar piezas de plástico con formas altamente complejas, como el brazo artificial que se muestra en la gráfica. (*Cortesía de Canadian Plastics Industry Association, Mississauga, Ontario.*)

capítulo

13

Polímeros y plásticos

Los plásticos se basan en polímeros, y antes de adentrarse en el estudio de su manufactura, es necesario repasar las respuestas a algunas preguntas básicas, como:

¿Por qué algunos polímeros son deformables mientras que otros son completamente frágiles?

¿Por qué sus aplicaciones están tan limitadas por la temperatura?

¿Qué permite que un caucho experimente una deformación elástica repetida sin fallar?

¿Qué mecanismos se pueden explotar para su manufactura?

¿Por qué algunos productos plásticos se pueden usar en lugar de los metales?

Un *polímero* es, como indican sus raíces griegas *poli* (muchos) y *meros* (parte), cualquier sustancia compuesta de muchas (normalmente millares) unidades repetidas, llamadas *meros*. La mayor parte de los polímeros se basa en un esqueleto de carbono, por lo que son materiales orgánicos. Hay muchos polímeros naturales, y después del concreto, la madera aún es el material estructural que más ampliamente se utiliza. Sin embargo, nos interesan ahora los *polímeros sintéticos*; cuando se encuentran en una forma apta para el trabajo posterior, también se llaman *resinas*. Rara vez se emplean en su forma pura; con mayor frecuencia, se mezclan con varios aditivos, y al material resultante se le denomina *plástico* (de nuevo, del griego *plastikos*, derivado de *plassein*: formar, moldear). Comúnmente, los términos polímero, resina y plástico se usan de manera indistinta.

Desde hace relativamente poco (tabla 1-1), el crecimiento de la industria de los plásticos ha sido fenomenal. Como se muestra en la tabla 13-1, la venta de plásticos —respecto a su volumen— ha crecido a más del doble que la producción de acero en Estados Unidos. Se espera que esta tendencia de crecimiento continúe, en parte porque aún se están descubriendo nuevas aplicaciones y también porque los plásticos mejorados pueden sustituir a otros materiales. Inicialmente, la mayor parte de los plásticos se emplearon en aplicaciones en que su baja densidad, su alta resistencia a la corrosión, su aislamiento eléctrico y su facilidad de manufactura en formas complejas representaban ventajas, y donde la resistencia mecánica era de importancia secundaria. Estas aplicaciones todavía consumen grandes cantidades. Una tendencia más reciente y técnicamente más importante es el surgimiento de polímeros estructurales (tabla 5-4), de los que se pueden fabricar componentes y estructuras para soporte de carga, al menos para aplicaciones en que las temperaturas sólo son moderadamente altas, comúnmente de entre 150 y 250°C, o menores.

Tabla 13-1 Ventas de plásticos* (Estados Unidos) 1 000 Mg†

Plástico	1972	1997
ABS	388	630
Acrílico	208	270
Epoxy	78	
Nylon	67	665
Fenólico	652	
Policarbonato	25	75
Poliéster	416	765
Polietileno, baja densidad	2 372	7 050
Alta densidad	1 026	6 000
PET		1 700
Polipropileno	767	5 850
Poliestireno	1 240	2 900
Poliuretano	460	2 160
PVC y vinilos	2 326	6 350
Urea y melamina-formaldehído	411	

* Recopilado de *Modern Plastics*, enero de 1973 y enero de 1997. Para algunos plásticos los datos no están disponibles en un año dado.
† Mg = 1 000 kg = tonelada métrica = 2 200 lb.

Muchos de los principios analizados hasta este punto también se aplican a los polímeros; no obstante, hay diferencias suficientes para justificar un repaso de la estructura y propiedades de los polímeros, haciendo referencia a los conceptos previamente explorados para los metales.

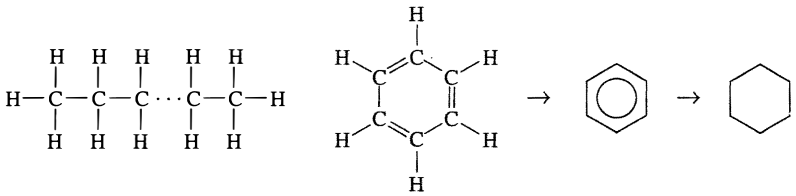
13-1 REACCIONES DE POLIMERIZACIÓN

Los polímeros, igual que los metales, se obtienen a partir de materias primas en plantas especializadas y se suministran a las industrias en formas adecuadas para su procesamiento para fabricar artículos terminados (Fig. 5-3). La manufactura primaria sólo se analiza hasta el grado necesario para comprender las propiedades de manufactura.

Hay muchas maneras de clasificar los polímeros, una de ellas se basa en la tecnología utilizada para fabricarlos. Los detalles rebasan el enfoque de este libro; será suficiente hacer notar que las macromoléculas se pueden obtener mediante una de las dos técnicas de procesamiento (Fig. 13-1):

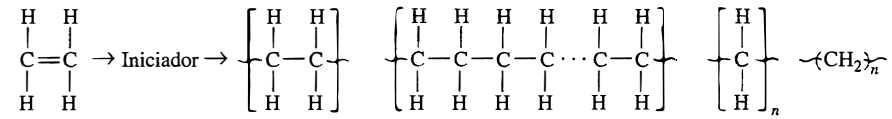
1. Polimerización en cadena. El carbono es un elemento tetravalente y sus cadenas se pueden formar con enlaces simples, dobles o triples entre los átomos adyacentes de carbono. El material inicial para la polimerización en cadena con frecuencia es un *monómero*, en el que hay un enlace doble que se puede abrir con la ayuda de un com-

HIDROC

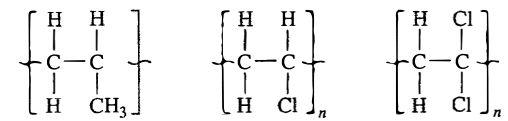


Parafina (alifática) Benceno (aromático) Representación simbólica (no se muestra el hidrógeno)

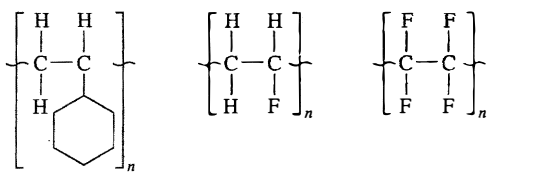
POLÍMEROS DE REACCIÓN



Monómero etileno unidad repetida Polímero: PE (Polietileno) presentación alterna

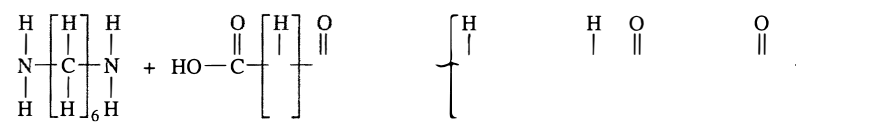


Polipropileno (PP) Cloruro de polivinilo (PVC) Cloruro de polivinilideno

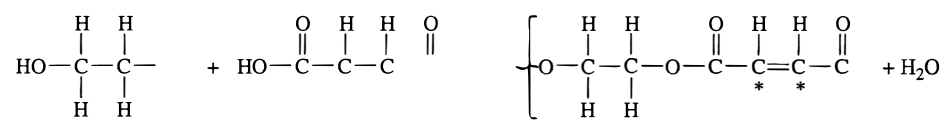


Poliestireno Fluoruro de polivinilo Politetrafluoetileno (PTFE)

POLÍMEROS



Hexametilén diamina + Ácido adípico Poliamida (nylon 6,6) + Agua



Etilén glicol (alcohol) + Ácido maleico Poliéster lineal insaturado (* sitio posible para enlace cruzado) + Agua

Figura 13-1 Los polímeros termoplásticos se componen esencialmente de moléculas lineales, formadas por polimerización de reacción en cadena (adición) o reacción en pasos (condensación). La presencia de enlaces dobles en el polímero, como en los poliésteres insaturados, hace posible la formación de enlaces cruzados.

puesto llamado *iniciador* (sustancia orgánica o inorgánica o un catalizador que no se consume en la reacción), después de lo que ocurre la polimerización simultáneamente en todo el lote en pocos segundos. Llevando a cabo a temperatura elevada y presión baja, el proceso también se conoce como *polimerización por adición*. Las estructuras más frecuentes son los hidrocarburos (Fig. 13-1), en los que el carbono y el hidrógeno pueden formar cadenas rectas (*hidrocarburos alifáticos*) o anillos de benceno (*hidrocarburos aromáticos*). Otras moléculas poliméricas también pueden contener N, O, S, P o Si (en la parte central o en las cadenas laterales), mientras que los elementos Cl, F o Br monovalentes pueden reemplazar al H. (Algunos de ellos se pueden reciclar mediante fraccionado a alta temperatura.)

2. Polímeros de reacciones por pasos. En la mayor parte de estos procesos se unen dos monómeros disímiles en grupos cortos que crecen gradualmente; a menudo también se libera un derivado de peso molecular bajo (agua en el ejemplo del nylon 6,6, Fig. 13-1), así que se acostumbra hablar de una *reacción por condensación*. (A menos que existan enlaces cruzados, algunos de estos polímeros son reciclables a través de la despolimerización: a una temperatura mayor, y en presencia de un agente reactivo, se pueden "abrir" para regenerar el monómero.)

De cualquier forma, el químico que trabaja con polímeros controla la longitud promedio de las moléculas al terminar la reacción. Así, el *peso molecular* (el peso promedio, en gramos, de 6.02×10^{23} moléculas) o *grado de polimerización* (número de meros en la molécula promedio) se puede controlar. Por ejemplo, la longitud de las moléculas varía de unas 700 unidades repetitivas en el polietileno de baja densidad (LDPE) a 170 000 en el polietileno de peso molecular ultraalto (UHMWPE).

13-2 POLÍMEROS LINEALES (TERMOPLÁSTICOS)

Todos los ejemplos mostrados en la figura 13-1 dan como resultado la formación de cadenas más o menos rectas; de ahí que estos polímeros sean llamados *polímeros lineales*.

13-2-1 Estructura de los polímeros lineales

En los metales, la unidad básica es el átomo, o cuando mucho la celda unitaria de un compuesto intermetálico; estas unidades se conforman fácilmente a un ordenamiento de largo alcance para constituir una estructura cristalina. La gran longitud de las moléculas poliméricas se combina con otras características espaciales para contribuir a una gran variedad de estructuras posibles. Aquí se analizan haciendo énfasis en la importancia de la estructura para la manufactura y las propiedades de servicio. Las moléculas de un polímero lineal no son simples cadenas rectas por las siguientes razones:

1. Aun la cadena más simple, la del polietileno (PE), no es recta. El enlace C—C forma un ángulo de enlace fijo igual a 109.5°. El espaciamiento entre los átomos de

carbono es 0.154 nm a lo largo del enlace, pero sólo de 0.126 nm en una línea recta. Así, una molécula de PE de 2 000 átomos de carbono tendría una longitud de 252 nm (o 0.25 μm) cuando se estira completamente. Sin embargo, el enlace sencillo entre los átomos de carbono permite la rotación alrededor de éste; así, la molécula se enrolla y tuerce en forma aleatoria, y la distancia promedio real de extremo a extremo es por lo general de sólo 18 nm. Una molécula como ésa no cabrá fácilmente en una estructura ordenada de largo alcance, y el polímero será *amorfo*.

2. Las cadenas de algunos polímeros, como la del HDPE, son uniformes cuando se estiran (Fig. 13-2*a*) mientras que otras, como la del polipropileno (PP), tienen grupos ramificados (en este caso, —CH_3) en ciertas posiciones. El orden (en griego: *taktika*) de estos grupos determina si el polímero es *isotáctico* (con todos los grupos en un lado de la columna, Fig. 13-2*b*), *sindiotáctico* (alternándose en los dos lados, Fig. 13-2*c*), o *atáctico* (configurados aleatoriamente, Fig. 13-2*d*). El grupo ramificado (un anillo de benceno) es aún mayor en el poliestireno (Fig. 13-1). El empaquetado compacto de las moléculas es obviamente más difícil, de modo que la flexibilidad se reduce si los grupos ramificados son grandes y están orientados de forma aleatoria. De esta manera, el PP atáctico es amorfo con escasas propiedades mecánicas, mientras que el PP isotáctico puede ser altamente cristalino, por lo que se utiliza mucho, hasta en aplicaciones de ingeniería.

3. Incluso las moléculas sencillas como el LDPE pueden no ser cadenas verdaderamente rectas, sino que tienen ramificaciones que incrementan aún más la dificultad de empacamiento compacto y el ordenamiento. Sólo algunos polímeros, como el LDPE lineal (LLDPE) o el HDPE polimerizado en presencia de catalizadores especiales y del politetrafluoetileno (PTFE), están libres de ramificaciones.

4. En los polímeros aromáticos, la presencia del anillo de benceno ofrece la posibilidad de crear una columna de doble filamento con enlaces cruzados regulares, parecida a una escalera (*polímero de escalera*). Como se deben romper dos enlaces antes de formar un producto de menor peso molecular, esas estructuras pueden ser altamente resistentes a la temperatura.

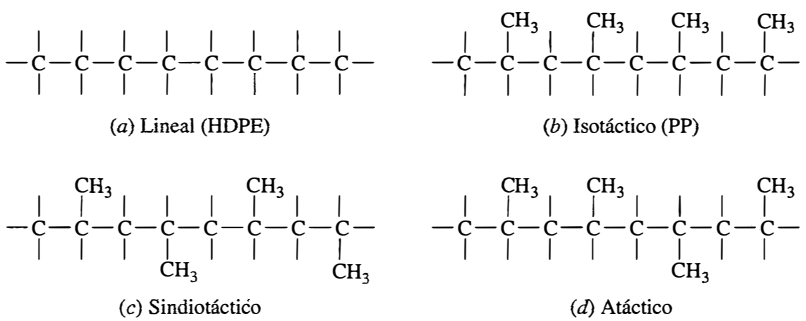


Figura 13-2 El tipo de columna y el ordenamiento (arreglo espacial) de los grupos ramificados alrededor de la columna determinan muchas propiedades de los polímeros lineales. Véase el texto para conocer el significado de varios arreglos. (Por simplicidad de presentación, no se muestran los átomos de hidrógeno.)

5. Los ejemplos mostrados en la figura 13-1 se componen de una clase única de unidades repetitivas y se llaman *homopolímeros*, inclusive si dichas unidades se componen de dos moléculas precursoras.

6. Es posible polimerizar dos tipos de monómeros (por lo general A y B) para obtener *copolímeros* (más exactamente, *copolímeros binarios*) en cierta forma análogos a las aleaciones de solución sólida. En los copolímeros cada unidad repetida es capaz de formar un polímero por su propia cuenta, como en un copolímero etileno-propileno. (Un polímero de tres componentes es un *copolímero ternario* o *terpolímero*; un ejemplo es el ABS, formado por los monómeros acrilonitrilo, butadieno y estireno.)

Las unidades repetidas pueden surgir en una secuencia *aleatoria* (AAABBABAABBA), *alternante* (ABABABAB) o de *bloque* (AAAAABBBBAAAABBBBBAAAA); o una especie se puede ramificar en un *polímero injerto*

AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA
B *B*
B *B*
B *B*
B *B*
B *B*

7. Dos polímeros miscibles, o un polímero y un monómero, se pueden combinar en una *aleación polimérica* homogénea. Existe una sola T_g y las propiedades con frecuencia exceden a las de los constituyentes.

8. Una posibilidad adicional es mezclar dos polímeros incompatibles (los cuales no entran en una cadena unida); uno de ellos funcionan como matriz. Esto se llama *combinaciones de polímeros* (*policombinación*, pero algunas veces también se denomina *aleaciones poliméricas*) y se consideran la contraparte polimérica de las aleaciones metálicas de dos fases. Hay dos valores diferentes de T_g. Las propiedades deseables de los polímeros constituyentes se combinan pero no necesariamente se exceden, como se verá más adelante en el ejemplo de los elastómeros termoplásticos. Cuando las dos redes de polímeros se interpenetran (*polímeros de redes interpenetrantes*), las propiedades se pueden mejorar de forma considerable.

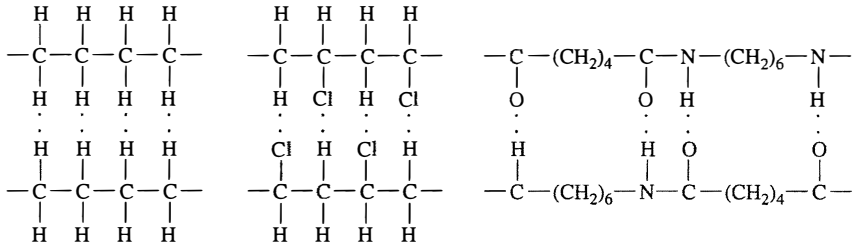
Ejemplo 13-1

Un UHMWPE tiene un peso molecular (PM) de 4 millones. Si esto se refiere al número promedio de moléculas, calcule el grado de polimerización y la longitud de la cadena estirada.

La unidad de construcción es el C_2H_4, de un peso molecular de $(2 \times 12) + (4 \times 1) = 28$. El grado de polimerización es 4 000 000/28 = 143 000 (esto es muy grande; el del PTFE es casi siempre 30 000). La longitud de la molécula sería (143 000)(1.26) = 18 000 nm = 18 μm. Por supuesto, se verá que estará plegada, como en la figura 13-4*b*.

13-2-2 Fuentes de resistencia

Una pieza de ingeniería consiste de muchas macromoléculas. El enlace *dentro* de cada molécula lo proporcionan los electrones compartidos entre átomos adyacentes (*enlace*



(*a*) PE (*b*) PVC (*c*) Nylon-6,6

Figura 13-3 Los polímeros deben su resistencia a los enlaces secundarios entre las moléculas: (*a*) fuerzas débiles van der Waals entre moléculas no polares, (*b*) enlaces dipolares entre moléculas polares y (*c*) el enlace fuerte de hidrógeno entre H y O, N o F.

covalente). La energía de enlace (la que se requiere para romper una mol, es decir, 6.02×10^{23} enlaces) es del orden de 350 a 830 kJ/mol, lo cual hace que sea muy fuerte la molécula. Sin embargo, esto nos dice poco acerca de la resistencia real de una pieza polimérica; para apreciar la resistencia, o su carencia en ciertos polímeros, se deben investigar las fuerzas que mantienen unida a la multitud de moléculas. El enredo es el responsable de parte de la resistencia, pero la causa predominante es la presencia de *enlaces secundarios*. Éstos son de distintas clases:

1. Al menos, siempre están presentes las *fuerzas de Van der Waals*, aunque sean muy débiles (2 a 8 kJ/mol) (Fig. 13-3*a*).

2. Cuando los átomos comparten electrones en enlaces covalentes, el que los pierde parece tener una carga positiva y viceversa; de esta manera se establece un dipolo permanente (la molécula tiene un carácter polar). Las moléculas polares, como las que contienen valencias libres de Cl, F u O, forman *enlaces dipolares* más fuertes (6 a 13 kJ/mol) (como en el policloruro de vinilo, PVC, Fig. 13-3*b*).

3. El *enlace del hidrógeno*, establecido entre el hidrógeno y el O, el N o el F, es un caso especial de enlaces dipolares. La energía de enlace es grande (13 a 30 kJ/mol), como en el nylon 6,6 (Fig. 13-3*c*).

El número de enlaces secundarios se incrementa con la longitud de la cadena, dando resistencia al cuerpo. De esta manera, los enlaces secundarios son fuentes de resistencia. Al mismo tiempo, a temperaturas mayores —donde la excitación térmica es significativa y los enlaces secundarios se rompen y se reforman fácilmente— permiten que las moléculas se muevan unas con respecto a otras. La facilidad del movimiento depende del número de enlaces secundarios presente; los plásticos de cadena muy larga, como el UHMWPE y el PTFE, pueden carbonizarse aun antes de alcanzar el estado moldeable.

Ejemplo 13-2

El polietileno de alta densidad se fabrica en un amplio intervalo de pesos moleculares para satisfacer diversas necesidades.

	Peso molecular
Resina de grado comercial (moldeo por inyección)	80 000
Resina de moldeo por soplado	120 000
resina de alto rendimiento	200 000-500 000
UHMWPE	4 000 000

13-2-3 Polímeros cristalinos y amorfos

Cuando los polímeros lineales se calientan hasta una temperatura elevada (pero no a una que rompa los enlaces primarios), se puede visualizar una masa de moléculas de polímero como un plato de espagueti. Como no existe ordenamiento de largo alcance, el polímero es amorfo (Fig. 13-4*a*). Sin embargo, la comparación con el espagueti es incompleta. Bajo la influencia de la temperatura elevada, las moléculas están en movimiento constante y el volumen libre (espacio dentro del polímero) es grande. Al enfriarse, puede ocurrir una de dos situaciones.

Cristalización Si la molécula es de forma relativamente simple, con regularidad química a lo largo de la cadena y las condiciones son favorables, se puede desarrollar un ordenamiento de largo alcance: el polímero comienza a cristalizarse al enfriarse por debajo del punto de fusión T_m. Igual que en los metales (Secc. 6-1-7), el proceso inicia con la nucleación seguida del crecimiento. Ello implica el plegado repetido de cadenas en *laminillas* delgadas, con un espesor aproximado de 10 nm, con reentrada ordenada (Fig. 13-4*b*) o aleatoria (Fig. 13-4*c*). Los cristales crecen en las dos dimensiones laterales y varias laminillas que crecen de un núcleo común forman una *esferulita* (Fig. 13-4*d*). Las regiones adyacentes se mantienen unidas por *moléculas de sujeción*. Una cristalinidad perfecta, como la que se encuentra en los metales y los cerámicos, nunca se

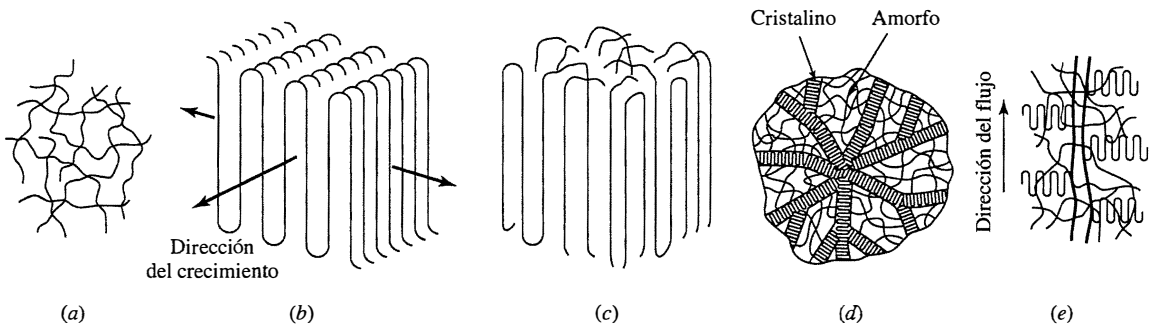


Figura 13-4 Las moléculas lineales pueden estar arregladas (*a*) aleatoriamente (polímeros amorfos) o en laminillas delgadas cristalinas con reentrada (*b*) ordenada o (*c*) aleatoria. Las laminillas que crecen desde un núcleo común forman (*d*) esferulitas en una matriz amorfa. Las laminillas están (e) orientadas en cristales que crecen durante la deformación.

consigue; siempre existe algún material amorfo entre las esferulitas. Así, el término *polímero cristalino* se refiere a una estructura en la cual predominan las regiones cristalinas. Durante la formación de las zonas cristalinas ocurre la disminución correspondiente en el volumen específico (Fig. 13-5*a*), pero no es tan pronunciada ni tan completa como en los metales (Fig. 6-1*d*). Las propiedades mecánicas, como el módulo de elasticidad, también se ven afectadas en gran medida por la cristalinidad (Fig. 13-5*b*). Si el polímero se deforma mientras se enfría por debajo de T_m, las cadenas de los polímeros se orientan y se forman cristales con el pliegue en dirección del flujo (*estructura nucleada en filas*, Fig. 13-4*e*).

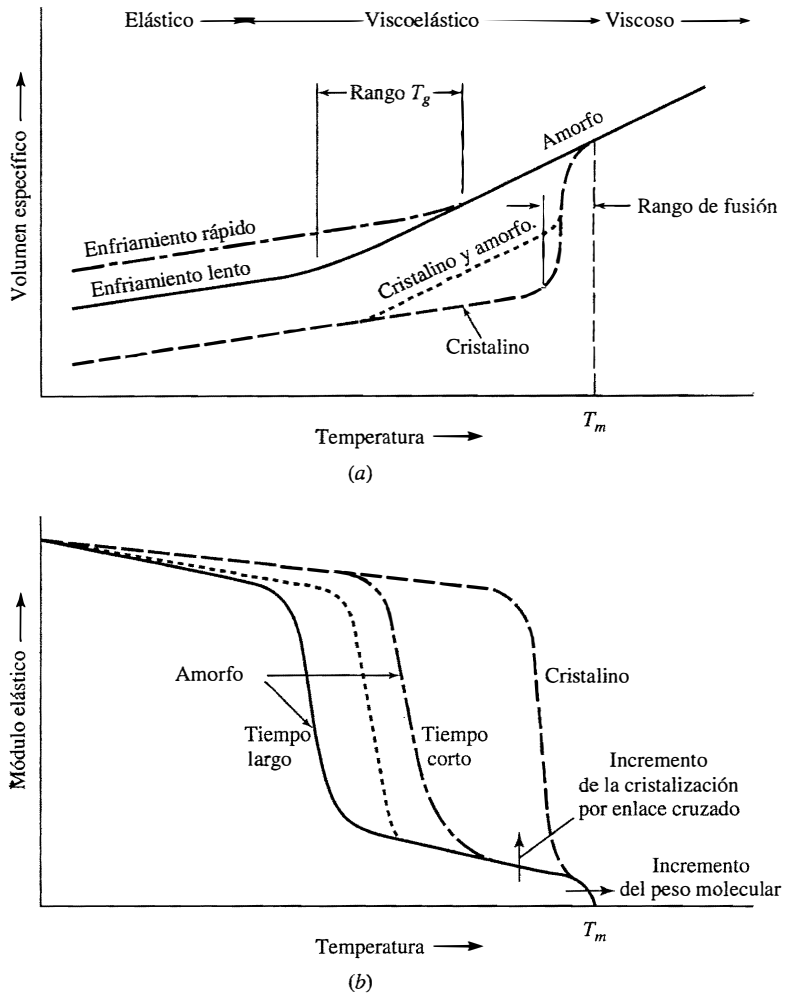


Figura 13-5 Los cambios estructurales en los polímeros termoplásticos se reflejan en transformaciones en el volumen específico (*a*), y en las propiedades mecánicas que dependen del tiempo y de la temperatura, ejemplificadas aquí por el módulo de elasticidad (*b*).

El grado de cristalinidad depende de muchos factores. Es mayor para los polímeros formados por meros de forma regular, sin ramificaciones laterales o grupos ramificados. Si éstos existen (Fig. 13-2), la forma isotáctica se cristalizará más fácilmente que la atáctica. Por las mismas razones, los copolímeros en general, y los polímeros aleatorios y de injerto en particular, no se cristalizan. Como se necesita tiempo para que las moléculas se plieguen, el enfriamiento más lento promueve la cristalización. Para la cristalización rápida de la fusión, la temperatura del molde se fija a $(T_m + T_g)/2$. Arriba de T_g, la cristalización puede continuar por un periodo prolongado. Esto causa contracción posterior, como en el nylon 6,6, el cual tiene una T_g por debajo de la temperatura ambiente. El calentamiento a temperaturas elevadas provoca la terminación rápida de la cristalización.

La rapidez de enfriamiento afecta el tamaño de las esferulitas. Como en los metales, la rapidez de crecimiento alcanza su máximo a una temperatura mayor que la rapidez de nucleación; en consecuencia, las esferulitas se vuelven más gruesas a una rapidez de enfriamiento menor. La rapidez de nucleación se puede incrementar y así el tamaño de las esferulitas se reduce mediante la germinación, por ejemplo, con sílice muy fina (nucleación heterogénea).

La alineación mecánica inducida por la deformación direccional, como en el estirado o extrusión, también contribuye a la cristalización; asimismo, la direccionalidad pronunciada de la estructura (textura, Secc. 8-1-3) propicia una direccionalidad (anisotropía) de las propiedades, con mayor resistencia en la dirección de la longitud de las moléculas.

Polímeros amorfos Si las estructuras y las condiciones del proceso son desfavorables para la cristalización, el polímero continúa enfriándose mientras permanece amorfo. El volumen específico baja a la rapidez usual del estado fundido (Fig. 13-5*a*); aunque la excitación de las moléculas se reduce, aún se pueden mover una respecto a la otra para reducir el volumen libre y en algunos casos se pueden formar enlaces secundarios adicionales. La libertad de movimiento se pierde a una temperatura característica llamada, como en los vidrios (Secc. 12-5-1), *punto fictivo* o *temperatura de transición vítrea,* T_g. No se establecen enlaces adicionales y el volumen específico cambia a una rapidez mucho menor, como resultado del movimiento térmico reducido de las moléculas fijas en el espacio. La situación se semeja a la de los metales en que T_g a menudo es de alrededor de $0.5T_m$ (éstas son temperaturas homólogas, Secc. 4-6). Ya se vio que en los metales el inicio del comportamiento en caliente puede ocurrir a temperaturas mayores por medio de la aleación. De igual manera, T_g también se puede desplazar sustancialmente. Es de alrededor de $0.66T_m$ para los homopolímeros usuales, puede disminuir hasta $0.25T_m$ en los copolímeros en bloque, y llegar a un valor de $0.9T_m$ en los copolímeros aleatorios. En contraste con los metales, la estructura molecular abierta provoca un incremento sustancial de T_g con el aumento de la presión.

Polímeros de cristal líquido Una clase menor pero importante de polímeros termoplásticos se distingue porque las moléculas en forma de varilla se alinean paralelas en el estado líquido. Al solidificarse, las moléculas se atraen más entre sí, pero conservan su orientación; de ahí que prácticamente no haya contracción en la dirección longitudinal y que las dimensiones sean muy estables.

13-2-4 Reología de los polímeros lineales

La *reología* de los polímeros (del griego *rheos* = flujo) estudia su respuesta a los esfuerzos, la cual es una función de la estructura y de la temperatura.

Flujo viscoso Arriba de T_m, las moléculas pueden moverse, deslizarse unas respecto a las otras, y los polímeros de bajo peso molecular pueden presentar flujo viscoso newtoniano (Fig. 7-5*b*, repetida aquí como Fig. 13-6*a*), el cual está sujeto a la ecuación (7-1), repetida aquí debido a su importancia:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dh} = \eta\dot{\gamma} \qquad \textbf{(13.1)}$$

La viscosidad aumenta con el incremento del peso molecular debido al mayor número de enlaces secundarios disponibles a lo largo de una cadena más larga (para muchos polímeros de alto peso molecular, la viscosidad es proporcional a la potencia 3.4 del peso molecular promedio).

La viscosidad también es función de la estructura molecular. El enredo, una estructura menos abierta (menos cadenas laterales), y una rotación restringida del segmento molecular (menor flexibilidad de la cadena) contribuyen a una viscosidad más amplia, mientras que una distribución más amplia del peso molecular (lo cual implica la presencia de cadenas más cortas) conduce a una viscosidad menor.

La viscosidad se eleva con la disminución de la temperatura, debido al decremento del volumen libre y a la aminorada movilidad de las moléculas. Igual que en los proce-

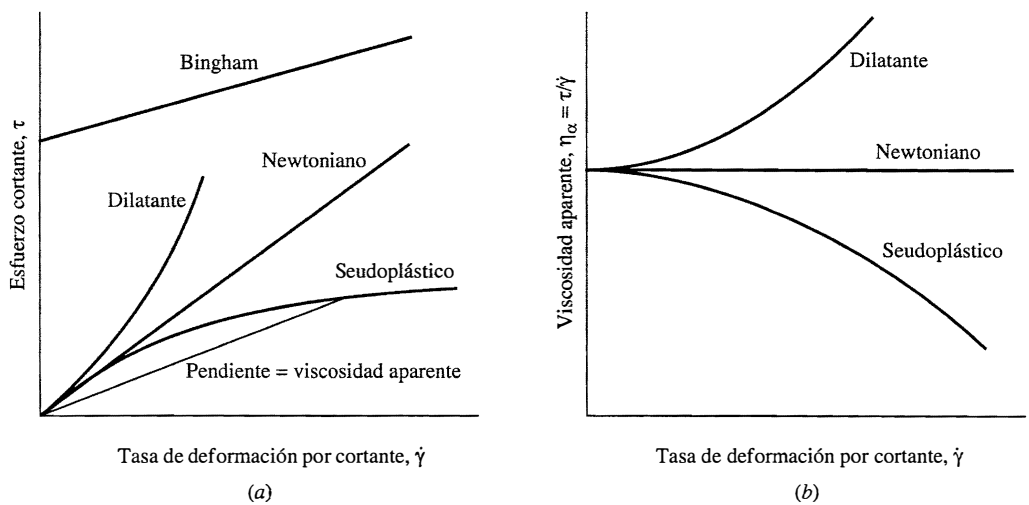


Figura 13-6 Muchos plásticos presentan flujo seudoplástico (*a*), además la viscosidad aparente declina con el aumento de la tasa de deformación por el esfuerzo cortante (*b*).

sos térmicamente activados en general, la viscosidad cambia en forma exponencial con el inverso de la temperatura

$$\eta = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \tag{13.2}$$

donde A es una constante del material, E la energía de activación, R la constante universal del gas ideal y T la temperatura (K).

La variación de viscosidad con la temperatura se puede expresar al considerar el cambio en el volumen libre; esto conduce a la ecuación de Williams-Landel-Ferry (WLF). Con constantes determinadas experimentalmente, adquiere la siguiente forma:

$$\log_{10}\left(\frac{\eta_T}{\eta_{T_g}}\right) = \frac{-17.44(T - T_g)}{51.6 + (T - T_g)} \tag{13.3}$$

donde T es la temperatura de interés (K), y η_T y η_{T_g} son las viscosidades a T y T_g, respectivamente. La importancia de la temperatura de transición vítrea es obvia.

Las moléculas se desenrollan al someterse al esfuerzo cortante; al reducirse el enrrollamiento se desenmarañan y por lo tanto, disminuye la viscosidad. Así, la mayoría de los polímeros presentan flujo no newtoniano: el esfuerzo cortante necesario para la deformación es una función no lineal de la tasa de la deformación por cortante (Fig. 13-6*a*). En otras palabras, la viscosidad no es una constante sino que varía con la tasa de deformación (Fig. 13-6*b*). Muchos polímeros son seudoplásticos (Fig. 13-6*a*) y obedecen la ley de potencia

$$\tau = \eta_a \dot{\gamma}^m \tag{13-4}$$

donde $m < 1$. La similitud con la ecuación (8-11) (esfuerzo de fluencia en el trabajo en caliente de un metal) es evidente, excepto que la ecuación (13-4) está escrita en términos del esfuerzo cortante τ y de la rapidez de la deformación por cortante $\dot{\gamma}$. Respecto a los metales, el exponente de la sensibilidad a la tasa de deformación m de un polímero seudoplástico es negativo y alcanza valores cercanos a la unidad a temperaturas por arriba de T_m.

Para propósitos de cálculo es conveniente expresar una *viscosidad aparente* η_a como el esfuerzo cortante a una tasa dada de deformación (Fig. 13-6*a*)

$$\eta_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \tag{13-5}$$

Ésta no es una constante, sino una función de la tasa de deformación por cortante (Fig. 13-7*a*), de la temperatura (Fig. 13-7*b*) y de la presión (no se muestra). Como la viscosidad representa la resistencia al deslizamiento de las moléculas,

$$\eta \ \alpha \frac{\text{enredo}}{\text{volumen libre}} \tag{13-6}$$

y como la presión se reduce mientras que la temperatura T (arriba de T_g) incrementa el volumen libre, los efectos combinados de la temperatura, la presión, el peso molecular y, para un peso molecular dado, el ordenamiento, se puede expresar cualitativamente como:

$$\eta \propto \frac{\text{presión}}{(T - T_g)} \frac{\text{peso molecular}}{\text{ramificaciones laterales de las cadenas largas}} \qquad \textbf{(13-7)}$$

Generalmente un aumento de la presión de 100 MPa es equivalente a una disminución de la temperatura de entre 30 y 50°C. Muchos polímeros se comportan como sustancias de Bingham (Fig. 13-6*a*) y comienzan a fluir de manera viscosa sólo después de que se ha impuesto cierto esfuerzo cortante inicial; éste se eleva con la presión. Otros son tixotrópicos: su viscosidad disminuye con el tiempo a una tasa constante de deformación.

Para propósitos prácticos de procesamiento, es preciso conocer las propiedades de flujo de los polímeros en condiciones reales. Así, el esfuerzo cortante se determina como una función de la temperatura y de la tasa de deformación en *reometros de par*. Para algunos polímeros, se proporciona el *índice de flujo de la fusión* ("melt index"), el cual es simplemente la masa del plástico (en gramos) que se extruye en 10 min a través de un orificio estándar (ASTM D1238), a una presión de 300 kPa a una temperatura específica (190°C para el PE y 230°C para el PP). De esta manera, el índice de fusión está inversamente relacionado con la viscosidad, y es adecuado para comparar diferentes grados del mismo tipo de polímero.

Con la imposición de una carga, un material viscoso se deforma a una rapidez dictada por su viscosidad. Cuando la fuerza cortante se retira, el material permanece con deformación permanente, de ahí que se pueda modelar mediante un amortiguador en el que un émbolo se desplaza contra la resistencia ejercida por el cortante de un aceite

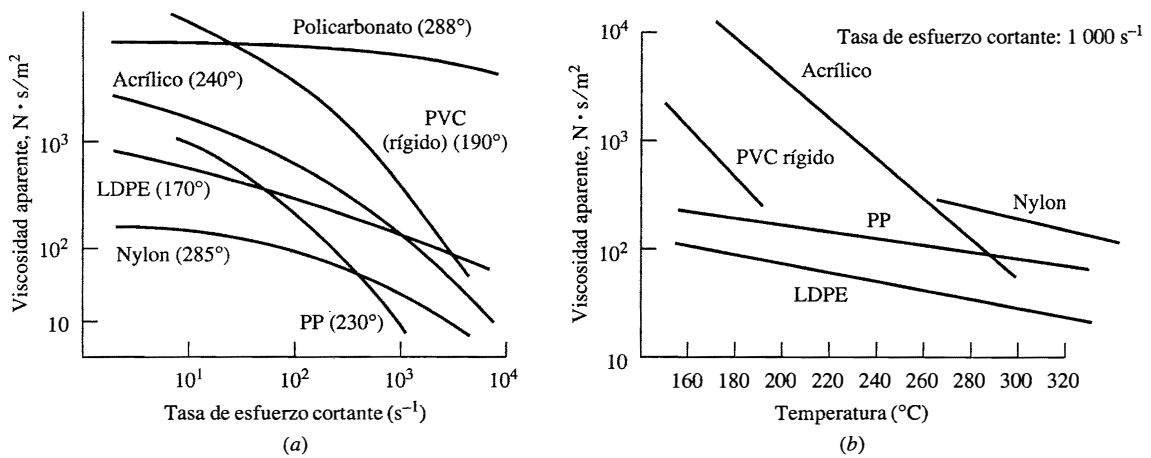


Figura 13-7 La viscosidad aparente de los polímeros es altamente sensible a la (*a*) tasa de deformación por esfuerzo cortante, y (*b*) la temperatura. (*De D.H. Morton-Jones: Polymer Processing, Chapman & Hall, p. 40, Fig. 2.5 y p. 41, Fig. 2.6. Se reproduce con autorización.*)

(Fig. 13-8*a*). Se debe notar que de acuerdo con la ecuación (13-1) la deformación ocurrirá, sin importar lo lento que ésta puede ser, aun bajo la imposición de la carga más ligera. Por lo tanto, *la temperatura limitante para uso estructural está por debajo de T_m en los polímeros altamente cristalinos y por bastante debajo de T_g para polímeros amorfos.*

Deformación elástica Cuando la temperatura disminuye por debajo de T_m para un polímero altamente cristalino, o bien por debajo T_g para un polímero amorfo, no hay movilidad de la cadena (excepto en una escala de tiempo muy grande). Con la imposición de una carga, el polímero se deforma sólo elásticamente, y las dimensiones originales se reestablecen de inmediato después de retirar la carga. El polímero se comporta como un resorte (Fig. 13-8*b*). Por analogía con la ecuación (4-5), el esfuerzo cortante τ es

$$\tau = G\gamma \tag{13-8}$$

donde G es el *módulo de elasticidad en corte* y γ la deformación por cortante. Esto se relaciona con E de acuerdo con

$$G = \frac{E}{2(1+\upsilon)} \tag{13-9}$$

donde υ es el módulo de Poisson y varía de 0.25, para polímeros rígidos, a 0.5 para los flexibles.

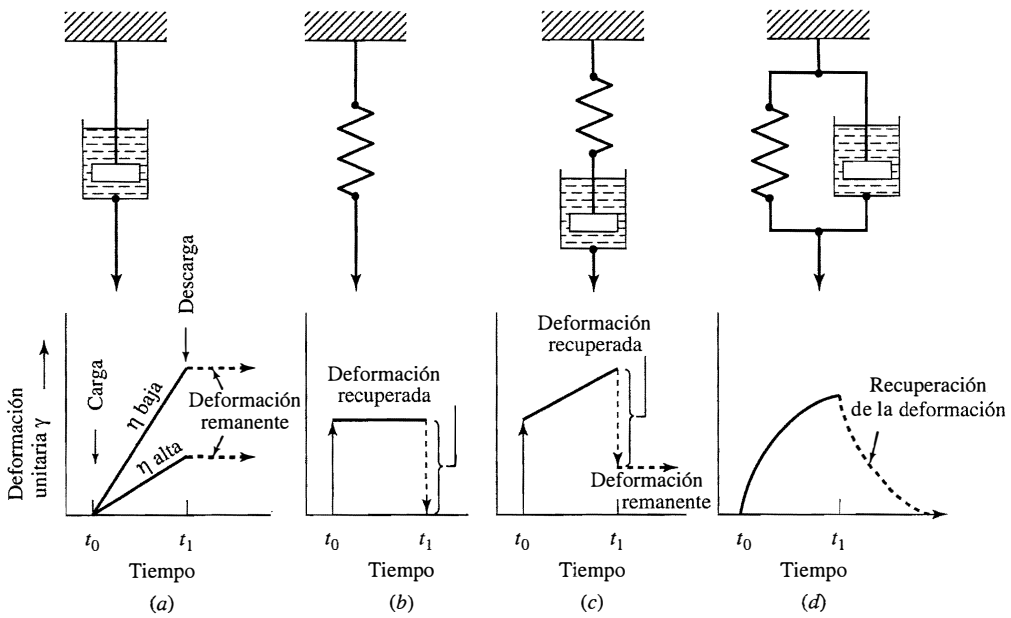


Figura 13-8 La deformación de los polímeros sigue las reglas del (*a*) flujo viscoso, de la (*b*) deformación elástica, o del flujo viscoelástico, de acuerdo con el modelo de (*c*) Maxwell o de (*d*) Voigt (Kelvin). (*Nota*: la carga se aplica en un tiempo t_0 y se quita en un tiempo t_1.)

Como la deformación elástica en un polímero está acompañada por el alargamiento de los enlaces intermoleculares relativamente débiles, es posible tener una deformación elástica mucho mayor que en los metales. Sin embargo, si el esfuerzo excede un valor crítico (la resistencia a la tensión), la pieza se rompe de manera frágil (Fig. 4-4*a*); en consecuencia se habla de comportamiento *elástico vítreo* o frágil. Un polímero con esas características es útil como un material de construcción en ingeniería, ya que mantendrá su forma bajo las cargas impuestas, pero su fragilidad (falta de tenacidad, baja resistencia al impacto con muesca) es una desventaja en muchas aplicaciones. Obviamente, los polímeros se pueden procesar en este intervalo de temperatura sólo por medio del maquinado.

Flujo viscoelástico Los polímeros amorfos de bajo peso molecular presentan *viscoelasticidad* por debajo de T_g y por arriba de T_m. La movilidad incrementada de las moléculas permite que ocurra alguna deformación —además del deslizamiento relativo de las moléculas entre sí— por medio del desenrollado y estiramiento de las moléculas, del movimiento cooperativo de los segmentos moleculares o de su rotación alrededor de enlaces sencillos (como el C—C). Así, después de retirar la carga, se recupera algo de la deformación elástica (el polímero tiene *memoria*), pero parte de ella puede permanecer como flujo viscoso.

El comportamiento viscoelástico se puede describir a través de varios (y a menudo complejos) modelos. Entre los más simples se encuentra el *elemento de Maxwell* (un amortiguador y un resorte en serie, Fig. 13-8*c*), en el cual la deformación elástica (resorte) inicial es seguida por el flujo viscoso y la componente elástica se reestablece inmediatamente después de la descarga. La deformación ocurre con una tasa

$$\frac{d\gamma}{dt} = \dot{\gamma} = \frac{d\tau}{dt}\left(\frac{1}{G}\right) + \frac{1}{\eta}\tau \qquad \textbf{(13-10)}$$

Alternativamente, el polímero se puede describir mediante un *elemento de Voigt* (un amortiguador y un resorte en paralelo, Fig. 13-8*d*), en el que la deformación elástica es amortiguada por el flujo viscoso en el amortiguador y sólo se recupera poco a poco después de la descarga. El esfuerzo activo es

$$\tau = G\gamma + \eta\frac{d\gamma}{dt} \qquad \textbf{(13-11)}$$

Los modelos realistas de los polímeros normalmente requieren varios elementos de Maxwell y de Voigt que actúen en serie y/o paralelo. Esto explica por qué el módulo en la figura 13-5*b* es una función no sólo de la temperatura, sino también del tiempo: después de una carga rápida, hay menos tiempo para el flujo viscoso y el módulo es mayor.

Ejemplo 13-3

Las fundas termoencogibles se venden en estado expandido (es decir, se expandieron a una temperatura elevada y se enfriaron a temperatura ambiente, donde su forma es estable). Al calen-

tarse se contraen. Para contracción máxima, ¿es mejor tener un comportamiento caracterizado por un elemento de Maxwell o por uno de Voigt?

En un elemento de Maxwell (Fig. 13-8*c*), la deformación que corresponde al flujo viscoso es irreversible. En un elemento de Voigt el resorte está en paralelo con el amortiguador y si disminuye la viscosidad del fluido en este último (al calentar al polímero), el primero lo jalará hacia atrás. Por lo tanto, el elemento de Voigt es más adecuado.

Debido al componente del fluido viscoso, los polímeros se pueden procesar en el régimen viscoelástico de temperatura. El comportamiento de los polímeros amorfos por arriba de T_g se denomina *ahulado*. Es importante que estos polímeros se enfríen bien por debajo T_g antes de liberarlos del molde, de manera que el nuevo arreglo molecular se congele. No obstante, esto significa que no se debe permitir que la parte se caliente por arriba de T_g en uso, porque la distorsión, debida a la recuperación de la deformación elástica, continuará. En los polímeros parcialmente cristalinos, la deformación provoca una fragmentación de las regiones cristalinas, un estiramiento de las moléculas de sujeción y un ordenamiento de los fragmentos de cristal (Fig. 13-9); esto inhibe la deformación por arriba de T_g (comportamiento *correoso*). En consecuencia, los polímeros sustancialmente cristalinos (con al menos 50% de fase cristalina) se pueden emplear por arriba de su T_g (ése es el caso para PE y PP).

Desde el punto de vista de la manufactura, los comportamientos viscoso y viscoelástico son de extrema importancia. En tensión, es posible una elongación total muy amplia: Aunque una estricción puede aparecer solamente después de una elongación uniforme de entre 2 y 15%, la estricción es resistente a la fractura debido a los efectos de la tasa de deformación y del reforzamiento debido a la alineación de las moléculas (Secc. 8-1-6 y Fig. 4-16). Es factible formar estricciones sucesivas, por lo que la elongación total de varios cientos e incluso de miles de porcentajes, se pueden obtener antes de que ocurra la fractura.

Polímeros termoplásticos A partir del análisis anterior, es evidente que el comportamiento de los polímeros lineales se ve afectado en gran medida por la temperatura.

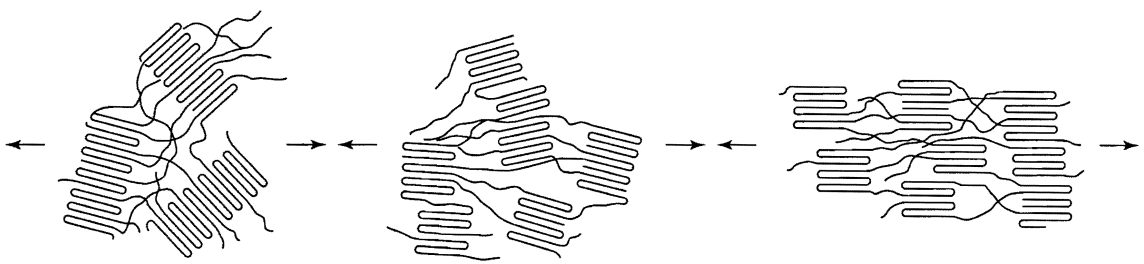


Figura 13-9 La deformación de un polímero parcialmente cristalino provoca el rompimiento y la orientación de las laminillas.

Cuando un polímero amorfo se calienta por arriba de T_g (o uno cristalino por arriba de T_m), se vuelve deformable y retiene su forma al enfriarlo debajo de esa temperatura. La secuencia de calentamiento y enfriamiento se puede, en principio, repetir; así que se acostumbra hablar de polímeros *termoplásticos*. Es posible formar un polímero como ése hasta una forma semifabricada (pastilla, barra, tubo, lámina o película), que luego se enfría y se envía al fabricante secundario, quien lo recalienta y conforma hasta la forma final. El desperdicio limpio se puede reciclar agregándole un polímero virgen, al menos hasta un punto limitado (aunque puede ocurrir una degradación).

El enlazamiento cruzado de los polímeros termoplásticos ya formados es factible por medio de la aplicación de radiación de alta energía, como luz ultravioleta (UV), haces de electrones, rayos γ, rayos x, y haces de partículas. El enlazamiento cruzado por radiación se aprovecha para incrementar la resistencia, como la del aislamiento de alambres y cables, o para dotar al polímero de una capacidad para cambios importantes de forma, como en las fundas y películas termoencogibles. La exposición excesiva conduce a la degradación concurrente en cadena, a la oxidación y a la formación de gas; entonces se habla de *degradación por radiación* del polímero.

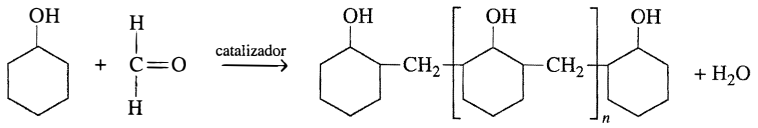
Ejemplo 13-4

El tubo termoencogible de PE se fabrica provocando enlaces cruzados en un tubo extruido, después se calienta, se dilata y se enfría. Cuando se recalienta, regresa a su diámetro original con enlaces cruzados.

13-3 POLÍMEROS CON ENLACES CRUZADOS (TERMOESTABLES)

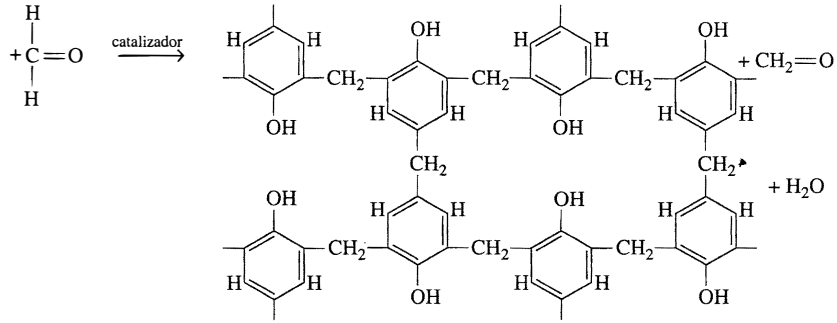
En los polímeros lineales analizados hasta ahora, los enlaces covalentes existían únicamente *dentro* de las moléculas y éstas se vinculaban entre sí mediante enlaces secundarios que se podían romper y reformar durante la deformación. Cuando los enlaces covalentes se establecen *entre* las moléculas, están firmemente enlazados uno al otro, por lo que el rompimiento del enlace resultaría en la falla.

Por lo tanto, los *polímeros termoestables* o *termofijos* se llaman así porque una vez que se completa la polimerización (el polímero se *cura*, por ejemplo, con la aplicación de calor o con un catalizador) no es posible una deformación adicional. La densidad de enlaces cruzados es tan alta que tampoco es posible una deformación elástica significativa; el polímero es frágil pero tiene un módulo elástico y una resistencia a la temperatura relativamente altos. Los enlaces covalentes forman una *red espacial*, como en el fenol formaldehído (Fig. 13-10) y las resinas termoendurecibles de poliéster, lo que fija permanentemente la forma de la pieza. El calentamiento prolongado de un polímero curado a una temperatura relativamente baja causa un enlazamiento cruzado adicional; un polímero completamente enlazado no se ve afectado. Una vez que un polímero termoestable se cura, el único cambio posible es la destrucción de los enlaces por medio del sobrecalentamiento (Fig. 13-11), lo cual resulta en la formación de una masa carbonosa (*ceniza*). El desperdicio no se puede reciclar, excepto como relleno molido.



Fenol + Formaldehído

Resina fenólica prepolimérica (novolac) (etapa A)



Resina de fenol formaldehído con enlaces cruzados (etapa C)

Figura 13-10 El fenol formaldehído es el primer ejemplo de un polímero termofijo de red espacial.

Se debe notar que no es necesario completar la polimerización y la degradación en un paso único hasta la etapa final.

1. Con algunos termofijos es posible polimerizar de manera parcial los materiales precursores en una resina lineal mayormente monomérica de *etapa A*.

2. Después de agregar rellenos, colorantes y algunos agentes de curado (también llamados, incorrectamente, catalizadores), se forma un *prepolímero* u *oligómero* (*resina de etapa B*), el cual se suministra al fabricante secundario. Esta resina es estable a

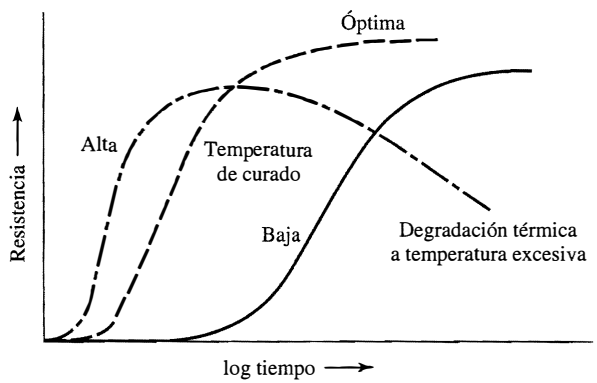


Figura 13-11 La formación de enlaces cruzados y la polimerización se aceleran mediante la temperatura, pero las temperaturas excesivamente altas causan la destrucción del polímero.

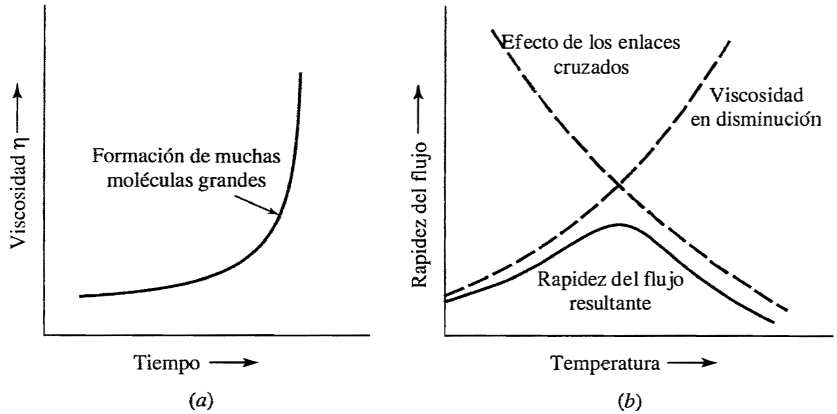


Figura 13-12 Cuando los prepolímeros termofijos se moldean, (*a*) la viscosidad aumenta repentinamente cuando se forman muchas moléculas grandes, y (*b*) la rapidez máxima del flujo se consigue a una cierta temperatura óptima.

temperatura ambiente y puede ser termoplástica por un tiempo limitado a temperatura elevada.

3. Así, la polimerización final y la formación de enlaces cruzados (*etapa C*) ocurren después de moldear en la forma deseada, bajo la influencia de calor o de agentes de curado.

La viscosidad de los monómeros o de las resinas de etapa B no suele ser excesivamente alta, pero se eleva repentinamente cuando, bajo la influencia de los agentes de curado o del calor, se forman muchas moléculas grandes (Fig. 13-12*a*). Debido a que la formación de enlaces cruzados y la polimerización suceden simultáneamente con el flujo del material hacia el molde, la reología de los termofijos se complica, por lo que la tasa máxima de flujo se obtiene a una temperatura intermedia (Fig. 13-12*b*).

La diferencia esencial entre los polímeros termoplásticos y los termoestables es, entonces, que *el polímero termoestable se calienta para estabilizar su forma,* mientras que *el polímero termoplástico se calienta para hacerlo moldeable y debe ser enfriado para fijar su forma.*

13-4 ELASTÓMEROS

Los *elastómeros* son una clase especial de polímeros. Cuando se someten a una carga de tensión, son capaces de extensiones de un mínimo de 200%, y a menudo de más de 500%. Luego de retirar la carga, toda la deformación se recupera: el elastómero se comporta como un resorte. Los elastómeros son básicamente de dos tipos.

Elastómeros termofijos Están hechos de polímeros lineales amorfos y se usan por arriba de su T_g. La unidad de repetición debe contener un enlace doble que se pueda

abrir para establecer *enlaces cruzados*. Una vez establecidos éstos, a estos elastómeros no se les puede dar forma posteriormente. Toda la estructura es una sola molécula gigante. Las propiedades dependen de la unidad de repetición y del grado de enlazamiento cruzado.

El grupo —CH_3 en el poliisopreno (Fig. 13-13*a*) presenta mayor resistencia a la deformación y cuando las cadenas principales forman enlaces cruzados (*vulcanizan*) con azufre, se obtienen propiedades altamente deseables. (El descubrimiento accidental del enlazamiento cruzado del *caucho natural* con azufre, hecho por Charles Goodyear en 1839, sentó las bases de la industria del caucho.) Cuando se forman sólo algunos enlaces cruzados, digamos entre cada 500 y 1 000 unidades de repetición (como en los guantes de caucho), las moléculas enrolladas no sólo se desenrrollan, sino que también se mueven entre sí tan lejos como lo permitan los enlaces cruzados (Fig. 13-13*b*). Un nivel creciente de enlaces cruzados (digamos cada 20 o 50 meros) vuelve al caucho más duro adecuado, por ejemplo, para neumáticos automotrices.

Como no hay grupo —CH_3 en el polibutadieno, un *caucho butadieno sintético* tiene menor resistencia mecánica y menos resistencia al desgarre. Al añadir estireno se obtiene un copolímero de propiedades superiores que también puede formar enlaces cruzados (Fig. 13-13*c*); el poliuretano también muestra este comportamiento (Fig. 13-13*d*).

Ejemplo 13-5

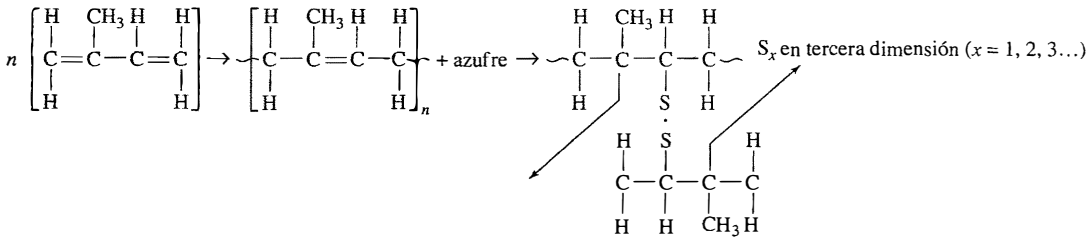
Calcule la cantidad de azufre necesaria para establecer un enlace cruzado cada 10 meros de poliisopreno. Suponga que sólo un átomo de azufre se involucra en cada enlace cruzado.

Cada mero de isopreno (C_5H_8) tiene un peso molecular de $(5 \times 12) + 8 = 68$ g. El azufre tiene un peso molecular de 32 g. Como se va a hacer un enlace cruzado cada 10 meros, la fracción en peso del azufre es

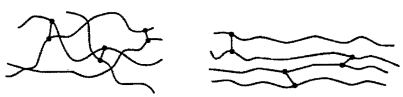
$$\frac{32/10}{(32/10)+68} = \frac{3.2}{71.2} = 0.045$$

o 4.5% del caucho vulcanizado. Como se muestra en la figura 13-13*a*, el azufre por sí mismo forma cadenas y por esta razón, se necesitará una proporción mayor de azufre.

Elastómeros termoplásticos El desarrollo de los elastómeros termoplásticos es más reciente. Éstos deben sus propiedades elásticas no a los enlaces covalentes cruzados, sino a la *presencia de regiones vítreas en una matriz amorfa*. Es el caso de los copolímeros de bloque estireno-butadieno (Fig. 13-13*c*): los segmentos de estireno se congregan para formar regiones vítreas semejantes al poliestireno con alta T_g las cuales actúan como puntos de anclaje similares a los enlaces cruzados, en las regiones ahuladas semejantes al polibutadieno (Fig. 13-13*e*). Los copolímeros de polipropileno y polietileno presentan propiedades similares. Lo más importante para el procesamiento y el reciclado es que estos elastómeros pueden calentarse y enfriarse repetidamente, y el desperdicio se puede reciclar. Sin embargo, no es factible utilizarlas por arriba de la T_g de la fase vítrea.



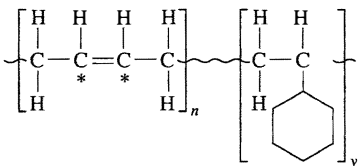
(*a*)



Elastómero con enlaces cruzados

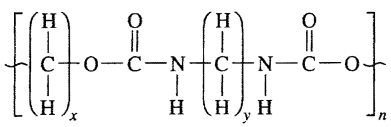
Estirado

(*b*)



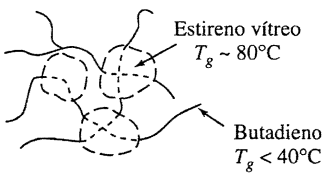
* Sitio posible de enlace cruzado
copolímero polibutadieno estireno

(*c*)



Poliuretano

(*d*)



(*e*)

Figura 13-13 Los elastómeros se forman (*a*) estableciendo enlaces cruzados entre las moléculas lineales, (*b*) evitando de esta manera el flujo permanente. (*c*) Los polímeros vítreos copolimerizados con un polímero ahulado y (*d*) los poliuretanos pueden formar enlaces cruzados para formar una red elastomérica espacial (termofija). En los elastómeros termoplásticos, las regiones vítreas en una matriz amorfa actúan como puntos de anclaje y evitan el flujo viscoso (e).

13-5 ADITIVOS Y RELLENOS

El amplio margen de propiedades disponibles en varios polímeros se puede modificar aún más al añadir agentes que se clasifican en dos grupos. Los que entran a la estructura molecular normalmente se denominan *aditivos*, mientras que los que forman una fase secundaria claramente definida se llaman *rellenos*. El mezclado profundo de los aditivos y de los rellenos es un paso crítico en el procesamiento.

13-5-1 Aditivos

Los aditivos son agentes diseñados para cambiar propiedades.

1. Los *antioxidantes* se agregan en particular a los polímeros de reacción en cadena como el PP; también actúan como estabilizadores contra la acción del calor y de la luz UV. Los estabilizadores específicos se deben agregar al PVC y a otros polímeros que contienen cloro porque la liberación de HCl inicia una reacción destructiva en cadena.

2. Los *retardantes de flama* son importantes ya que todos los polímeros con base de carbono soportan la combustión. En general, el control se ejerce para varios propósitos: incrementar la temperatura a la cual se soporta una flama, aminorar la rapidez de la propagación de la flama, generar una atmósfera que no soporte la combustión y eliminar o reducir la emisión de humos nocivos. Todo un conjunto de pruebas está disponible para evaluar la flamabilidad de los plásticos; además, los códigos y los reglamentos correspondientes se han hecho gradualmente más estrictos.

Los plásticos nunca pueden ser a prueba de fuego en el sentido que lo son los cerámicos o de la mayoría de los metales, pero presentan algunas diferencias amplias en su comportamiento. Algunos plásticos (por ejemplo los que contienen cloro) son más resistentes a la flama que otros, aunque al arder pueden liberar gases tóxicos. Los polímeros que tienen grupos laterales de menor resistencia no soportarán una flama, sino que se reducirán a un cuerpo sólido, carbonizado (se carbonizan o *queman*). En otros polímeros, la ruptura de los enlaces primarios resulta en la formación de compuestos líquidos o gaseosos de peso molecular bajo, los cuales se encienden posteriormente.

3. Los *plastificantes* convierten a un polímero termoplástico rígido en flexible. En la década de 1860, Parkes en Inglaterra y los hermanos Hyatt en Estados Unidos introdujeron el celuloide, el primer plástico moldeable al plastificar nitrocelulosa con alcanfor. En la actualidad, la mayor aplicación de plastificantes en el PVC. Un plastificante es un fluido que suele ser de alto peso molecular (más de 300) cuyas moléculas se entremezclan entre las del polímero (que aflojan la estructura), disminuyen la T_g y permiten mayor flexibilidad.

4. Los *solventes* son sustancias orgánicas cuya longitud de cadena es corta. Sus moléculas se introducen entre las moléculas de los polímeros, rompiendo los enlaces secundarios. Así, son indeseables en el servicio, de modo que los polímeros se seleccionan para resistir solventes específicos. Los enlaces cruzados evitan la disolución, a lo mucho, las moléculas del solvente causan hinchamiento. Los polímeros con alta cantidad de enlaces cruzados son del todo resistentes a muchos solventes.

Sin embargo, los solventes pueden tener un propósito útil en la manufactura al permitir el procesamiento en el estado fluido; así que deben ser removidos por evaporación. Algunos solventes, como el cloruro de metileno, atacan a los polímeros termoplásticos amorfos como el poliestireno, el PMMA, el policarbonato y el ABS, lo que es útil para la soldadura por solventes. Los polímeros cristalinos como PP y PTFE son mucho más resistentes.

5. Muchos plásticos fundidos o moldeados son transparentes, como el PMMA y los policarbonatos (PC); otros son translúcidos (PE, PP), pero algunos más son opacos o

pueden tener un color natural. Los *tintes* orgánicos (solubles en solventes) y los *pigmentos* orgánicos e inorgánicos (sustancias insolubles finamente divididas como los óxidos) se agregan para impartir el color deseado. Por ejemplo, el dióxido de titanio es un pigmento blanco excelente; los óxidos de hierro dan un color amarillo, café o rojo; el negro de carbono no sólo es un pigmento, sino también un absorbente de luz UV. El carbonato de calcio, finamente dividido, diluye (extiende) el color y se emplea en grandes cantidades como relleno de bajo costo.

6. Los *lubricantes* y los *promotores de flujo* se agregan principalmente al PVC, PS y ABS para facilitar el flujo dentro de moldes y matrices. Los agentes desmoldantes se pueden añadir al polímero o a la superficie del molde.

13-5-2 Rellenos

Los rellenos se incorporan para mejorar las propiedades mecánicas, por lo que se llaman *agentes reforzantes*. En otras ocasiones, su propósito principal es reducir el costo del material, reducir la contracción y el coeficiente de dilatación térmica, incrementar la conductividad eléctrica o térmica del plástico, o facilitar el procesamiento; de modo que se denominan *extensores* (o simplemente, rellenos).

Como muchos rellenos son muy diferentes estructural o químicamente del polímero básico, su efecto en las propiedades mecánicas se puede analizar con referencia a la figura 6-15, que ilustra las propiedades de las estructuras de dos fases.

1. Los rellenos que no se humectan, y por tanto producen una interfaz débil, actúan como concentradores de esfuerzos, reduciendo la resistencia y la tenacidad del polímero (Fig. 6-15, casos 4 y 5).

2. La efectividad de los rellenos humedecidos por el polímero depende de su forma, tamaño y distribución.

a. Los rellenos más o menos equiaxiales de mayor tamaño sólo sirven para aumentar el volumen, con poco efecto en las propiedades (Fig. 6-15, caso 3*a*). No obstante, cuando están finamente distribuidos, cambian las características del polímero porque la longitud del enlace entre las partículas se reduce, incrementando la rigidez de la estructura (Fig. 6-15, caso 3*b*). Los rellenos granulados incluyen minerales finos (entre 0.5 y 20 μm) como carbonato de calcio, arcilla, talco, cuarzo, tierra de diatomeas (fósiles silíceos de algas); óxidos metálicos (como la alúmina); polvos metálicos; negro de humo; los rellenos orgánicos naturales más gruesos (de 70 a 500 μm) (como el aserrín) y los polímeros sintéticos.

b. Un efecto más poderoso se obtiene cuando el relleno es como una placa (hojuela), porque los enlaces cortos desarrollados sobre un área superficial mayor (Fig. 6-15, caso 2*d*) son más fuertes. Un ejemplo usual es la mica. Durante el procesamiento, las hojuelas a menudo se alinean y la estructura adquiere propiedades direccionales.

c. El mayor efecto de reforzamiento se alcanza cuando la segunda fase es una fibra más fuerte, con mayor módulo de elasticidad, y con una razón longitud-diámetro de por lo menos 50:1. La resistencia del plástico aumenta en tensión porque los esfuerzos se

transfieren, a través del enlace interfacial, a la fibra. La resistencia también se eleva en compresión, ya que el pandeo elástico de la fibra se evita mediante el polímero circundante. El refuerzo adicional se deriva de la longitud más corta de enlace entre las fibras. Si éstas se orientan, se pueden obtener propiedades marcadamente direccionales. La resistencia al impacto se eleva mediante la energía necesaria para romper las fibras, desenlazarlas de la matriz, y jalarlas de ella. Los rellenos fibrosos incluyen celulósicos, asbesto, vidrio, carbono (grafito), boro, metales, y polímeros de resistencia y/o tenacidad mayores. Los polímeros reforzados con fibras continuas (filamentos) se clasifican como compuestos y se analizarán en la sección 15-3. La tenacidad de los plásticos frágiles con frecuencia se mejora incorporando una fase elastomérica separada en la matriz frágil.

Algunos rellenos se humedecen inmediatamente por el plástico, mientras que otros polímeros (como el PE, el PTFE y las siliconas) necesitan tratamientos superficiales especiales. En muchos otros casos se necesitan *agentes de acoplamiento* especiales; por ejemplo, se aplican silanos a la fibra de vidrio o a las fibras minerales.

13-6 PROPIEDADES DE SERVICIO DE LOS PLÁSTICOS

El vasto número de plásticos disponibles presenta un amplio intervalo de características, haciéndolos adecuados para una gran variedad de aplicaciones.

13-6-1 Propiedades mecánicas

Las propiedades de los plásticos se determinan en ensayos similares a los descritos en el capítulo 4. Antes de los ensayos, las probetas se llevan a una condición estándar (temperatura y humedad) de acuerdo con la norma ASTM D618.

Resistencia Los ensayos estándar de tensión se realizan sobre probetas moldeadas o maquinadas (ASTM D638) y sobre películas (ASTM D882): La curva característica esfuerzo-deformación puede mostrar un comportamiento puramente frágil para los termofijos, y muy por debajo de T_g para los termoplásticos (Fig. 13-14*a*). Arriba de T_g se forma una estricción después de alcanzar el esfuerzo máximo y la fuerza (y en consecuencia el esfuerzo de ingeniería) disminuye (Fig. 13-14*b*). La estricción se extiende sobre la longitud de la probeta con una fuerza casi constante y ésta sólo se eleva cuando las moléculas se alargan antes de la fractura. (En términos del esfuerzo real, la curva esfuerzo-deformación unitaria sube continuamente.) Por razones explicadas en la sección 8-1-6, la elongación posterior a la estricción aumenta con el incremento de m, y por tanto con la temperatura por arriba de T_g. La rapidez de deformación tiene el mismo efecto que una temperatura más baja; un plástico que es capaz de deformación sustancial a una rapidez de deformación baja puede sufrir una fractura frágil cuando dicha rapidez es alta.

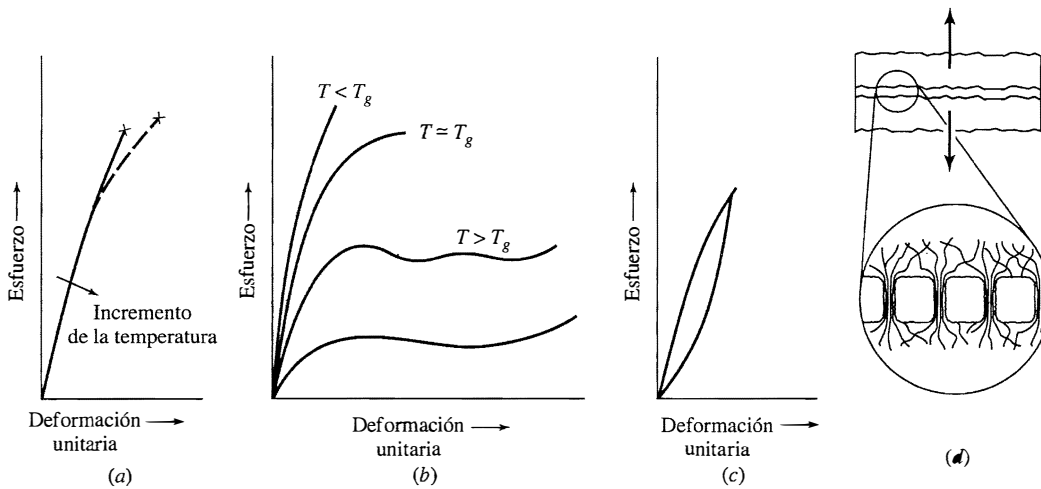


Figura 13-14 Las propiedades mecánicas de los polímeros se ven afectadas en gran medida al incrementar las temperaturas: (*a*) el módulo elástico de los termoplásticos baja, (*b*) y la resistencia disminuye, mientras que la elongación aumenta. (*c*) Una pérdida de histéresis es común si se repiten las cargas. (*d*) La fisura capilar surge cuando se forman vacíos internos bajo la influencia de los esfuerzos de tensión, aunque las microfibrillas continúan soportando la carga.

En la mayoría de las aplicaciones para ingeniería, la estabilidad dimensional es un requisito principal. Aun la deformación permanente más ligera es indeseable; por lo tanto, el rango útil de carga está limitado para el régimen elástico. La pendiente inicial del registro fuerza-desplazamiento de nuevo proporciona el módulo elástico E [ecuación (4-6)], también llamado *módulo de tensión*. Éste es de aproximadamente dos órdenes de magnitud menor que en los metales (revise la información de las tablas 5-2 y 5-4), y no está bien definido, porque hay una desviación ligera de la linealidad incluso a deformaciones muy bajas. Además, en la mayor parte de los polímeros el módulo disminuye con el incremento de la temperatura (Fig. 13-5*b*). Muchos termoplásticos presentan sensitividad a la tasa de deformación aún por debajo de T_g; así el módulo de tensión también es una función de la rapidez de carga. La resistencia de algunos plásticos, como el nylon 6,6, se reduce en forma significativa por la humedad.

Cuando la deformación se realiza más allá del régimen de deflexión lineal, aún puede ser principalmente elástica pero se sigue una curva diferente después de la descarga (Fig. 13-14*c*). El área del *lazo de histéresis* representa el trabajo que se transforma en calor. Con cargas repetitivas, se puede provocar sobrecalentamiento y fatiga.

Los esfuerzos de tensión impuestos en temoplásticos vítreos y semicristalinos pueden causar la localización de la deformación en bandas perpendiculares a la dirección de la carga. Los vacíos internos que se forman en estas bandas (Fig. 13-14*d*) las hacen visibles como *grietas capilares*. Aunque estas bandas pueden aparecer como grietas finas, las moléculas orientadas fuera del volumen (*microfibrillas*) continúan soportando la carga. Finalmente, la falla puede incluso provocarse por cargas muy por debajo de la resistencia a la tensión.

La rigidez de los plásticos a menudo se determina en un ensayo de flexión de tres puntos (Fig. 4-9*a*). El esfuerzo máximo en la fractura es la *resistencia a la flexión*; para plásticos tenaces, se toma el esfuerzo máximo de la fibra a una deformación de 5%. El *módulo de flexión* es la pendiente inicial de la curva de fuerza de flexión-deformación y normalmente es un poco mayor que el módulo de tensión.

Cuando los plásticos se someten a compresión, la deformación localizada en las *bandas de cortante* provocan una disminución temporal en el esfuerzo de fluencia; al continuar la deformación, el esfuerzo se eleva. Los ensayos de compresión y de dureza por indentación se utilizan sobre todo para verificar procesos en clases específicas de plásticos. Para aplicaciones como juntas, resortes y ajustes a presión, se realizan ensayos de relajación de esfuerzos para conocer el decaimiento del esfuerzo bajo condiciones de deformación constante (véase más adelante).

Tenacidad Los ensayos de impacto proporcionan una evaluación rápida de la tenacidad de los plásticos. El ensayo de Charpy (Fig. 4-10) es adecuado, pero a menudo se prefiere el de *Izod* (ASTM D256), en el que la probeta muescada se sujeta por un extremo. Debido a la alta rapidez de deformación y a la flexión impuesta, la tenacidad al impacto puede diferir considerablemente de la obtenida mediante el ensayo de tensión; un *ensayo de tensión por impacto* (ASTM D1822) a menudo se correlaciona mejor con el rendimiento de campo. En los polímeros termoplásticos, la resistencia al impacto sólo es significativa por debajo de T_g. La tenacidad aumenta con la cristalinilidad moderada al disminuir el tamaño de las esferulitas, y en los copolímeros de bloque, cuando se incorpora un componente que tenga una T_g muy por debajo de la temperatura de servicio (lo cual crea, en esencia, un elastómero).

Para las hojas y las películas, la resistencia al cortante y la resistencia a la perforación con frecuencia son importantes. Para aplicaciones que involucran fatiga, se determina un límite de resistencia a ésta (Fig. 4-14*a*).

Propiedades a temperatura elevada La sensibilidad de los polímeros a la alta temperatura y al tiempo hace que la deformación por termofluencia sea importante; la termofluencia es el agente primario en la pérdida de la estabilidad dimensional. También es responsable de la relajación de esfuerzos: cuando una pieza se somete a una carga, el esfuerzo inicial decae gradualmente. El decaimiento puede analizarse mediante un modelo de Maxwell (Fig. 13-8*c*). La deformación inicial impuesta en un tiempo $t = 0$ induce un esfuerzo τ_0. Como la deformación se mantiene constante, $d\gamma/dt = 0$ y la ecuación (13-10) se transforma en

$$0 = \frac{d\tau}{dt}\left(\frac{1}{G}\right) + \frac{1}{\eta}\tau \qquad \textbf{(13-10')}$$

Despejándola, el esfuerzo en cualquier punto en el tiempo es

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{-Gt}{\eta}\right) \qquad \textbf{(13-12)}$$

Si se define η/G como el tiempo de relajación t_r, se obtiene

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{-t}{t_r}\right) \qquad \textbf{(13-13)}$$

Así, el tiempo de relajación es el tiempo necesario para que el esfuerzo decaiga a 1/e de su valor inicial. La ecuación se puede escribir en forma similar para esfuerzos de tensión o de compresión.

Ejemplo 13-6

Una arandela de polímero se emplea como junta. El polímero se probó en un relaxómetro de junta comprimiéndolo entre dos cilindros huecos. La fuerza se midió con una celda de carga. Para una deformación inicial por compresión dada, el esfuerzo fue 10 MPa, que decayó a 8 MPa en 5 000 h. Calcule el esfuerzo remanente después de un año.

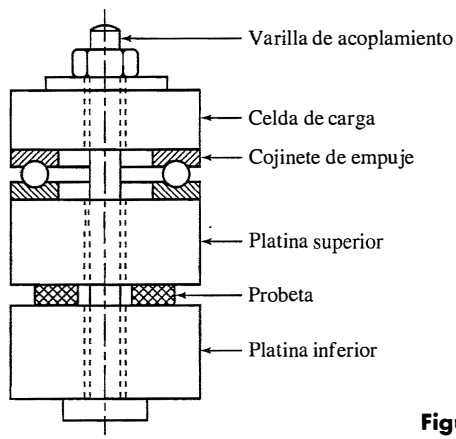


Figura ejemplo 13-6

Primero, encuentre t_r. La ecuación (13-13), con esfuerzos de compresión

$$8 = 10 \exp\left(\frac{-5\ 000}{t_r}\right)$$

y $t_r = 22\ 407$ h. Un año = $365 \times 24 = 8\ 760$ h y

$$\sigma = 10 \exp\left(\frac{-8\ 760}{22\ 407}\right) = 6.764\text{MPa}$$

Para un servicio más prolongado, se necesita que la junta se vuelva a apretar periódicamente. Note que en el cálculo se supuso que el polímero cumple las predicciones para tiempos mayores que en los experimentos originales. Esto normalmente está justificado para tiempos que no exceden 10 veces el periodo original de ensayo.

La termofluencia es una función muy compleja de la temperatura, de la magnitud y del estado de esfuerzo, así como de los solventes (y de la humedad para materiales higroscópicos) habidos en el ambiente. Por lo tanto, el diseño se basa en los principios

seudoelásticos: se supone que la temperatura y carga máximas operan completamente, así que los datos de termofluencia-esfuerzo se sustituyen en las ecuaciones clásicas elásticas de esfuerzo-análisis.

El límite superior de la temperatura de aplicación con frecuencia se define como la *temperatura de deflexión por calor* (ASTM D648). Una barra de 12.7 mm de ancho, 127 mm de longitud y de 3 a 13 mm de espesor se carga en un ensayo de flexión de tres puntos (Fig. 4-9*a*), con un claro de 102 mm. La carga se elige para provocar un esfuerzo máximo [ecuación (4-12*a*)] de 1 820 kPa (264 psi) para polímeros muy rígidos, y 455 kPa (66 psi) para los flexibles. La barra se calienta, bajo carga, a una rapidez de 2°C/min; la temperatura de distorsión por calor se alcanza cuando la deflexión a la mitad del claro es 0.25 mm. Sin embargo, la prueba predice mal la termofluencia a temperaturas bajas.

Para termoplásticos altamente cristalinos, la temperatura a la que una aguja aplanada estándar penetra al plástico se considera como el punto de *ablandamiento de Vicat* (ASTM D1525).

Los cambios graduales a temperaturas elevadas conducen a la pérdida de propiedades, y la resistencia al *envejecimiento térmico* a menudo se especifica de acuerdo con el estándar UL 746B de Underwriters Laboratories (Northbrook, Illinois).

Muchos componentes se someten a fatiga; en el diseño se debe tomar esto en cuenta. El diseño con plásticos está más allá del alcance del presente tratamiento, por lo que se deben consultar las referencias dadas al final del capítulo 14.

Esfuerzos residuales Con frecuencia, los procesos de manufactura inducen esfuerzos residuales en los componentes plásticos. Esto es particularmente interesante en los termoplásticos, en los que la rapidez de enfriamiento desigual causa diversos grados de cristalización y, en consecuencia, de contracción. Además, el flujo del plástico puede provocar el desdoblamiento variable de las moléculas en diferentes secciones de una pieza. Las capas superficiales y del centro de las secciones más gruesas tienen historias térmicas diferentes, debido a la escasa conductividad térmica, y esto puede inducir diferencias adicionales en la estructura. Tanto en los termoplásticos como en los termofijos, la forma del molde puede evitar la contracción uniforme de todas las secciones, por lo que de nuevo se establecen esfuerzos residuales.

Si es factible la deformación por termofluencia, los esfuerzos residuales disminuyen gradualmente con las consecuentes distorsión (Fig. 4-19*b*) y pérdida de la estabilidad dimensional. En los polímeros sujetos al ataque de solventes, los esfuerzos desarrollan grietas; a una multitud de grietas finas se le denomina *grietas capilares*. Las grietas muy finas aparecen como un nublado de la superficie.

Como las moléculas de los polímeros lineales se desdoblan y estiran durante la manufactura, una parte calentada por arriba de T_g puede regresar a la forma original. Esto se aprovecha en los plásticos de contracción por calor, pero es indeseable en partes estructurales.

13-6-2 Propiedades físicas y químicas

La densidad es importante en muchas aplicaciones. Los hidrocarburos amorfos tienen una densidad cercana a la del agua (de 0.86 a 1.05 g/cm^3; por ejemplo: 0.91 para el

LDPE, y 0.96 para HDPE). Los polímeros tratados con cloro son más pesados (PVC 1.4, cloruro de polivinilolideno 1.7), y el PTFE cristalino lo es aún más (2.2) (véase también la tabla 5-4).

Las propiedades tribológicas de los polímeros generalmente son buenas. Muchos de ellos tienen un coeficiente de fricción muy bajo, ya sea por baja adhesión (como los cojinetes fenólicos reforzados con tela en presencia de lubricantes acuosos), o porque se forma una película de transferencia que asegura baja fricción en seco (nylon, PTFE). Los polímeros pueden tener una resistencia al desgaste intrínsecamente alta en aplicaciones particulares (como el UHMWPE), que se puede incrementar con enlaces cruzados o con rellenos que elevan la dureza e imparten propiedades lubricantes (como el bisulfuro de molibdeno en nylon).

Los polímeros son, en general, malos conductores de calor, aunque la conductividad se puede mejorar un poco al rellenar con polvos de metal (tabla 4-1). Su dilatación térmica es amplia (tabla 4-1), lo que puede crear problemas cuando los ensambles contienen tanto plásticos como metales.

La resistencia de los polímeros a la intemperización (que involucra a la humedad, al ozono, a la luz UV y los cambios de temperatura) se hace más eficiente al incorporar rellenos opacos y absorbentes UV. De otra manera, puede ocurrir oscurecimiento, agrietamiento capilar y fragilidad.

Los polímeros amorfos tienden a ser transparentes, puesto que no hay límites reflectantes internos en ellos. Los polímeros cristalinos son translúcidos u opacos excepto cuando los cristales son muy pocos o pequeños, o cuando el polímero está en forma de una película muy delgada.

Los polímeros tienen muchas propiedades eléctricas deseables: resistividad, resistencia dieléctrica, resistencia al arco y constante dieléctrica altas, así como un factor de disipación pequeño (es decir, se genera poco calor en ellos cuando se colocan en un campo eléctrico). Así, su aplicación es vasta como aislantes y en general como sustratos. Si es necesario, se pueden fabricar conductores agregando polvo de metal (de 6 a 8% si están en fronteras de granos, de 35 a 40% si están distribuidos en forma aleatoria). Una clase especial de polímeros es intrínsecamente conductora y presenta electroluminiscencia y piezoelectricidad. Se pueden acumular cargas estáticas muy altas en los plásticos, como resultado de la fricción contra alguna otra superficie. Los aditivos antiestáticos se diseñan para disipar la carga por conducción eléctrica hacia el polímero, o esta disipación se realiza mediante radiación a la atmósfera circundante.

13-7 PLÁSTICOS

Como se indicó al inicio del capítulo, en este libro se distingue entre los polímeros puros y sus versiones compuestas: los plásticos. Hay una creciente variedad de plásticos disponibles y para obtener información detallada, se deben consultar los manuales listados al final de este capítulo. Una característica extraordinaria de los plásticos es la facilidad relativa con la que se pueden manufacturar como partes; con frecuencia se emplean plásticos de "propósito general" (también llamados *plásticos comerciales*), simplemente debido a su costeabilidad, para productos que no tienen exigencias muy

altas. Sin embargo, los plásticos de propósito general también tienen muchas aplicaciones en la ingeniería, y a menudo se refuerzan con los rellenos apropiados para mayor resistencia en los componentes de soporte de carga. El término *plásticos de ingeniería* se aplica para describir los polímeros que son muy costosos para aplicaciones generales, pero que ofrecen resistencia, módulo elástico, tenacidad, resistencia química y a la temperatura, propiedades eléctricas deseables, y un buen acabado superficial; de manera que con frecuencia se emplean en aplicaciones estructurales, en vez de los metales. Muchos de ellos se pueden reforzar adicionalmente con reforzamientos fibrosos. Por lo tanto, su aplicación crece en cubiertas de instrumentos y de maquinaria, conectores eléctricos, engranes, levas, impulsores, válvulas y, en general, en componentes estructurales.

13-7-1 Termoplásticos

El número de polímeros termoplásticos se ha elevado en gran medida en las últimas cuatro décadas. Su clasificación es posible desde varios puntos de vista; aquí, los termoplásticos se analizan en grupos definidos por su estructura. Las propiedades de algunos termoplásticos usados con frecuencia se dan en la tabla 13-2.

1. *Poliolefinas*. Se basan en alquenos de cadena recta (es decir, en hidrocarburos con enlaces dobles entre los átomos de carbono, como el etileno de la Fig. 13-1).

a. *Polietilenos* (PE, Fig. 13-1). Son plásticos muy versátiles con buenas propiedades químicas y eléctricas, pero necesitan antioxidantes y estabilizadores UV. El LDPE de cadena corta, ramificado (densidad: de 0.910 a 0.925 g/cm^3) se utiliza principalmente en empaques, aunque está perdiendo terreno contra el LDPE lineal (LLDPE). El HDPE lineal (de 0.941 a 0.965 g/cm^3) es adecuado para recipientes y tubos. El UHMW-PE (con un peso molecular mínimo de 3 millones) es un verdadero termoplástico de ingeniería. Tiene una resistencia a la abrasión y una tenacidad al impacto extremadamente altas; de ahí que se use en muchas industrias para superficies de rozamiento.

b. *El polipropileno* (PP, Fig. 13-1) se emplea en forma isotáctica (Fig. 13-2*b*). Tiene buena rigidez, resistencia al agrietamiento por esfuerzo y una resistencia a la temperatura mayor que la del PE. Sus aplicaciones usuales son en piezas de artículos electrodomésticos y recipientes. Se reciclan grandes cantidades una vez que se desechan las cajas de baterías de ácido y plomo.

c. Los *ionómeros* contienen compuestos inorgánicos que proporcionan un enlace iónico entre las cadenas (enlaces cruzados), al tiempo que permiten los procesos de moldeo plástico a temperaturas elevadas. Son transparentes, muy tenaces y se usan generalmente para recubrimientos de pelotas de golf, cabezas de martillo, y para otras aplicaciones de alto impacto.

2. Los *vinilos* se basan en monómeros de etileno en los cuales se sustituye un H.

a. El *cloruro de polivinilo* (PVC, Fig. 13-1) es un plástico de bajo costo, fácilmente procesado, de buena resistencia al agua y con una buena razón resistencia-peso. Necesita estabilizadores para evitar la descomposición a temperaturas altas de procesamien-

Tabla 13-2 Propiedades de manufactura de polímeros termoplásticos selectos*

Tipo	*Tm*, °C	*Tg*, °C	Temperatura de deflexión por calor, °C		Moldeo por compresión† Temp., °C	Temp. de moldeo por inyección, °C	Contracción, %	Propiedades bajo tensión		Módulo de flexión, GPa	Impacto Izod‡ J/25 mm
			1 850 kPa	450 kPa				Resistencia, MPa	Elongación, %		
ABS		110-125	95	100	175-260	190-260	0.4-0.9	30-55	5-25	2.5	4-16
Copolímero acetal	175		110	155	170-205	195-230	2	60	40-75	2.8	2
Con 25% vidrio	175		160	165	170-205	190-250	0.4-1.8	130	3	8	2.5
Acrílico (PMMA)		90-105	80	85	150-220	160-260	0.2-0.8	50-80	2-10	3	0.7
Acetato de celulosa	230		55	65	125-220	165-255	0.3-1.0	20-65	6-70	0.8-2	1-8
PTFE	327			120			3-6	15-35	200-400	0.6	4
Etil-enepropileno fluorado	275			70	320-400	330-405	3-6	20	300	0.6	Sin fractura
Copolímero PE-TFE	270		70	104	300-330	300-350	3-4	45	100-400	1.4	Sin fractura
Con 25% vidrio	270		210	265	300-330	300-350	0.2-3.0	85	8	6.7	12
Nylon-6,6	265	50	75	245		270-330	0.8-1.5	85	60-300	1.3	2.5
Con 30% vidrio	265	50	255	260		270-330	0.4-0.6	155	5-7	6	4
Policarbonato		150	130	135	270-300	250-345	0.5-0.7	55-70	100-130	2.4	20
Poliéster											
PBT	250		65	150		225-275	1.5-2.0	55	50-300	2.7	1.5
PET	250	70	40		230-280	280-315	2.0-2.5	50-70	50-300	3.0	0.7
Polietileno											
LD	110	-120		40	E135-230	150-230	1.5-5.0	8-30	100-650	0.3	Sin fractura
HD	135	-110		80	E170-275	170-260	1.4-4.0	20-35	10-1 200	1.2	0.5-5
UHMW	130		45	80	200-260		4	40	420-500	1.0	Sin fractura
Poliimida		310-365	340		330-365			120	10	3.5	2
Polipropileno	168	-18	55	115	E205-260	205-290	1-2.5	30-40	100-600	1.5	0.5-1
Poliestireno		100	95	100	150-205	175-260	0.4-0.7	35-55	1-2	3.2	0.5
alto impacto		95-105	80	80	E190-260	175-275	0.4-0.7	20-45	20-65	2.0	1.5-4
PVC, rígido	200	75-105	60	62	140-205	150-210	0.2-0.6	35-65	40-80	3.0	1.5-30
Flexible		75-105			140-180	160-195	1.0-5.0	10-25	200-450		Varía
Estireno-butadieno copolímero de bloque			0	0	120-160	150-220	0.1-0.5	4-20	300-1 000	0.02-1	Sin fractura

*Compilado de *Modern Plastics Encyclopedia*, McGraw-Hill, Nueva York, 1995. Los valores son aproximados.

†E = extrusión.

‡Valores de impacto Izod muesca J/25 mm, medidos en una probeta de 3.2 mm de espesor (divida entre 1.35 para obtener ft · lb/pulg en la muesca).

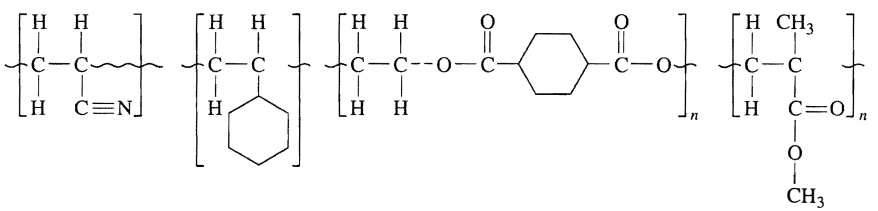
to y a causa de la luz solar. El PVC rígido es duro y relativamente frágil, pero se utiliza mucho en edificios en forma de marcos de ventanas, ductos para descarga de agua pluvial, tubos, y también para aislamiento de alambre y botellas. El PVC flexible, fabricado al agregar de 30 a 80% de plastificante, encuentra aplicaciones muy amplias; por ejemplo, como manguera de jardín, botas, tuberías, juntas e impermeables. Cuando se quema, el PVC genera HCl y es autoextintor.

b. El *cloruro de vinilideno* contiene dos átomos sustitucionales de Cl por mero (Fig. 13-1). Es químicamente inerte, tiene baja permeabilidad a los líquidos y gases, y es relativamente resistente a la combustión. Se usa para cubiertas de asientos, tubos y válvulas. El copolímero con cloruro de vinilo (Saran™) forma una película de empaque.

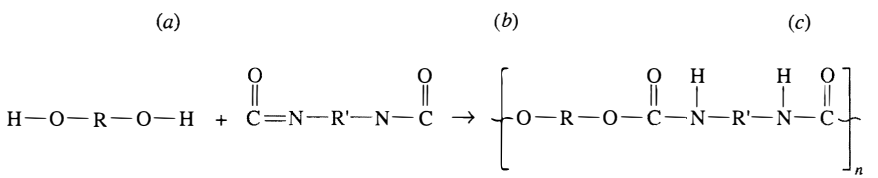
3. *Fluorocarbonos.* Al reemplazar el H con F se crean polímeros químicamente inertes (Fig. 13-1). El politetrafluoetileno (PTFE) completamente sustituido es cristalino y tiene gran resistencia al calor; además presenta una inercia química extrema y es inherentemente baja su fricción. No es inflamable pero libera gases tóxicos cuando se descompone al sobrecalentarlo. No se funde y se debe producir mediante tecnologías de metales (sinterizado). Las placas se cortan en finas capas (rasuran) para fabricar películas. El copolímero propileno etileno fluorado (FEP) es moldeable.

4. *Estirenos.* Se obtienen sustituyendo un anillo de benceno por H.

a. Los *poliestirenos* (Fig. 13-1) son polímeros amorfos, transparentes, de bajo costo pero frágiles. Se pueden incluir elastómeros para mejorar su resistencia al impacto (*poliestireno de alto impacto*). Aparte de las formas sólidas, el poliestireno también se emplea en forma de esferas expandibles. Tiene vastas aplicaciones como empaques, charolas y utensilios domésticos.



Copolímero estireno-acrilonitrilo (SAN) Teraftalato de polietileno (PET) Polimetilmetracrilato (PMMA)



(*a*) (*b*) (*c*)

Poliol + Diisocianato → Poliuretano

(*d*)

Figura 13-15 Fórmulas químicas de algunos polímeros termoplásticos lineales importantes.

b. El *acrilonitrilo estireno* (SAN) es un copolímero aleatorio (Fig. 13-15*a*) transparente pero tiene mejor rigidez. Se utiliza en aparatos y para barnizado.

c. El *ABS* es un copolímero de caucho butadieno injertado con SAN. Las regiones parecidas al caucho muy finamente distribuidas (de 0.1 a 1.0 μm de diámetro) imparten ductilidad a temperatura baja, y tenacidad mientras mantienen la alta dureza y la rigidez del estireno vítreo. Es un plástico de ingeniería, cuyas propiedades pueden variar al cambiar las razones de los monómeros y a través del método de manufactura. Necesita estabilización UV. Esencialmente se emplea para máquinas de oficina, en cubiertas de herramientas eléctricas manuales, para las partes superiores de las casetas de camionetas y en tubos.

5. *Poliéster.* Los ésteres son productos de la reacción entre un ácido orgánico y un alcohol (Fig. 13-1); de esta manera, los grupos de ésteres están en la cadena principal.

a. *Poliéster termoplástico.* El *polietileno-teraftalato* (PET, Fig. 13-15*b*) es un polímero claro, tenaz, se puede orientar y tiene mayor resistencia a la temperatura. Se usa mucho en envases para bebidas carbonatadas y licores, y frecuentemente se recicla como plástico después de que el consumidor lo desecha. El *polibutileno tereftalato* (PBT) es semicristalino. Después de reforzarlo, tiene una buena resistencia a la termofluencia, haciéndolo adecuado para carrocerías de automóviles, cuerpos de aparatos y partes eléctricas.

b. El éster aromático *poliarilato* es un plástico de ingeniería de alta resistencia a la termofluencia.

6. Los *acrílicos* tienen grupos éster en cadenas laterales. El PMMA (Fig. 13-15*c*) es transparente, frágil y sensible a la muesca. Los de alto impacto contienen un plastificante o copolímero. Se polimeriza en forma de lámina a partir de una solución de monómero y prepolímero, o el polímero se fabrica mediante técnicas termoplásticas. Se utiliza ampliamente para barnizado, domos, accesorios, lentes (incluyendo lentes Fresnel grandes).

7. *Celulósicos.* La celulosa es un polímero natural obtenido de la fibra del algodón o de la pulpa de madera (después de la remoción de la lignina). No se funde. Químicamente modificada (acetato, etcétera), se convierte en un termoplástico tenaz para recipientes, mangos de herramientas, cajas para cintas.

8. Los *poliuretanos* (Fig. 13-15*d*) formados a partir de la reacción de un poliol (un alcohol con al menos dos grupos—OH) y un isocianato (con al menos dos grupos —NCO) son extremadamente versátiles. Así, pueden ser polímeros termoplásticos lineales que encuentran uso como recubrimientos de alambre, fascias, y otros componentes.

9. Las *poliamidas* se forman mediante la condensación de una amina y un ácido carboxílico.

a. Los *Nylon* (Fig. 13-1) son el primer polímero de ingeniería, son polímeros tenaces y cristalinos. Los grados modificados son amorfos y transparentes. Absorben humedad, que los plastifica, con lo que se provoca henchimiento y pérdida de la resistencia y las propiedades eléctricas. Se deben procesar secos (menos de 0.2% de humedad). Los nylon son autolubricantes. Los rellenos de vidrio y de fibras minerales mejoran en gran medida las propiedades a alta temperatura. Los engranes, cojinetes, piezas de carrocería para automóviles, tapas, rines y ventiladores son productos usuales.

b. Las *poliamidas aromáticas* (*aramidas*, nylon aromático, Fig. 13-16) tienen una estabilidad térmica incrementada debido a la columna aromática. No se funden. Todos los enlaces extensores de cadena son paralelos, lo que les permite tener, después de un procesamiento especial, una resistencia y un módulo de tensión excepcionalmente altos. Se emplean principalmente como fibras de refuerzo (como en las llantas radiales y en materiales compuestos para aplicaciones aeroespaciales), pero también en chalecos a prueba de balas, como cables, o para guantes de trabajo pesado.

10. *Termoplásticos aromáticos.* Una gran variedad de plásticos de ingeniería tienen en común una columna aromática que contribuye a incrementar la resistencia a la temperatura.

a. El *policarbonato* (Fig. 13-16) es un plástico de alta claridad, amorfo, transparente y resistente al impacto; se utiliza en faros de automóviles, tableros de instrumentos, aplicaciones ópticas y eléctricas (incluyendo discos compactos), así como en botellas retornables para leche.

b. La *poliimida* (Fig. 13-16) tiene una estructura de semiescalera que le da alta resistencia a la temperatura y tenacidad. Entre los copolímeros, la poliamida-imida es un polímero amorfo, tenaz, opaco, con $T_g > 275°C$, y tiene muchas aplicaciones en la ingeniería. El poliéter-imida es transparente y resistente a la luz UV. Es altamente transparente a las microondas, por lo que se puede usar, por ejemplo, para utensilios de cocina para microondas.

c. Las *sulfonas* incluyen polisulfona, poliarilsufona (Fig. 13-16) y poliéter sulfona.

d. Las *resinas basadas en fenileno*, como el óxido de polifenileno (PPO), también son útiles en aplicaciones de alta temperatura.

e. Las *poliariletercetonas* tienen propiedades similares. La polieteretercetona (PEEK) tiene alta resistencia al impacto.

11. Los *poliacetales* se crean mediante la polimerización de formaldehído, así tienen una columna —CH_2O— (Fig. 13-17). Éstos son plásticos de ingeniería altamente cristalinos, opacos, a menudo rellenos de vidrio. Los copolímeros contienen enlaces

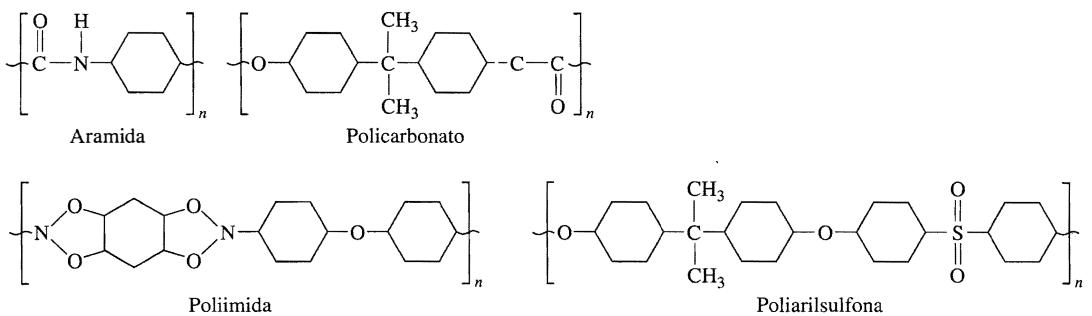
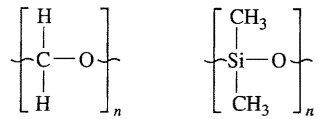


Figura 13-16 El anillo de benceno en los polímeros lineales aromáticos los hace más fuertes y resistentes a temperatura.



Poliacetal (polioximetileno) Silicona

Figura 13-17 La columna de las moléculas de algunos polímeros contiene oxígeno; en las siliconas, el carbono es reemplazado por el Si.

C—C distribuidos aleatoriamente y son altamente resistentes a la termofluencia. Se emplean para plomería, lavabos, accesorios, recipientes y piezas de ingeniería.

12. Las *siliconas* tienen un enlace de siloxano (Si—O—Si) en la columna (Fig. 13-17), lo cual los vuelve útiles para una amplia gama de temperatura. Repelen el agua, son resistentes a la intemperie y tienen propiedades eléctricas excelentes. Muchos se utilizan como cauchos, mientras que las resinas rígidas se usan para encapsulación y moldeo.

13. Los *copolímeros y las aleaciones* representan un campo en rápido crecimiento porque los nuevos plásticos con propiedades apropiadas se pueden fabricar sin tener que desarrollar nuevos polímeros. Ya se mencionaron los copolímeros ABS y polibuteno-estireno. Muchas aleaciones se fabrican para mejorar las propiedades de la matriz. Por ejemplo, partículas de segunda fase de ABS (de 1 a 10 μm de diámetro) se pueden agregar al PVC, PS o PC para optimizar la resistencia a la muesca; también se puede añadir un óxido de polifenileno al nylon para mejorar la resistencia a alta temperatura. Los polímeros de cristal líquido también son policombinaciones.

14. Los *polímeros biodegradables* han encontrado amplias aplicaciones como suturas que puede absorber el cuerpo. Por definición, no tienen aplicación en la ingeniería, y todavía no existe alguna que esté exenta de problemas.

13-7-2 Termofijos

Los termofijos ofrecen, en general, mayor estabilidad dimensional que los termoplásticos, pero a costa son más frágiles. Sin embargo, estas propiedades se pueden modificar y en muchas aplicaciones los termofijos y los termoplásticos compiten directamente. Las propiedades de algunos termofijos usados con frecuencia se dan en la tabla 13-3.

1. El *fenólformaldehído* (Fig. 13-10) es la resina sintética más antigua y aún se emplea extensamente (la marca comercial original Bakelita se ha convertido en un tér-

mino genérico). De color oscuro, casi de manera invariable se rellena con aserrín, o para mejores propiedades al impacto, con vidrio, asbesto o fibras de algodón. Se obtienen mejoras adicionales agregando caucho copolímero butadieno-acrilonitrilo a la resina de etapa A. Los compuestos de moldeo se utilizan para propósitos eléctrico, automotriz y de artículos domésticos, como equipo de interruptores, partes de ignición y manijas. La buena adhesión de los fenólicos a otros materiales los hace adecuados como aglutinante para arena de fundición (Secc. 7-5-4), madera contrachapada y ruedas de amolar (16-8-4).

2. Las *aminorresinas* se llaman así porque contienen al grupo amino (—NH_2). Estrictamente hablando, sólo la *melamina-formaldehído* pertenece a este conjunto; pero la *urea-formaldehído*, que contiene grupos amida (—ONH_2), a menudo se clasifica dentro de este grupo. Son translúcidos y se pueden pigmentar. El relleno normalmente es celulosa α (de alto peso molecular), obtenida de la pulpa de madera o de la fibra de algodón, y se utiliza en aplicaciones como superficies de mostradores, tableros para muro, cubiertos y vajillas, apagadores, y placas de pared. El aserrín también se usa como relleno para propósitos eléctricos.

3. Los *poliésteres*, como se vio en la sección 13-7-1, son termoplásticos cuando están en forma lineal (Fig. 13-1). Sin embargo, estos ésteres lineales son tratados como prepolímeros a los cuales se les puede agregar colorantes, rellenos (como caliza molida), o agentes reforzadores (principalmente fibra de vidrio) para hacer una *premezcla* que luego se puede moldear y curar por calor. El término *alkyd* (*alcohol reaccionado con ácido*) es, en principio, genérico para todos los poliésteres que tienen un enlace doble carbono-carbono, pero también se aplica para describir tipos específicos. Los *plásticos de poliéster insaturado* se curan al agregar catalizadores (más correctamente, iniciadores), los cuales se eligen para causar la polimerización de enlace cruzado con estireno, a temperatura ambiente o elevada. Las aplicaciones principales son en tubos, botes, tanques, paredes (baños), cubiertas del motor de automóviles, tapas de cajuelas de automóviles, paneles de salpicaderas, cascos, vigas estructurales, e incluso en varillas de succión para pozos de petróleo. No se forman derivados; por lo tanto, los poliésteres insaturados se usan ampliamente en compuestos de moldeo en volumen y de lámina. Los ésteres de vinilo tienen mejor tenacidad a un costo ligeramente mayor.

4. Las *resinas epoxy* están disponibles como sistemas de dos componentes (una resina intermedia y un reactivo endurecedor, con frecuencia mal llamado catalizador) para curado a temperatura ambiente, o como resinas de componente único para curado a temperatura elevada. La formación de enlaces cruzados se efectúa con contracción mínima; en consecuencia, se usan mucho para encapsulado de piezas eléctricas, para estructuras de epoxy reforzadas con fibra o, al mezclarlas con arena, vidrio o mármol, como concreto. También se utilizan en compuestos de moldeo ("prepregs").

5. Las *poliamidas* pueden formar enlaces cruzados para aplicaciones de alta temperatura (hasta 315°C).

6. Los *poliuretanos* pueden formar enlaces cruzados para fabricar una gran variedad de piezas. Son adecuados para el moldeo por reacción-inyección.

7. Las *siliconas* pueden formar enlaces cruzados para crear plásticos rígidos para aplicaciones en que se necesita resistencia al agua o una alta resistencia eléctrica.

Tabla 13-3 Propiedades de manufactura de polímeros termofijos selectos*

Tipo	Temperatura de deflexión, °C		Temperatura de moldeo, °C		Contracción, %	Propiedades de tensión		Módulo de flexión, GPa	Impacto Izod, J/25 mm
	1 850 kPa†	450 kPa†	Compresión	Inyección		Resistencia, MPa	Elongación, %		
Epoxy, vaciado	45-290				0.1-1	30-90	3-6		0.3-1.3
Moldeado, relleno con vidrio		120-260	150-160		0.02	120-180	4	18-28	0.4-0.7
Melamina-formaldehído (relleno con celulosa)	175-200		150-190	90-170	0.5-1.5	35-90	0.5-1	8	0.3-0.6
Fenol-formaldehído, vaciado	115				1-1.2	36-60	1.5-2		0.3-0.6
Relleno con aserrín	150-190		145-195	165-205	0.4-0.9	35-65	0.4-0.8	7-8	0.3-0.8
Poliéster, relleno con vidrio									
SMC	190-260		130-175		0.1-0.4	55-175	3	7-15	10-30
BMC	160-175		155-195	150-190	0.05-0.4			7-15	5-18
Poliuretano, vaciado	Varía		85-120		2	1-70	100-1 000	0.07-0.7	30-sin fractura
Urea-formaldehído, mezclado con celulosa	125-145		135-175	145-160	0.6-1.4	40-90	0.5-1	9-11	0.3-0.5

* Compilada de *Modern Plastics Encyclopedia*, McGraw-Hill, Nueva York, 1994.
† Divida entre 7 para obtener psi.

13-7-3 Elastómeros

El caucho natural es principalmente poliisopreno. En su forma natural, es una sustancia pegajosa porque las moléculas se deslizan con facilidad. La polimerización cruzada con azufre (Fig. 13-13*a*) produce un caucho que, debido a sus pérdidas de histéresis relativamente bajas, se emplea en neumáticos de automóviles. El negro de humo incrementa la resistencia al desgaste.

La mayor parte de los cauchos sintéticos son copolímeros aleatorios. Por ejemplo, el caucho butílico es un copolímero de isobuteno y de algunas unidades de isopreno; con el isopreno, proporciona los sitios para la formación de enlaces cruzados. La alta pérdida de histéresis de este caucho lo hace adecuado para soportes antivibratorios para motor.

Para todas las aplicaciones, la T_g del caucho debe ser menor que la temperatura de servicio más baja. El caucho de silicón sirve hasta –90°C, la mayoría de los demás a temperaturas entre –50 y –60°C.

Ya se analizaron el copolímero termoplástico estireno-butadieno (Fig. 13-13*e*) y los elastómeros de poliuretano (Fig. 13-13*d*). Los poliuretanos pueden ser termofijos elastoméricos. Forman recubrimientos tenaces y resistentes a la abrasión. Se forman grandes cantidades como espumas, variando de suaves (asientos, acolchados), semiflexibles (acolchado de tablero de instrumentos de automóviles), rígidos (aislamiento), a espumas de alta densidad (estructural). Se pueden fundir y hacer de un prepolímero, o en procesos de un paso usando monómeros, como en el moldeo por reacción-inyección (Secc. 14-3-4). Reforzados con vidrio u otras fibras, sirven como tableros para puertas, tapas de cajuelas y guardafangos de automóviles. Los fluoroelastómeros encuentran aplicación en ambientes de alta temperatura, en ambientes corrosivos, en motores y en plantas de electricidad. Los elastómeros de silicón se rellenan normalmente con sílice.

13-8 RESUMEN

Los polímeros han sido indispensables para los humanos durante milenios. La madera fue y es aún uno de los materiales estructurales más importantes. La madera y sus productos, así como las fibras animales y vegetales fueron los únicos polímeros orgánicos disponibles hasta hace muy poco. Los polímeros orgánicos manufacturados, comenzando con el celuloide y siguiendo con la baquelita, se consideraban como materiales sustitutos. Sin embargo, el fenomenal desarrollo de la industria de los polímeros ha cambiado nuestro panorama tecnológico en los últimos 60 años. Los polímeros rara vez se emplean en su forma pura; suelen combinarse con colorantes, rellenos y otros aditivos. Por tanto, al producto se le clasifica con mayor propiedad como plástico. Desde recipientes a empaques, desde utensilios caseros a juguetes, desde componentes eléctricos y electrónicos a telas, y desde engranes a estructuras de aeronaves, los plásticos han avanzado hasta conquistar los mercados de los materiales tradicionales.

Gran parte de este éxito se debe atribuir a la investigación básica que ha proporcionado una mejor comprensión de sus propiedades y los procesos, y a la transferencia de este entendimiento a la práctica. Por medio de la manipulación de la estructura molecu-

lar y de la secuencia de procesamiento, se puede obtener una variedad sin precedentes de productos con propiedades excepcionales. Desde el punto de vista de la manufactura, hay dos clases importantes fundamentalmente diferentes de polímeros: sustancias termoplásticas y termofijas.

1. Los polímeros termoplásticos tienen un flujo viscoso o viscoelástico cuando se calientan por arriba de una temperatura crítica. Éste es el punto de fusión T_m en los polímeros cristalinos (y por lo tanto opacos), y la temperatura de transición vítrea T_g en los polímeros amorfos (y transparentes). Así, estos plásticos se pueden fabricar en la forma deseada al calentarlos, y la forma se fija al enfriarlos. El proceso se puede repetir y además se pueden reciclar.
2. Los plásticos termofijos se deben llevar a su forma final antes de que ocurran la polimerización y la formación de enlaces cruzados bajo la influencia del calor o de los catalizadores. Una vez que la polimerización se completa, la parte es una molécula individual, gigante, con red espacial y el proceso es irreversible. El potencial para reciclarlos es limitado.
3. Los elastómeros pueden ser termoplásticos amorfos con enlaces cruzados, con una temperatura de transición vítrea por debajo de la temperatura ambiente. Están relacionados con las resinas termofijas, pues la formación de enlaces cruzados debe suceder durante o inmediatamente después del formado. Actualmente, los elastómeros termoplásticos también están disponibles.

PROBLEMAS 13A

13A-1 Haga bocetos simples de los arreglos moleculares para polímeros (*a*) amorfos, (*b*) cristalinos, (*c*) de cristal líquido y (*d*) con enlaces cruzados.

13A-2 Una propiedad que caracteriza al flujo de los polímeros termoplásticos es la viscosidad. (*a*) Defina la viscosidad con la ayuda de un bosquejo y de la ecuación relevante. (*b*) Defina la viscosidad aparente. (*c*) Haga una gráfica que muestre la variación típica de la viscosidad aparente para un polímero adelgazado por cortante, como una función de la tasa de deformación.

13A-3 Muchos aceites son parafinas y se forman con las mismas unidades que el polietileno (Fig. 13-1); sin embargo, son líquidos a temperatura ambiente. Explique la razón.

13A-4 Determine la diferencia entre un polímero seudoplástico y uno adelgazado por cortante. Defina para cada uno la respuesta característica al esfuerzo cortante.

13A-5 Establezca la mayor diferencia en la estructura molecular entre polímeros (*a*) termoplásticos y (*b*) termofijos (utilice bocetos, si lo desea).

13A-6 Explique bajo qué condición los polímeros (*a*) termoplásticos y (*b*) termofijos se pueden deformar plásticamente.

13A-7 Describa los cambios en el arreglo molecular que ocurren al enfriar desde la temperatura de fusión un polímero (*a*) amorfo, (*b*) parcialmente cristalino y (*c*) termoplástico de cristal líquido (use bosquejos, si lo desea).

13A-8 Dibuje modelos de resorte-amortiguador para materiales (*a*) viscosos, (*b*) elásticos y (*c*) dos viscoelásticos. (*d*) ¿Cuál presentará deformación permanente una vez que se descargue?

13A-9 Haga un boceto que indique el cambio de volumen específico como una función de la tem-

peratura para un polímero termoplástico, dibujando (*a*) una línea para un polímero amorfo y (*b*) otra línea para un polímero parcialmente cristalino. (*c*) Identifique las temperaturas críticas. (*d*) Indique el comportamiento reológico usual en cada régimen de temperatura.

13A-10 Dibuje un diagrama que muestre el cambio en el módulo elástico como una función de la temperatura para un polímero amorfo en un tiempo de carga (*a*) corto y (*b*) largo.

13A-11 Realice un boceto de los modelos de resorte-amortiguador con los dos (*a*) en paralelo y (*b*) en serie. Debajo dibuje la deformación desarrollada como respuesta a la carga en un tiempo t_0, y a la remoción de la carga en un tiempo t_1.

PROBLEMAS 13B

13B-1 Defina el término cristal para (*a*) metales y (*b*) polímeros (use bosquejos, si lo desea).

13B-2 Dibuje un sistema de coordenadas, con la tasa de deformación por cortante como la abscisa y el esfuerzo cortante como la ordenada. Trace las rectas que corresponden al (*a*) flujo newtoniano, (*b*) flujo seudoplástico, (*c*) flujo dilatante y (*d*) comportamiento de Bingham. ¿Cuál de éstos es deseable para (*e*) llenar un molde de forma compleja bajo presión y para (*f*) una pintura que se va a aplicar a una superficie vertical. Justifique su respuesta.

13B-3 (*a*) Con referencia a temperaturas características, liste los regímenes de la respuesta mecánica de los polímeros amorfos. (*b*) Determine en qué régimen se obtiene el producto más estable dimensionalmente. Justifique su respuesta.

13B-4 Para los polímeros termoplásticos, indique qué efectos tiene un incremento de las siguientes variables sobre la viscosidad aparente: (*a*) temperatura, (*b*) peso molecular, (*c*) presión y (*d*) presencia de ramificaciones laterales de cadena larga. Dé su razonamiento para cada elección.

13B-5 Explique, breve y sencillamente por qué una pieza puede cambiar su forma en uso (utilice un modelo de resorte-amortiguador; también refiérase a los cambios en el arreglo molecular).

13B-6 Establezca los efectos de la presión hidrostática en la (*a*) resistencia y (*b*) ductilidad de metales, y (*c*) la viscosidad de las fusiones de polímeros.

13B-7 Por medio de principios básicos, deduzca formas para reciclar el desperdicio después que el consumidor desechó los productos si el material es (*a*) polietileno de baja densidad o (*b*) resina fenólica rellena con aserrín. Liste tantas posibilidades como pueda.

13B-8 Un estudiante escribió: "los elastómeros son polímeros termofijos". Realice una crítica.

13B-9 Un estudiante escribió: "no hay temperatura de transición vítrea en los polímeros termoplásticos cristalinos". Critique esta afirmación.

13B-10 Hay una temperatura de transición vítrea en (*a*) vidrio y (*b*) polímeros. Explique si existen diferencias, en términos de la respuesta a los esfuerzos impuestos tanto por arriba como por debajo de T_g.

13B-11 Explique la diferencia entre (*a*) fusiones de metal y (*b*) fusiones de polímeros, en términos de la respuesta a los esfuerzos impuestos.

13B-12 Las dimensiones de una pieza de plástico cambian gradualmente en varias semanas. (*a*) Para explicarlo, realice un bosquejo del modelo más simple de resorte-amortiguador que ilustre ese comportamiento. (*b*) ¿Esperaría que éste sea un polímero termoplástico o termofijo? (*c*) ¿Qué más podría concluir acerca del plástico?

13B-13 Un compañero afirma que los polímeros termoplásticos son deformables y que los termofijos no. ¿Está usted de acuerdo? Justifique su respuesta.

PROBLEMAS 13C

13C-1 Algunas veces el comportamiento de los materiales sensibles a la tasa de deformación se expresa con la ecuación

$$\dot{\varepsilon} = b\sigma^n \quad \text{o} \quad \dot{\gamma} = B\tau^n$$

donde b y B son constantes del material y n el exponente de sensibilidad a la tasa de deformación (no confundirse con el valor n: el exponente de endurecimiento por deformación). ¿Cuál es el valor de n para (*a*) un fluido newtoniano y (*b*) un material ideal rígido-plástico, no sensible a la rapidez de deformación? (*c*) ¿Cuál es la razón de esta n respecto a la m en la ecuación (13-4)?

13C-2 ¿Cuál de los polímeros que se listan en la tabla 13-2 es viscoelástico a temperatura ambiente? Justifique su respuesta.

13C-3 Un diseño requiere que la junta del ejemplo 13-6 permanezca bajo un esfuerzo de 12 MPa, después de 2 años de servicio. Calcule el esfuerzo inicial requerido.

13C-4 En el ejemplo 13-1 se determinó que el UHMWPE tenía un grado de polimerización de 143 000. Por comparación, calcule el grado de polimerización para un grado de moldeo por soplado de HDPE del ejemplo 13-2.

13C-5 Debido a su bajo costo, el PP a menudo se especifica para aplicaciones a temperatura ambiente. (*a*) Verifique la T_g de la tabla 13-2. (*b*) Con esta base, ¿esperaría una termofluencia importante a temperatura ambiente? (*c*) Si la respuesta es afirmativa, explique por qué el plástico aún es útil.

13C-6 La cristalinidad depende, entre otros factores, de la estructura molecular. A partir de la información disponible en este libro, coloque en orden creciente de probabilidad la cristalinidad de los siguientes polímeros: LDPE, HDPE, PP y poliestireno. Justifique su respuesta.

13C-7 Una pieza se diseña para usarse a una temperatura de 200°C. Partiendo de la información de la tabla 13-2, ¿qué polímeros serían su primera y segunda elección? Justifique su respuesta.

LECTURAS ADICIONALES

Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 4a. ed., Wiley Interscience, 1991-1998 (numerosos artículos acerca de polímeros individuales).

Harper, C.: *Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites*, 3a. ed., McGraw-Hill, 1997.

McCrum, N.G., C.P. Buckley y C.B. Bucknall: *Principles of Polymer Engineering*, Oxford University Press, 1989.

Progelhof, R.C. y J.L. Throne: *Polymer Engineering Principles: Properties, Tests for Design*, Hanser, 1993.

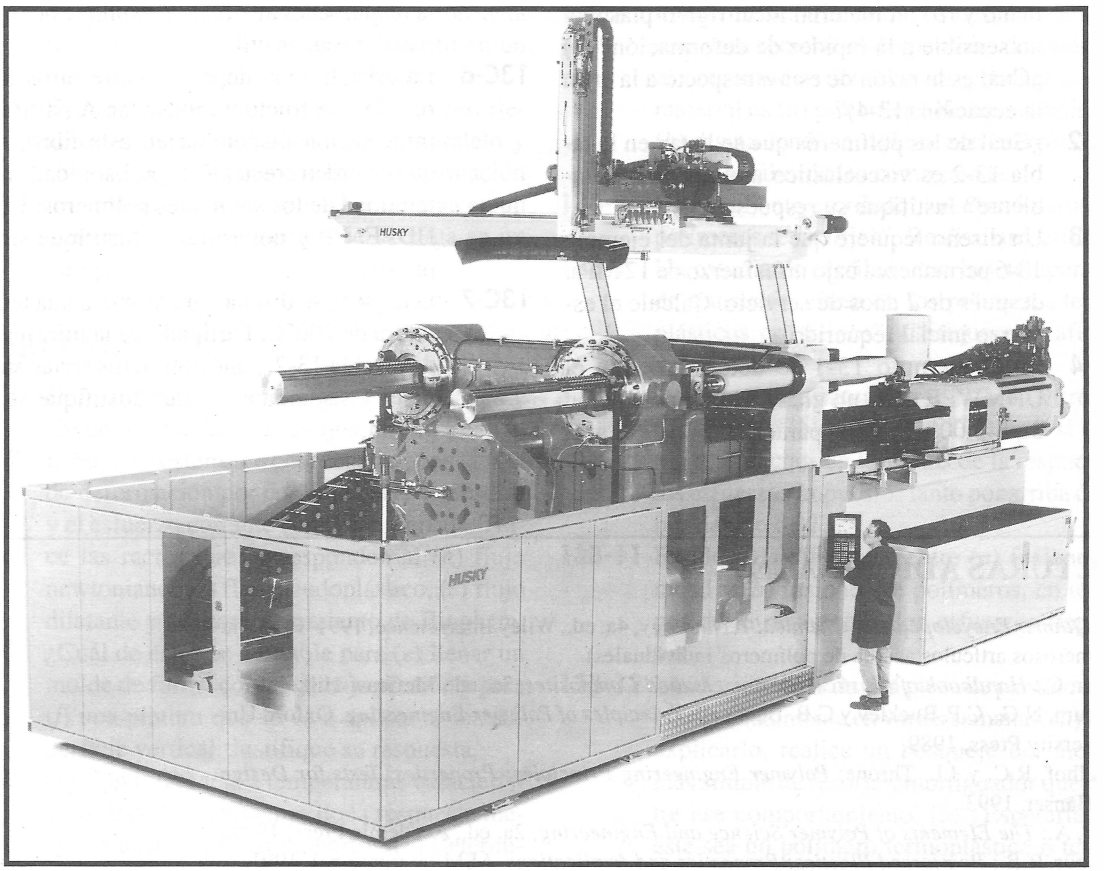
Rudin, A.: *The Elements of Polymer Science and Engineering*, 2a. ed., Academic Press, 1999.

Seymour, R.B.: *Reinforced Plastics: Properties and Applications*, ASM International, 1991.

Ulrich, H.: *Introduction to Industrial Polymers*, Hanser, 1993.

Wollrath, L. y H.G. Haldenwanger: *Plastics in Automotive Engineering*, Hanser, 1994.

Young, R.J. y P. Lovell: *Introduction to Polymers*, Chapman and Hall, 1991.



Un robot de acceso superior retira una defensa moldeada para un automóvil de una máquina de moldeo por inyección de plástico de 20 MN con dos platinas. (*Cortesía de Husky Injection Molding Systems Ltd., Bolton, Ontario.*)

capítulo

14

Procesamiento de plásticos

Ahora estamos listos para ver cómo se explotan las propiedades de los plásticos para fabricar una gran variedad de productos por medio de distintas técnicas, incluyendo:

El vaciado de cuerpos sólidos y huecos, a menudo de formas muy complejas

El procesamiento de fusiones bajo presión para crear extrusiones o partes tridimensionales moldeadas

El soplado de preformas previamente moldeadas para fabricar botellas y recipientes abiertos

El conformado de lámina y película en partes con frecuencia muy grandes, como cascos de botes

La creación de partes a través de reacciones en un molde

La producción de espumas para uso estructural y en artículos de consumo

Muchas técnicas de procesamiento para polímeros tienen sus contrapartes en los procesos para metales y cerámicos; de ahí que sean analizados con referencia a los principios introducidos anteriormente. En general, los plásticos se pueden procesar a temperaturas mucho más bajas que los metales, lo que elimina muchas dificultades de procesamiento y permite algunos procesos que no son prácticos para los metales. Es factible procesar varios plásticos por medio de distintas técnicas, aunque algunas son más adecuadas que otras, lo cual se indica cuando es oportuno.

14-1 CLASIFICACIÓN

La mayor parte de los procesos es adecuada para fabricar diversos productos de una gran variedad de plásticos; por lo tanto, la clasificación según el proceso, y no de acuerdo con el producto o material, es más relevante (Fig. 14-1). Siguiendo la lógica adoptada al tratar los procesos para transformación de metales, los procesos de manufactura de plásticos se analizan de acuerdo a su temperatura en orden descendente. Se debe

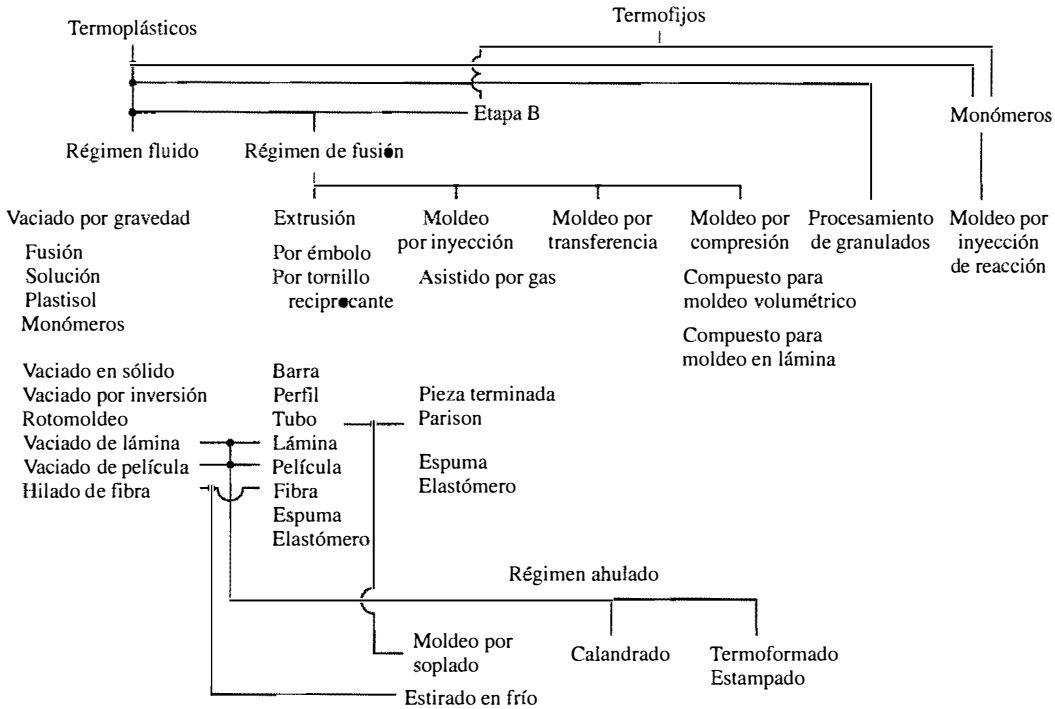


Figura 14-1 Secuencias de procesamiento para plásticos. (*Adaptada de J.A. Schey, ASM Handbook, vol. 20, Materials Selection and Design, ASM International, 1997, p. 699. Con permiso.*)

notar que en muchos casos un plástico se puede someter a una secuencia de pasos de procesamiento. La terminología es algo difusa; así que se aplicará una clasificación basada en los principios físicos en vez de en los nombres de los procesos.

14-2 VACIADO

El término *vaciado* se empleará aquí para describir el *llenado de un molde mediante la gravedad*. En consecuencia, el material debe tener una viscosidad lo suficientemente baja para fluir con libertad. Esto se logra por varios medios:

1. Los termoplásticos se pueden calentar más allá de su T_m (*plásticos de fusión caliente*) y vaciarse en moldes. En una variante, las partes de nylon de alto peso molecular, altamente cristalinas, y por tanto fuertes, como los engranes y cojinetes, se obtienen fundiendo el monómero, agregando el catalizador y el activador, y vaciando la mezcla en los moldes.

2. Las resinas líquidas pueden ser monómeros (como resinas epóxicas) o polímeros de cadena corta (como poliéster de etapa A o B, o termofijos fenólicos). Cuando el

polímero se utiliza para fijar un componente, se habla de *embebido*; cuando rodea completamente al componente, de *encapsulación*.

En todos los casos, la ausencia de humedad es crítica y los gases deben eliminarse del líquido procesando en vacío, o se deben mantener en solución mediante la aplicación de presión durante la polimerización. Los moldes se pueden fabricar de metal, vidrio y plásticos rígidos o flexibles. Estos últimos se pueden desprender de las piezas vaciadas, permitiendo así la producción de formas complejas y sesgadas. Igual que en el vaciado de metales, la contracción puede presentar problemas, especialmente en los acrílicos que se contraen mucho durante la polimerización. Los vacíos internos pueden colapsar la superficie. Las reglas para diseñar piezas metálicas fundidas (Secc. 7-8-2) se pueden adaptar a los plásticos.

3. Entre los termoplásticos, la lámina de PMMA se produce vaciando MMA catalizado entre placas de vidrio (*fundición en celdas*), o entre bandas sinfín de acero inoxidable (*fundición continua*). La polimerización ocurre por el calentamiento. Los tiempos de procesamiento son menores cuando se funde un "jarabe" parcialmente polimerizado.

4. La fundición de *plastisoles* es de gran importancia, especialmente para el PVC flexible. Un plastisol es una suspensión de partículas de PVC en el plastificante; fluye como un líquido y se puede vaciar en un molde caliente. Cuando se calientan alrededor de los 177°C, el plástico y el plastificante se disuelven mutuamente. Al enfriar el molde por debajo de 60°C, resulta un producto flexible, permanentemente plastificado. La fundición por inversión se utiliza mucho en productos de pared delgada, como botas para nieve, guantes y juguetes. Los termofijos también se pueden fundir por inversión al vaciar el prepolímero en un molde caliente y drenándolo después de que se cura una capa.

5. También es posible fundir las soluciones (*jarabes*, como un polímero acrílico disuelto en un monómero acrílico) y los *organisoles* (en los cuales el polímero se disuelve en un solvente volátil). Así, las soluciones de polímeros, especialmente de PVC, se funden en una banda móvil de acero inoxidable (*fundición* de películas por *solvente*). En la *hilandería húmeda*, las fibras se forman pasando la solución a través de matrices estacionarias con agujeros múltiples (llamadas tradicionalmente *hileras* en la industria textil). Debido a la trayectoria corta de difusión, el solvente se elimina fácilmente mediante calentamiento y puede recircularse. De esta forma se fabrican grandes cantidades de acetato y triacetato de celulosa, así como de fibras de poliacrilonitrilo.

6. El *moldeo rotacional*, también llamado *rotomoldeo*, es una variante del vaciado por inversión, y aunque se llama moldeo, se clasifica apropiadamente dentro de los procesos de fundición. Una cantidad medida de polímero (líquido o en polvo) se coloca en un molde metálico de pared delgada, y éste se calienta mientras gira respecto a dos ejes perpendiculares entre sí (Fig. 14-2). Los termoplásticos (como el PE, el nylon, o el policarbonato) se funden, en tanto que los termofijos se polimerizan y forman enlaces cruzados. El molde se enfría y la pieza se retira. Para incrementar la tasa de producción, con frecuencia se emplean carruseles de tres brazos, con un molde en cada una de las posiciones: carga-descarga, calentamiento y enfriamiento. Como la presión no está involucrada, el molde es simple. La pieza no experimenta esfuerzos inducidos por el moldeo. El proceso es adecuado para producir piezas grandes, de pared relativamente

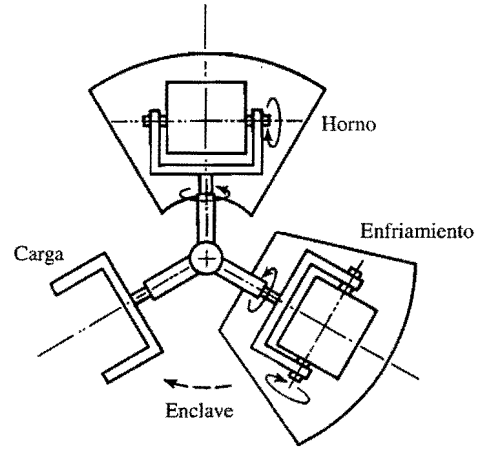


Figura 14-2 El rotomoldeo produce productos huecos girando el molde alrededor de dos ejes mutuamente perpendiculares; tres estaciones aceleran la producción.

delgada y huecas (abiertas o cerradas). Incluso es factible fabricar piezas muy grandes (como recipientes de 80 000 litros). La técnica también es adecuada para plastisoles.

14-3 PROCESAMIENTO POR FUSIÓN (MOLDEO)

La mayor parte de los plásticos presenta alta viscosidad, aun a altas temperaturas, para fluir bajo la acción de la gravedad; entonces, el término *procesamiento por fusión* se refiere a las técnicas en las que los polímeros son deformados *con la ayuda de una presión aplicada*. Esto es válido tanto para los termoplásticos como para los termofijos. Los *procesos de extrusión* resultan en una varilla, tubo, lámina o película (y son equivalentes, en su producto final, a la extrusión de metal); los *procesos de moldeo* producen una pieza terminada (y son semejantes a la fundición en matrices o al forjado en caliente en metales). Aunque estos procesos están relacionados con algunos de los procesos para transformación de metales previamente analizados, hay diferencias importantes que son características de las propiedades de los plásticos.

14-3-1 Principios del procesamiento por fusión

Por definición, el plástico debe ser capaz de actuar como un flujo viscoso.

Termoplásticos Un termoplástico debe calentarse por encima de T_m para los polímeros cristalinos, y muy por encima de T_g para los polímeros amorfos. La forma se fija

enfriándolo muy por debajo de T_g (o, para los polímeros cristalinos, por debajo de T_m). Respecto a los metales, hay dos puntos que se deben observar: primero, se pueden aplicar métodos especiales para producir y transportar el material viscoso, y segundo, los efectos viscoelásticos pueden causar cambios en la forma moldeada.

1. El material inicial normalmente es polvo, granos, fibra cortada en trozos, lámina molida o, en el caso de material reciclado, cortado (remolido) y, algunas veces, desperdicio compactado. Se pueden llevar a cabo el transporte y la consolidación por tornillo. Si se desea evitar burbujas de gas, el plástico debe estar libre de agua. El calentamiento puede ser parcialmente externo y parcialmente interno (transformando el trabajo del cortante viscoso en calor). El sobrecalentamiento puede causar daño permanente. Por ejemplo, el PMMA se despolimeriza y se forman burbujas de gas del monómero; el PVC necesita estabilizadores; el PE y el PS son relativamente insensibles; algunos otros (como el poliacetal con PVC) pueden formar incluso mezclas explosivas.

2. El cambio sustancial de volumen en el enfriamiento (Fig. 13-5*a*) refleja la reducción en el volumen libre, provocada por el reacomodo de moléculas y por el establecimiento de enlaces secundarios. Como éstos son procesos dependientes del tiempo, la contracción se eleva con un enfriamiento más lento (mayor temperatura de fusión), la disminución de la presión y el tiempo reducido de deformación (mayor tasa de deformación).

3. La solidificación rápida también significa que la orientación de las moléculas desdobladas estará congelada. La orientación quizá sea deseable cuando las moléculas están alineadas en dirección del esfuerzo máximo de servicio, pero puede causar distorsión durante el servicio. La distorsión se minimiza si a las moléculas se les da tiempo para que se vuelvan a enrollar antes del congelamiento. Desafortunadamente, las medidas que reducen la distorsión también incrementan la contracción; de ahí que el colapso de la superficie sea común en las secciones más gruesas. Además, como las partes gruesas se enfrían más lentamente, las moléculas tienen mayor tiempo para volver a enrollarse dentro de la capa ya solidificada, originando así esfuerzos residuales.

Termofijos En la sección 13-3 se vio que, antes de la formación de enlaces cruzados (es decir, en la etapa A o B), los polímeros termoestables son capaces de fluir bajo presión. Pueden ser granulares, y por lo tanto se tratan como polvos; o se pueden convertir en termoplásticos al calentarse. Por ello, las técnicas de procesamiento son similares a las empleadas para los termoplásticos. Sin embargo, hay una diferencia importante: mientras que los termoplásticos se enfrían para fijar su forma, los termofijos deben mantenerse en un molde caliente por un tiempo suficiente para que ocurran la polimerización y la formación de enlaces cruzados. Algunos polímeros se pueden retirar del molde tan pronto como se fija su forma, y luego se obtiene una formación completa de enlaces cruzados durante su enfriamiento o al mantenerlos en un horno separado. En otras ocasiones, la formación de enlaces cruzados comienza en cuanto se calientan; después, el prepolímero debe ser introducido en un molde frío, y éste debe someterse a un ciclo de calentamiento y enfriamiento para cada pieza, lo cual provoca un tiempo de ciclo muy largo.

14-3-2 Extrusión

La *extrusión* es responsable de un mayor volumen de producción, ya que se usa no sólo para la producción de barras, tubos, láminas y películas en materiales termoplásticos, sino también para el mezclado minucioso de todas las clases de plásticos y para la producción de gránulos. La extrusión con émbolo (similar al de la Fig. 9-28*b*) se restringe a casos especiales (como la extrusión de PTFE); la primera diferencia importante en relación con la extrusión de metal es el uso de *extrusores de tornillo*.

Extrusores de tornillo En su forma básica, el equipo es completamente estándar (Fig. 14-3). El polímero se alimenta a través de una *tolva* hasta un *cañón*, en el cual un tornillo *helicoidal* transporta el polímero hacia el extremo con matriz. El tornillo tiene tres secciones: la *sección de alimentación* de diámetro de raíz constante (profundidad constante de la cuerda) toma los gránulos o pastillas de la tolva de alimentación y los mueve a la *sección de compresión* (*sección de fusión, sección de transición*), en la que la cuerda cuya sección transversal se reduce gradualmente, comprimen los gránulos reblandecidos. El cortante viscoso suele generar calor suficiente para que el polímero esté a la temperatura requerida; el cañón se calienta externamente para compensar las pérdidas de calor, o puede enfriarse el cañón (o el tornillo) para evitar el sobrecalentamiento. Al final de esta sección se suministra un fluido viscoso a la *sección de medi-*

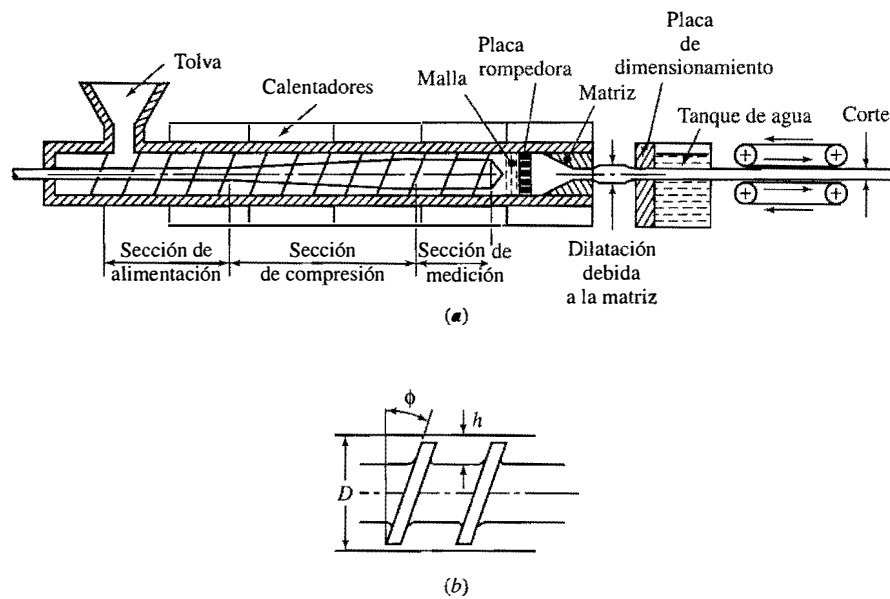


Figura 14-3 Una resina termoplástica, cargada en un extrusor de tornillo, se comprime, funde y extruye a través de una matriz. Al salir de ésta, el producto extruido se enfría y se reduce la dilatación de la matriz jalando a través de una placa de dimensionamiento bajo tensión controlada (a). El tornillo tiene cuerda con profundidad h y ángulo de paso ϕ (*b*).

ción. Ésta, igual que la sección de alimentación, tiene una zona transversal libre constante, pero menor. Aquí la fusión se calienta aún más por cortante a una alta rapidez.

El diseño del tornillo es crítico. El ángulo de paso ϕ suele ser de 17.5°, pero puede ser mayor para algunos plásticos. La *razón de compresión* (la razón de las áreas libres al inicio y final del tornillo, que varía por lo general de 2:1 a 4:1) y la longitud (o, en forma más propia, la *razón longitud-diámetro*, que va de 16:1 a 32:1) del tornillo se eligen con la debida consideración del polímero. Los polímeros sensibles al calor (como el PVC) se extruyen con cortante mínimo, en tanto que los que tienen un punto de fusión agudo (como el nylon) requieren una sección de medición larga y una sección de compresión corta. Para una operación exitosa, las temperaturas (de calentamiento y enfriamiento), la contrapresión, la velocidad del tornillo, la rapidez de inyección, etc., deben estar estrechamente controladas. El control de la temperatura a lo largo del barril se vuelve aún más crítico cuando se usa un *tornillo de propósito general* de diseño característico para una variedad de plásticos. El tornillo puede tener dos secciones, lo cual permite la descompresión cerca de la mitad del cañón, de manera que los gases se puedan ventilar, para posteriormente acumular presión nuevamente.

Para evitar que cualquier polímero sin fundir o que alguna basura atrapada entre a la extrusión, se coloca una *malla* (pantalla de alambre delgado) en la corriente de polímero. A ésta la soporta una *placa de rompimiento* robusta con numerosos agujeros de cerca de 3 mm de diámetro. La pantalla incrementa la contrapresión, mejorando de esta manera el mezclado y la homogeneización; el flujo a través de la placa de rompimiento elimina la "memoria de giro" de la fusión. Después, las corrientes de plástico se reúnen antes de ingresar a la matriz; la temperatura es suficientemente alta para asegurar una continuidad completa. Las presiones en la entrada de la matriz son entre 1.5 y 15 (y con menor frecuencia, hasta de 70) MPa.

Los *extrusores de tornillos gemelos y múltiples* son más adecuados para materiales sensibles al calor como el PVC rígido, ya que dependen menos del esfuerzo cortante y del arrastre para mover el material: los tornillos interengranados proporcionan una alimentación positiva con cortante mínimo.

Entrega del tornillo En la sección 7-2-1 se analizó que al cortar un fluido entre dos superficies se establece un esfuerzo cortante. Éste crea un *flujo de arrastre* a través del cañón del extrusor (Fig. 14-3*a* y *b*) con un gasto de q_{dr}

$$q_{dr} = 0.5\pi^2 D^2 N h \operatorname{sen}\phi \cos\phi \tag{14-1}$$

que es el gasto máximo posible para un extrusor dado. El transporte del plástico a través de la sección transversal libre con decremento gradual, así como la resistencia de la malla, genera una contrapresión que reduce la tasa de flujo mediante el *flujo de contrapresión* q_{bp}

$$q_{bp} = \frac{p\pi D h^3 \operatorname{sen}^2\phi}{12\eta L} \tag{14-2}$$

Así, el gasto del extrusor es

$$q_e = q_{dr} - q_{bp} \tag{14-3}$$

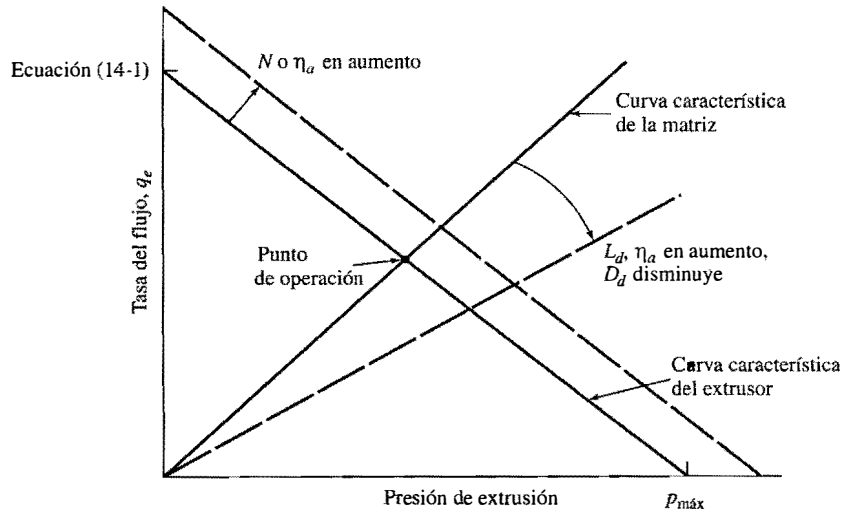


Figura 14-4 Las características de producción de un extrusor dado y la contrapresión desarrollada por la matriz determinan la tasa del flujo para un conjunto dado de condiciones de operación.

donde D = diámetro (m) del tornillo (cañón), h = profundidad del canal de la cuerda (m), L = longitud del cañón (m), N = revoluciones por segundo del tornillo, p = presión en el cañón, ϕ = ángulo de la cuerda (grados), y η = viscosidad (N · s/m²). También hay una pequeña pérdida de gasto, normalmente despreciable, debida a la fuga del flujo en la separación entre el tornillo y el cañón. Aunque la contrapresión reduce el flujo, es esencial para la plastificación apropiada. En el límite, la contrapresión se vuelve lo suficientemente alta como para reducir la salida a cero; en este punto, $q_{dr} = q_{bp}$ y la presión máxima es

$$p_{máx} = \frac{6\pi DNL\eta \cot \phi}{h^2} \qquad \textbf{(14-4)}$$

Esto proporciona el punto final de la *curva característica del extrusor* (Fig. 14-4). Para un extrusor dado, los términos de la geometría en las ecuaciones (14-1) y (14-2) son constantes, y la ecuación (14-3) se reduce a

$$q_e = \alpha N - \left(\frac{\beta p}{\eta}\right) \qquad \textbf{(14-3')}$$

Esta forma muestra claramente que la salida se eleva con el incremento de la velocidad, con lo que disminuye la presión y aumenta la viscosidad de la fusión. Sin embargo, en este tratamiento sencillo se ignoran los efectos de la fricción y del comportamiento no newtoniano (Fig. 13-6), el cual produce soluciones analíticas mucho menos confiables que para la extrusión de metal, así que normalmente se necesitan modelos numéricos

más complejos, que utilizan la viscosidad aparente a la temperatura y la tasa de deformación apropiadas.

Una estimación útil de la capacidad de un extrusor típico de un solo tornillo para $L/D = 24$ se puede obtener simplemente a partir del diámetro del tornillo (D mm o pulg):

$$q_e = C_e D^{scr} \tag{14-5}$$

donde C_e y el exponente scr son constantes empíricas. Los valores de las constantes que se dan en la literatura subestiman el gasto; los valores que se recomiendan a continuación concuerdan mejor con las salidas establecidas por Levy y Carley [S. Levy y J.F. Carley (eds.), *Plastics Extrusion Technology Handbook*, 2a. ed., Industrial Press, 1989, p. 270].

	Usual		Recomendado	
	C_e	scr	C_e	scr
Para gasto en kg/h	0.006	2.2	0.006	2.3
Para gasto en lb/h	16	2.2	20	2.35

El gasto real puede diferir en ±20%, siendo mayor en tornillos especialmente diseñados. Una aproximación alterna para la estimación de la capacidad se basa en la suposición de que, en esencia, todo el calor se obtiene del trabajo mecánico (el calor externo sólo compensa pérdidas de calor):

$$q_e = \frac{2\ 700\ (\text{h}W)}{C_p \Delta T} \tag{14-6}$$

donde C_p = capacidad calorífica (kJ/kg · K) y ΔT es el incremento de temperatura en °C. (La capacidad calorífica a temperatura ambiente de los plásticos sin relleno suele ser de 1.2 kJ/kg · K para el poliestireno, 1.7 para el nylon y PP, y 2.3 para el LDPE y acrílicos; la capacidad calorífica aumenta con la temperatura.) Esta fórmula también es útil para estimar el incremento de la temperatura si se conoce la potencia (kW). Casi con exactitud, el requerimiento de la energía es 0.15 kWh/kg.

La baja conductividad térmica de los plásticos limita la rapidez de enfriamiento, por lo tanto, la velocidad de extrusión (la de la extrusión que emerge) es muy sensible a la sección transversal. Varía de algunos mm/min para una varilla de 250 mm de diámetro a 1 000 m/min para recubrimiento de alambre, con 3 m/min, usual en muchos productos.

Ejemplo 14-1

Un extrusor de tornillo tiene un tornillo de diámetro $D = 75$ mm, con cuerda de $h = 5$ mm de altura y un ángulo de paso de 17.5° en la sección de medición. El tornillo gira a 100 rev/min. El plástico tiene una densidad de 1 g/cm³. Calcule (*a*) la salida para contrapresión cero, (*b*) la salida

que se debe esperar para condiciones usuales, (*c*) el requerimiento aproximado de potencia, y (*d*) el incremento de la temperatura obtenible con PP.

(*a*) De la ecuación (14-1)

$$q_{dr} = 0.5\ \pi^2(75^2)\ (100/60)\ (5)(\text{sen } 17.5)(\cos 17.5) = 66\ 340\ \text{mm}^3/\text{s} = 239\ \text{kg/h}$$

Esto se reduce por el flujo de contrapresión, debido a la resistencia en la malla y en la matriz.

(*b*) De la ecuación (14-5), $q_e = 0.006(75^{2.3}) = 123$ kg/h o aproximadamente la mitad de la salida máxima.

(*c*) Con kW = 0.15 kWh/kg, el requerimiento de potencia es 0.15(123) = 18.45 kW.

(*d*) De la ecuación (14-6), $\Delta T = (2\ 700)\ (18.45)\ /\ (123)\ (1.7) = 238°C$, lo que lleva al plástico hacia su rango de temperatura usual de procesamiento (tabla 13-2).

Matrices El flujo a través de la matriz genera una contrapresión que se debe tomar en cuenta al calcular la salida. Para un canal cilíndrico sencillo (Fig. 14-5*a*), la rapidez de éste está dada por la ecuación de Poiseuille

$$q_c = \frac{p\pi D_d^4}{128\eta_a L_l} \tag{14-7}$$

donde D_d = diámetro de la matriz, L_l = longitud del campo (parte recta) de la matriz, y η_a = viscosidad aparente. Así, la velocidad del flujo aumenta linealmente con la presión, con lo que se obtiene la llamada *curva característica de la matriz* (Fig. 14-4). Note que D_d está a la cuarta potencia, por lo que las dimensiones de la matriz tienen un efecto extremadamente poderoso sobre la salida del extrusor (*punto de operación*). Más allá de esto, los detalles del diseño de la matriz son críticos para la producción de una buena extrusión.

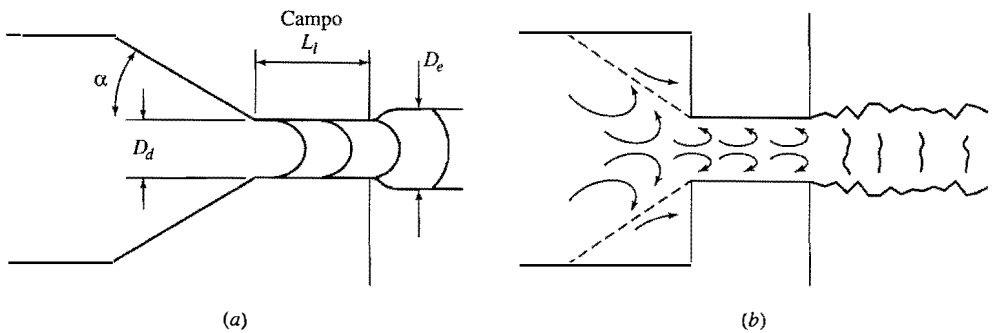


Figura 14-5 (a) Una matriz ahusada con un campo largo contribuye al flujo ordenado y a una dilatación mínima debida a la matriz. (*b*) Una matriz de cara plana crea una zona de material muerto y flujo turbulento, que conduce a la fractura de la fusión.

Hay varias similitudes con la extrusión de metal, una de las cuales es la formación de una zona de material muerto (como en la Fig. 9-28*a*) con una matriz de cara plana (*matriz placa*). El cortante en los límites de esta zona causa degradación térmica de los plásticos sensibles al calor como el PVC. Además, el flujo turbulento puede provocar la fractura de la fusión (Fig. 14-5*b*). Una entrada ahusada, como en la figura 9-28*b*, pero con un ángulo incluido que suele ser de 60° (Fig. 14-5*a*), mejora la situación; una matriz aerodinámica proporciona un flujo óptimo. Con frecuencia las matrices tienen una longitud paralela relativamente larga (campo) para orientar las moléculas y controlar las dimensiones. Sin embargo, en contraste con los metales, ni la forma ni las dimensiones de la extrusión son fijas. Al salir de la matriz, se liberan los esfuerzos internos, las moléculas se vuelven a enrollar, y la *dilatación debida a la matriz* aumenta las dimensiones (Fig. 14-5*a*). Una matriz ahusada y un campo largo minimizan pero no pueden eliminar la dilatación debido a la matriz.

Barras redondas. El incremento del diámetro no es preocupante si la extrusión se corta para gránulos, pero se debe corregir para extrusiones estructurales. Normalmente se toman dos medidas: primero, la barra se pasa a través de una *matriz de calibración* (*placa de dimensionamiento*) mientras se enfría con agua (u ocasionalmente con aire); segundo, se desarrolla tensión mediante un dispositivo de tracción continua tal como un juego de bandas u orugas gemelas que se apoyan en la superficie de la barra (Fig. 14-3). Los materiales seudoplásticos (por ejemplo, el PVC) son más fáciles de trabajar porque desarrollan resistencia suficiente al emerger de la matriz; otros podrían colgarse si no se enfrían ni reciben tensión suficiente. La barra se corta a la longitud deseada o, si es permisible, se enrolla.

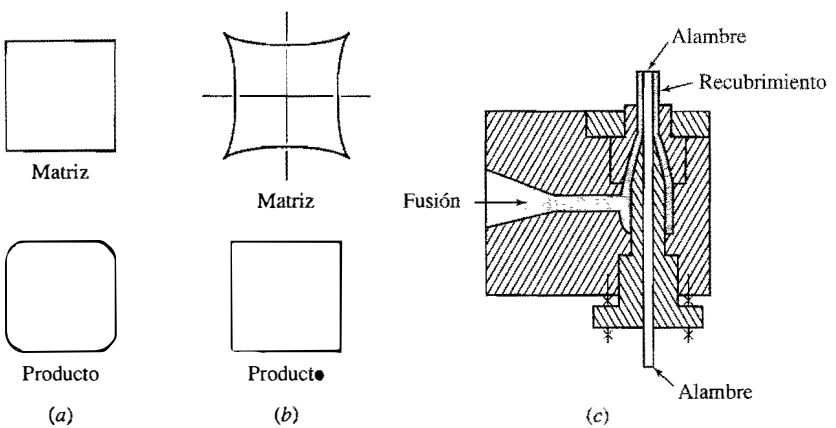


Figura 14-6 Un arrastre mayor en las esquinas de una matriz con sección transversal cuadrada resulta en esquinas redondeadas en la extrusión (*a*). La forma de la matriz puede compensar esto (*b*). El flujo se puede dirigir alrededor de un alambre (c).

Secciones. Las esquinas de un cuadrado están sujetas a mayor arrastre, reduciendo el flujo y resultando en esquinas redondeadas (Fig. 14-6*a*). Para obtener esquinas agudas, se debe proporcionar material extra cambiando la forma del dado (Fig. 14-6*b*), o reducir el arrastre al disminuir el campo de la matriz en las esquinas. Se necesitan medidas similares al extruir secciones de espesor desigual. Como en la extrusión de metal, las partes más gruesas de la sección se retardan aumentando la longitud de contacto en el campo (véase la Fig. 9-31); en las matrices correctamente aerodinámicas, esto resulta en matrices con formas complejas, a menudo hechas por EDM (Secc. 17-4).

Conductos y tubos. Los productos huecos (tubulares) se fabrican fácilmente con matrices del tipo araña (similares a la Fig. 9-30*c*). La presión máxima se obtiene justo frente al campo de la matriz; de esta manera, las corrientes separadas se reúnen y se extruye un buen producto. Una matriz ahusada con un campo largo minimiza las líneas de soldadura (*de la araña*). El aislamiento de alambre y cable se aplica al alimentar el alambre a través de una matriz de cruceta (Fig. 14-6*c*).

Lámina y película. Una característica particular de la extrusión de polímeros es que no es necesario mantenerla dentro del diámetro del cañón. Si la fusión se distribuye apropiadamente, se puede producir una hoja más ancha que el cañón. La distribución en ancho se logra fácilmente con un múltiple (Fig. 14-7), pero la presión baja a partir del centro y las orillas estarían subalimentadas. Por lo tanto, el flujo de material se debe retardar en el centro haciendo el campo más largo; ello conduce a la configuración de matriz llamada de gancho de ropa (Fig. 14-7*a*). Alternativamente (o adicionalmente), el flujo se regula de manera local con *barras* ajustables *de estrangulamiento* (Fig. 14-7*b*) o por medio de tornillos de ajuste que cierran los bordes de la matriz en el centro. La lámina emergente por lo general se guía alrededor de un conjunto de dos o tres rodillos enfriados de manera interna, altamente pulidos (*rodillos de enfriamiento*), de manera que se enfría al tiempo que se pule su superficie. Las películas delgadas (< 0.1 mm de espesor) se extruyen en modo similar y se guían alrededor de un rodillo de enfriamiento antes de un tratamiento posterior (*operación de película fundida*). Si se aplica una fuerza de tensión se provoca la elongación y la alineación unidireccional de las moléculas;

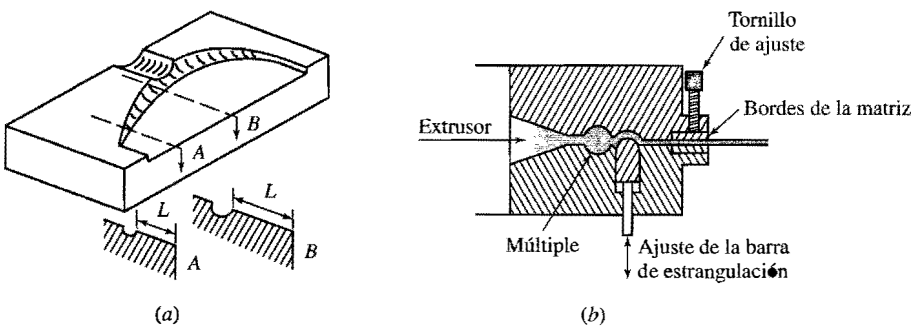


Figura 14-7 Se pueden extruir lámina y película anchas, pero la tasa de flujo a través del ancho debe homogeneizarse con una "matriz de gancho de ropa" (a), o con una barra de estrangulación y ajuste de los bordes de la matriz (b).

el estirado lateral simultáneo (por *ganchos de bastidor*) proporciona la orientación biaxial. Ésta es realmente una deformación en el régimen viscoelástico; proceso que se analiza con mayor detalle más adelante, en la sección que trata del soplado de un tubo extruido.

Fibras. En el *hilado por fusión*, la fusión termoplástica se extruye por medio de una hilada (una matriz con muchos, incluso decenas de miles, agujeros de cerca de 0.1 mm de diámetro), usualmente con temperaturas entre 230 y 315°C, en una configuración similar a la de la figura 12-10*b*; excepto que se utiliza aire para enfriar las fibras emergentes y se impone una extensión (*razón de estirado*) de 2 a 8. Las fibras de nylon, poliéster y PP se fabrican por medio de esta técnica. En el *hilado húmedo*, una solución de polímero se extruye hacia un baño químico donde la fibra se forma por difusión mutua. En el *hilado por reacción* se extruye un prepolímero en un medio fluido reactivo para producir una fibra diferente (por ejemplo, con enlaces cruzados). Los diámetros de la fibra son pequeños (comúnmente, entre 2 y 40 μm), y suelen expresarse en unidades de *denier* (el peso, en gramos, de una fibra de 9 000 m) o en la unidad SI *tex* (la masa, en gramos, de una fibra de 1 000 m).

Procesos especiales El alcance de la extrusión se puede ampliar aún más.

Coextrusión. La posibilidad de unificar dos o más corrientes de fusiones plásticas diferentes permite la coextrusión de lámina, película, perfiles y tubos. Por ejemplo, en los productos para el empaque de alimentos, una capa sirve como barrera para el aceite y agua y la otra es de grado de contacto con el alimento; el aislamiento de alambre se extruye con marcadores de colores.

Ejemplo 14-2

La película plástica coextruida se emplea para la bolsa de las cajas de cereales. La junta de sellado debe ser suficientemente fuerte para soportar el manejo, pero suficientemente débil para permitir la separación manual. Por lo tanto, la capa interior tiene un punto de fusión menor, de manera que se puede plegar por calor sin ablandar la capa exterior.

Extrusión reactiva. En ésta, se inducen de forma intencional reacciones químicas durante la extrusión. Primero se usó para el procesamiento de caucho, pero se ha extendido a termofijos y termoplásticos de cadena larga. Sirve para varios propósitos: producción de polímero de peso molecular alto, a partir de monómeros o monómeros y prepolímeros; reacción de monómero y polímero para formar polímeros injertados; reacción de polímeros para formar copolímeros; formación de enlaces cruzados; y degradación controlada (fraccionado) de polímeros para modificar su reología. El proceso a menudo resulta más económico que si se procesa en solución porque no hay solvente que eliminar.

Calandrado. Este proceso posterior en línea está relacionado con la fundición continua de cintas (Secc. 7-5-2), en que la fusión termoplástica se alimenta desde el extrusor en forma directa hasta una *calandria* de rodillos múltiples. La primera separación del

rodillo (estrechamiento) sirve como alimentador y extiende el plástico a lo ancho; el segundo hueco actúa como un dispositivo de medición; y el tercero fija el calibre del polímero que se enfría gradualmente, que luego se enrolla, con estirado controlado, en un tambor (Fig. 14-8); esto se relaciona con el laminado de metales en caliente (Secc. 9-7-1). Igual que en el laminado de metal, se debe mantener el paralelismo de la separación de los rodillos: la temperatura de distribución se controla cuidadosamente, y se hace lo mismo con la combadura del rodillo (corona), ya sea flexionando o inclinando el rodillo central (lo que, en efecto, cambia la separación desde el centro hasta la orilla). El calandrado es un proceso de producción de alta rapidez (por lo general de 100 m/min), que produce lámina o película en anchos de hasta 3 m. Induce menos cortante que la extrusión directa de lámina y se usa sobre todo para PVC flexible (incluyendo el recubrimiento para papel y tela, para cintas, tapicería, ropa impermeable, cortinas de baño, etcétera) y PVC rígido (charolas, tarjetas de crédito, laminaciones). También se forma un poco de ABS. El calandrado, junto con la extrusión directa, es el método principal para fabricar productos elastoméricos (caucho), para formado posterior en partes terminadas, como bandas y llantas.

Formado en línea. Los rodillos u orugas gemelas se pueden emplear para repujado, formado al vacío (Secc. 14-4-2), corrugación y otros formados de extrusión emergente.

Control del proceso Aunque la extrusión de plásticos es más tolerante que la de metales, el proceso no está libre de problemas. La sobrecompresión en la sección de compresión causa el bloqueo por el sólido y provoca un *surgimiento* errático (una caída en la presión), por lo general cuando el proceso opera a su tasa máxima. Las bombas de engranes colocadas entre el extremo del tornillo y la matriz estabilizan la extrusión y pueden elevar la rapidez de producción. La fricción en la matriz retarda las capas superficiales (Fig. 14-5*a*); al salir de ella, la recuperación elástica crea esfuerzos de tensión en la superficie, lo que puede resultar en aspereza aleatoria (*efecto de piel de tiburón*).

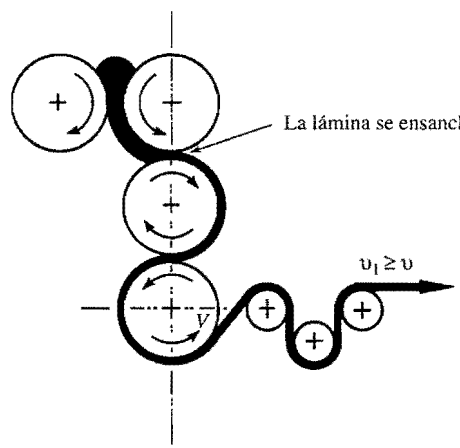


Figura 14-8 La lámina y la hoja anchas se pueden producir por calandrado.

En el extremo, el deslizamiento adherido-deslizante conduce a una abertura circunferencial periódica de la superficie, y la extrusión se parece a un tallo de bambú.

14-3-3 Moldeo por inyección

El *moldeo por inyección* es la técnica más difundida para crear configuraciones 3-D. Se utiliza para resinas termoplásticas y más recientemente también para resinas termoestables. El proceso (Fig. 14-9) se parece a la fundición de metales en matriz de cámara caliente.

Transporte de plásticos Existen dos formas básicas para transportar el polímero.

1. Las máquinas con *émbolos recíprocos* accionados hidráulicamente son capaces de desarrollar presiones de 70 a 180 MPa (Fig. 14-9*a*). El plástico se calienta mediante calentadores externos en el cañón, y por cortante alrededor del *torpedo* (*difusor*), lo cual asegura también la uniformidad del flujo.

2. Con mayor frecuencia se emplea un tornillo giratorio (Fig. 14-9*b*). Para suministrar al molde la cantidad requerida de plástico fundido, el tornillo de una *máquina de tornillo reciprocante* está soportado por un ariete hidráulico que es empujado hacia atrás cuando la presión frente al tornillo se acumula hasta un valor prefijo y se acumula la cantidad de fusión necesaria para llenar el molde (Fig. 14-9*c*). En este punto, la rotación se detiene; el ariete hidráulico empuja al tornillo hacia delante y así inyecta el plástico en el molde, mientras el contraflujo se limita mediante una válvula de retención (Fig. 14-9*d*). Algunas veces los tornillos también se utilizan para alimentar prensas de moldeo por compresión y por transferencia. En algunas máquinas, el tornillo se usa sólo para plastificar; es decir, para alimentar la fusión a una cámara de inyección, desde la cual un émbolo separado la lleva hacia el molde.

a. Los termoplásticos se calientan por encima del punto de fusión (170 a 320°C), mientras que el molde se mantiene a una temperatura menor (comúnmente 90°C). Las presiones de inyección son de alrededor de 140 MPa, pero se pueden elevar hasta 350 MPa para productos de pared delgada. Lo usual es que, se completen de 2 a 6 ciclos cada minuto.

b. Para termofijos, el cañón se precalienta apenas lo suficiente (entre 70 y 120°C) para asegurar la plastificación. La inyección bajo presiones altas (hasta de 140 MPa) genera calor suficiente para alcanzar de 150 a 200°C en el bebedero. El molde en sí se calienta entre 170 y 200°C. El proceso también se emplea para moldear compuestos para moldeo volumétrico con relleno de vidrio (BMCs); sin embargo, la carga se acumularía en la tolva, por lo que el cañón se llena directamente.

Un plástico enfriado libremente se contrae entre 7 y 20% al enfriarse desde la temperatura de moldeo. Sin embargo, las fusiones plásticas son compresibles y las altas presiones de inyección no sólo sirven para llenar el molde sino también para comprimir la cavidad. Además, la presión se mantiene para la primera parte de la solidificación, con el fin de compensar la contracción. Las velocidades del flujo pueden ser muy altas y la erosión por partículas duras del relleno puede ser severa.

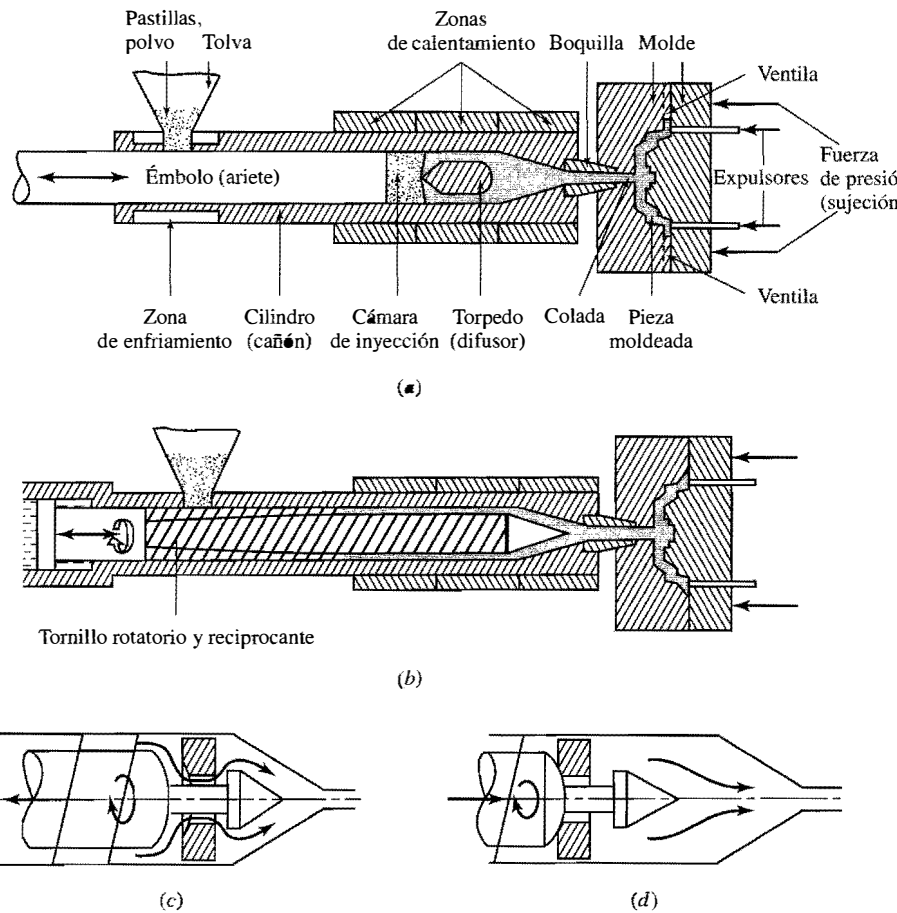


Figura 14-9 Se puede obtener una alta productividad a través del moldeo por inyección, con cantidades controladas de la fusión inyectada por (*a*) un émbolo reciprocante, o (*b*) un tornillo rotatorio reciprocante; con este último, el flujo se controla mediante una válvulo de retención, que permite la acumulación de la fusión (c), pero se cierra durante la inyección (*d*). [(*a*) y (*b*) *adaptadas de Petrothene Polyolefins: A Processing Guide, U.S. Industrial Chemicals Co., Nueva York, 1971. Con permiso.*]

Matrices (moldes) Igual que en la fundición en matrices (Fig. 7-25), la matriz se divide para permitir el retiro del producto. Se debe mantener firmemente cerrada durante la inyección, con la ayuda de un cilindro hidráulico grande, o por medio de mordazas mecánicas accionadas en forma hidráulica, o por una mordaza mecánica combinada con un cilindro hidráulico de carrera corta. La fuerza de sujeción se calcula por medio del área proyectada de las piezas moldeadas y de la presión recomendada de inyección. Se proporcionan *expulsores* para retirar el componente moldeado y las *ventilas* finas (0.02 a 0.08 mm × 5 mm) aseguran que no quede aire atrapado.

La estructura de una pieza moldeada no es homogénea: en los termoplásticos, las capas superficiales en contacto con el molde se enfrían rápidamente y retienen la orientación adquirida durante la inyección, mientras que las moléculas en la parte interior, con enfriamiento más lento, tienen tiempo para volverse a enrollar. Así, existen esfuerzos de moldeo en las piezas terminadas.

Igual que en la fundición de metales, el proceso está gobernado por las leyes del flujo de fluidos (esta vez, un fluido sensible a la tasa de deformación) y por la conducción de calor. Por lo tanto, la alimentación del molde es crítica. El sistema de canales de alimentación y de compuertas es similar al que se usa para metales (Secc. 7-5-3). Las compuertas no deben ser muy grandes, porque la fusión fluiría de regreso en el momento en que la presión se libere. Por otro lado, las compuertas que son muy pequeñas solidifican prematuramente, bloqueando la presión de moldeo antes que se obtenga el empaque completo. No obstante, algunas veces se utilizan compuertas internas pequeñas (*compuertas de aguja*), porque aumentan la tasa de deformación por esfuerzo cortante, calientan el plástico, reducen la viscosidad y ayudan en el llenado del molde; también facilitan la ruptura de la colada. El número y la localización de las compuertas determinan la secuencia del llenado del molde y la alineación de las moléculas (y en consecuencia la dirección de resistencia máxima en la pieza terminada), además pueden causar marcas visibles en la superficie. En muchas configuraciones, las corrientes de la fusión se unen (como en el ejemplo 7-4) y si no se logra obtener una interpenetración completa de las moléculas se producen *líneas de soldadura* (*líneas de tejido*) más débiles, equivalentes a los gránulos fríos en metales. La baja resistencia de los plásticos permite arreglos de compuertas que serían imprácticos para metales (Fig. 14-10). Las cavidades múltiples se acomodan fácilmente, pero se debe tener cuidado de alimentar cada cavidad a la misma presión. Igual que en la fundición en matrices, se consigue un ahorro si el material en el sistema de distribución del flujo se minimiza. Esto provoca el desarrollo del *moldeo sin colada*: la boquilla se extiende hasta la cavidad del molde y se calienta; una caída repentina en la temperatura cierra el flujo, en tanto que un calentamiento rápido evita el congelamiento. En otros casos, se emplea una válvula para cerrar el flujo.

Ejemplo 14-3

La cavidad en una matriz con un volumen de 120 cm^3 se alimenta a través de una sola compuerta de longitud $L = 50$ mm y diámetro $D = 4$ mm. El extrusor inyecta PP con una viscosidad aparente de 150 Pa · s a $\dot{\gamma} = 1\,000\ s^{-1}$, bajo una presión de 140 MPa. Calcule el tiempo de llenado.

De la ecuación (14-7)

$$q_c = \frac{(140 \times 10^6)\pi(0.004^4)}{(128)(150)(0.05)} = 0.0001173\ m^3/s = 117.3\ cm^3/s$$

y el tiempo de llenado es 120/117.3 = 1.023 s. Si la compuerta se reduce a un diámetro $D = 3$ mm, el tiempo de llenado se incrementa más de tres veces (si el diámetro de la compuerta se reduce a la mitad, el tiempo de llenado aumenta 16 veces). El cálculo es muy aproximado, ya que una variación en la tasa de la deformación por esfuerzo cortante cambia la viscosidad aparente, pero demuestra la importancia de la dimensión de la compuerta.

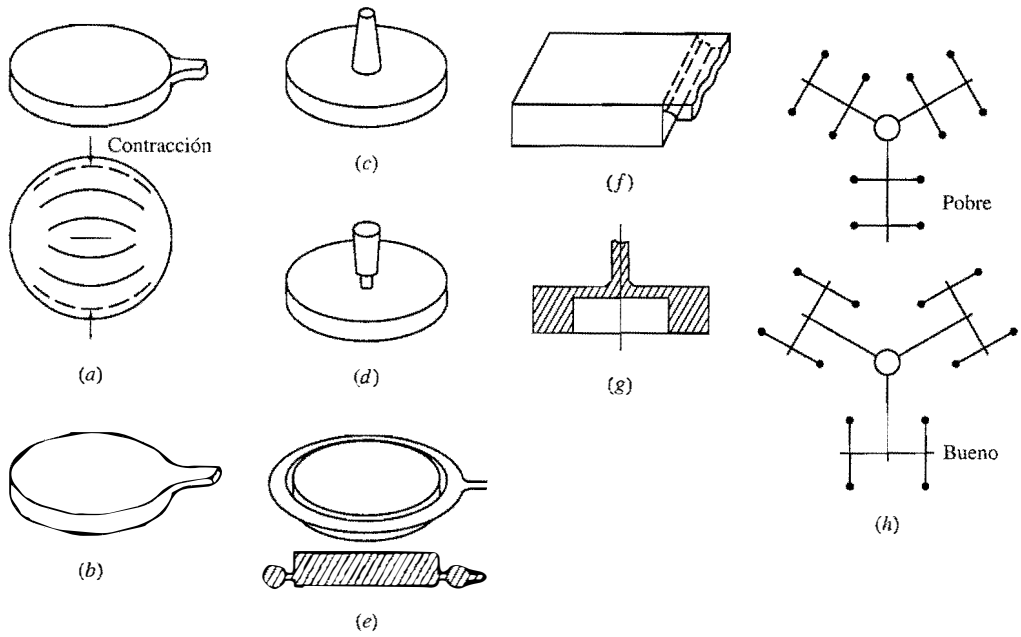


Figura 14-10 El sistema de compuertas es un factor decisivo en el moldeo por inyección. Una compuerta lateral es sencilla, pero el flujo orientado provoca una contracción transversal mayor (*a*), la situación mejora con una compuerta de abanico (*b*). Una buena alimentación se proporciona por medio de una compuerta de bebedero (*c*), pero ésta es difícil de eliminar. Una compuerta de aguja (*d*) se puede romper, y el "chorro de vaciado" podría ser inaceptable. Las compuertas de anillo para las piezas cilíndricas (*e*) y las de película para las rectangulares (*f*) alimentan de manera uniforme, igual que las compuertas de disco para anillos (*g*). Se pueden moldear piezas múltiples, pero el sistema de compuertas debe asegurar presión igual para cada cavidad (*h*).

Ejemplo 14-4

La importancia del sistema de compuertas adecuado se demuestra en el ejemplo del moldeo de una bisagra de plástico. El material es PP isotáctico (Fig. 13-2*b*); las moléculas se enrollan formando una hélice y se doblan libremente como lo haría un resorte helicoidal. Se obtiene una bisagra durable si la alineación molecular es perpendicular a la línea de ésta. Para ello, la fusión debe fluir en forma directa hasta la restricción de la matriz que formará la bisagra, un objetivo que se puede lograr colocando la compuerta tan lejos de la restricción como sea posible.

Con la ayuda de programas de computadora, el llenado del molde se puede modelar, igual que en la fundición de metales. Esto reduce en gran medida, o elimina, la aproximación de prueba y error, que de otra manera sería necesaria para encontrar el esquema óptimo de la compuerta. El llenado del molde también es un factor crítico en

términos de contracción y distorsión. La contracción es distinta para plásticos diferentes, pero también se ve afectada en gran medida por el espesor de la pieza y por las condiciones de proceso, como la temperatura, la presión de inyección y el tiempo de mantenimiento. Las partes gruesas solidifican al final y la contracción puede causar que se desarrollen *marcas de hundimiento*. El *moldeo por inyección asistido por gas* minimiza este hecho al inyectar un gas en el molde parcialmente lleno. El gas reemplaza a la fusión menos viscosa, forma cavidades internas en las secciones más gruesas y ayuda en el llenado de moldes intricados.

El control de la temperatura y de la presión es crítico. Los controles de las máquinas se han vuelto más complejas y permiten el llenado rápido del sistema de canales de alimentación, lo aminoran al inicio de la inyección para evitar chorros y lo aceleran para el llenado del molde; además conservan la presión (o la incrementan) durante la solidificación. Los programas comerciales cada vez más complejos ayudan a diseñar el molde y los controles del proceso, teniendo la consideración debida a las variables de la operación y de los materiales.

Las velocidades de producción aumentan en gran medida con *máquinas rotativas de estaciones múltiples*, en las que la carga, la inyección y el retiro (y, si es apropiado, la colocación de insertos) tienen lugar en forma simultánea.

Ejemplo 14-5

Una máquina de moldeo por inyección de 1 MN (112 tonf) de capacidad (fuerza de sujeción) se va emplear para fabricar una caja de 125 mm de ancho, 250 mm de longitud y 75 mm de profundidad. (*a*) ¿Qué presión de moldeo se puede alcanzar? (*b*) ¿Cómo cambiará esta presión si se fabrica una caja con el mismo ancho y la misma longitud, pero de 150 mm de profundidad? (*c*) ¿Cómo variará la presión si el espesor de la pared de las cajas se incrementa al doble?

(*a*) Sólo la presión que actúa perpendicular al plano de separación (paralelo a la acción de la fuerza de sujeción) tiene que ser soportada por la mordaza. De esta manera, sólo el área proyectada es de interés; $A = 125 \times 250 = 31\,250$ mm^2. La presión que se alcanza es 1 000 000/31 250 = 32 N/mm^2 (MPa).

(*b*) El área proyectada no cambia con la profundidad de la caja; de ahí que la presión permanezca sin cambio.

(*c*) Cualquier variación en el espesor de la pared es despreciable, siempre y cuando el área permanezca igual. (Sin embargo, la cantidad de plástico que se debe suministrar aumenta al doble.)

14-3-4 Otras técnicas de moldeo

Varios procesos de moldeo se llevan a cabo independientemente de los extrusores.

Moldeo por inyección con reacción El *moldeo por inyección con reacción* (RIM) difiere de otros procesos en que son los reactivos y no el polímero, los que se calientan y unen con alta presión (10 a 20 MPa), de manera que chocan uno con otro cuando entran a la matriz a través de una cámara de reducción de presión (Fig. 14-11). Se obtiene un buen mezclado y el polímero se produce directamente en el molde. La apli-

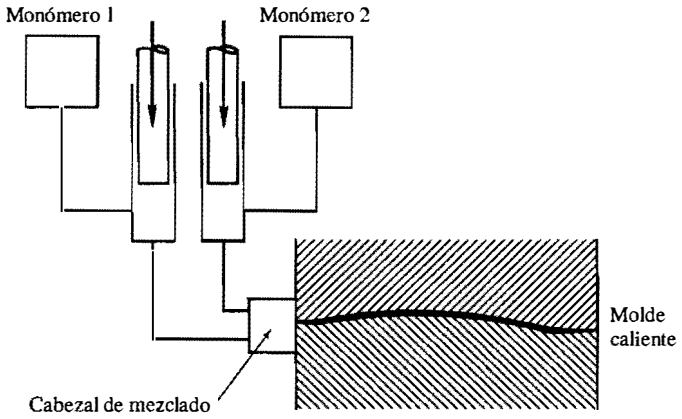


Figura 14-11 El moldeo por inyección de reacción (RIM) produce piezas al mezclar por choque rápido y por la inyección de monómeros en la cavidad de la matriz donde se forma el polímero.

cación primaria es para el poliuretano (cuerpos sólidos, espumas y elastómeros), con algunas aplicaciones para el nylon y el epóxico. Las presiones en el molde son bajas (300 a 700 kPa); así, las fuerzas de cierre del molde también son bajas. Las matrices pueden ser sencillas y de construcción de bajo costo. Como la polimerización ocurre en el molde, los esfuerzos internos son mínimos, por lo que el proceso es adecuado aun para piezas grandes, complejas y con relleno, como los componentes de automóviles y de artículos electrodomésticos; además, los tiempos de ciclo son de 1 a 12 minutos. Para evitar la direccionalidad del refuerzo, se prefiere la hojuela de vidrio.

Moldeo por compresión Es el equivalente a la forja en matriz cerrada (Secc. 9-3-2). Una cantidad premedida de polímero se introduce en el molde. Cuando el plástico está completamente atrapado, se le denomina *molde positivo* (Fig. 14-12*a*); cualquier variación en la cantidad del polímero resulta en un cambio del espesor de la pieza. Es factible mantener tolerancias más estrechas si se permite que se extruya una pequeña rebaba, normalmente a lo largo del perímetro del punzón, en *moldes semipositivos*. Se pierde más plástico en *moldes con rebaba*, similares a los que se utilizan en la forja en matriz de impresión (Fig. 9-17*b*).

La temperatura de moldeo se elige a partir de la experiencia (tablas 13-2 y 13-3). La fuerza de la prensa se calcula multiplicando el área proyectada por la presión de moldeo determinada de manera empírica (por lo general de 7 a 15 MPa para BMC; de 15 a 40 MPa para fenólicos; hasta 70 MPa para ABS, PMMA y PS, y de 140 MPa para PTFE y UHMWPE).

Aunque este proceso resulta adecuado para termoplásticos, su principal aplicación es en termofijos. Luego de cerrar el molde, a menudo éste se abre ligeramente para ventilar gases, vapor y aire; después se cierra de nuevo hasta que ocurre el curado (por

lo general de 1 a 5 min). Las ventajas del proceso son que hay poca o ninguna pérdida de material, los rellenos no se orientan y los esfuerzos internos son mínimos.

El *moldeo en frío* es una variante relacionada con la metalurgia de polvos: un polvo o relleno (con frecuencia de materiales refractarios) se mezcla con un aglutinante polimérico, se comprimen en una matriz fría, y posteriormente se retiran para su curado en un horno.

Moldeo por transferencia El *moldeo por transferencia* utiliza un principio de moldeo-extrusión (Fig. 14-12*b*). Una cantidad en exceso del polímero se carga en el *recipiente de transferencia*, el cual se empuja a través de un *orificio* (bebedero) hacia la cavidad del molde por la acción de un punzón, a una presión de entre 35 y 100 MPa, mientras que la matriz se mantiene cerrada por otro émbolo de mayor capacidad. Se pueden necesitar presiones de hasta 300 MPa para algunos plásticos, como el acetato de celulosa, el PVC rígido, o un copolímero de bloque de estireno-butadieno. La matriz es de construcción cerrada y se pueden emplear cavidades múltiples, con canales de alimentación y compuertas apropiadas para alimentarlas (como en la Fig. 7-13). De esta manera se logra una rapidez de producción razonable en compuestos tanto termofijos como termoplásticos.

Una gran ventaja es que el plástico adquiere temperatura y propiedades uniformes en el recipiente, antes que ocurra la transferencia. El plástico se calienta aún más por cortante a través del orificio, la viscosidad se reduce y el plástico llena detalles intricados del molde. La técnica se adopta para fabricar conectores eléctricos y para el encapsulado de dispositivos microelectrónicos, porque el plástico de baja viscosidad no daña los delicados alambres e insertos.

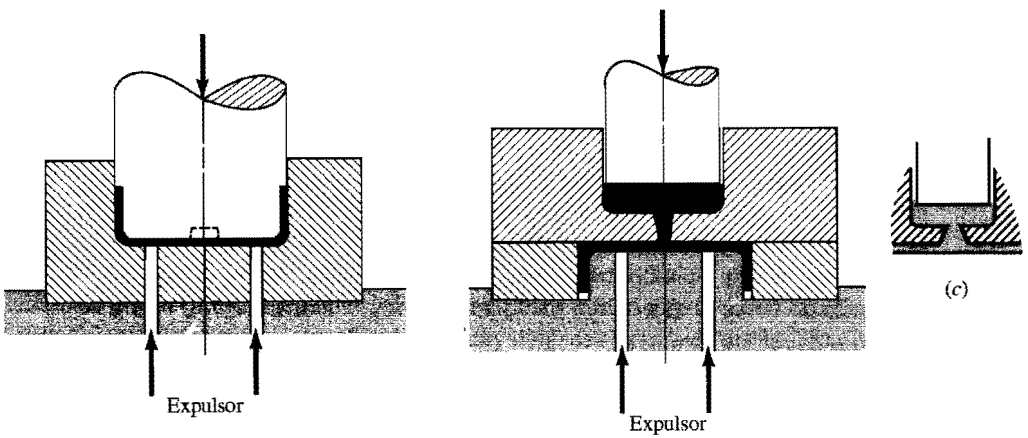


Figura 14-12 Los procesos del (a) moldeo por compresión y (*b*) del moldeo por transferencia son adecuados tanto para termoplásticos como para termofijos. Si el material en el bebedero se endurece entre inyecciones, el bebedero debe ahusarse para liberar la colada (c).

Ejemplo 14-6

Una máquina de moldeo por transferencia funciona por medio de un abastecimiento hidráulico de 20 MPa. El diámetro del cilindro de transferencia es de 125 mm y el del cilindro de sujeción es de 250 mm. Si el polímero requiere una presión de transferencia de 50 MPa, calcule el diámetro del punzón de transferencia (el del recipiente de transferencia) y el área de la sección transversal proyectada máxima permisible de las piezas moldeadas.

El cilindro de transferencia ejerce una fuerza de $P = pA = 20(125^2\pi/4) = 245.4$ kN. A la presión requerida de 50 N/mm^2, el área del punzón es $P/p = 245\,400/50 = 4\,909$ mm^2. El diámetro es de 79 mm (digamos, 80 mm).

La abrazadera ejerce una fuerza de $P = pA = 20(250^2\pi/4) = 981.7$ kN. Como la presión de transferencia actúa sobre toda el área proyectada, el área permisible es $A = P/p = 981\,700/50 = 19\,635$ mm^2. Para evitar la formación de rebaba, es usual calcular con 1.15 × presión de transferencia. Así, $A = 19\,635/1.15 = 17\,074$ mm^2.

14-3-5 Capacidades del proceso y aspectos del diseño

Muchos de los principios analizados para la extrusión (Secc. 9-4-5), el laminado (Secc. 9-7), la fundición en matriz (Secc. 7-5-6) y la forja (Secc. 9-3) también se aplican en el

Tabla 14-1 Características generales de los procesos de polímeros

	Proceso de manufactura					
	Moldeo					
Características	**Vaciado**	**Extrusión**	**Inyección**	**Compresión**	**Transferencia**	**Termoformado**
Pieza						
Material	Todos	Todos	Todos	Todos	Todos	Termoplásticos
Preferencia		Termoplásticos		Termofijos	Termofijos	
Forma*	Todos	Todas las del grupo 0	Todas (con núcleo perdido)	Todas excepto T3, 5, 6, F5 y U4	Igual que en la compresión	T4; F4, 7, y S5
Sección mín., mm	(0.2) 4	0.4	0.4	0.8	0.8	1
Costo†						
Equipo	D-E	A-B	A-C	B-C	B-C	B-D
Herramientas	B-E	A-C	A-C	A-C	A-C	B-C
Mano de Obra	A-C	D-E	D-E	C-E	C-E	B-E
Producción						
Habilidad del operador†	B-E	D-E	D-E	D-E	D-E	B-E
Tiempo de entrega	Días	Semanas	Semanas	Semanas	Semanas	Días-semanas
Tiempo de ciclo		10-60	10-60	20-600	10-300	10-60
Cantidad mín.	1		1 000	100-1 000	100-1 000	10-1 000

* De la figura 3-1.

† Clasificaciones comparativas, donde A indica el valor más alto de la variable, E el más bajo. Por ejemplo, el moldeo por inyección implica un costo alto del equipo, precio elevado de la matriz, costo de mano de obra de bajo a muy bajo, y habilidad del operador de baja a muy baja. Se invierten semanas para fabricar un molde y se requiere una cantidad mínima de 1 000 para justificar su costo.

procesamiento de plásticos, a condición que se tomen en cuenta sus características particulares. En la tabla 14-1 se proporcionan los atributos generales de los procesos de los plásticos.

Extrusión Por su naturaleza, la extrusión está limitada a formas bidimensionales (grupo 0 en la Fig. 3-1), aunque el espesor de la pared puede variar por el movimiento programado de un mandril ahusado. Dentro de esas limitaciones existe libertad sustancial y alta productividad. Las dimensiones sólo están limitadas por el enfriamiento. Las tolerancias son más amplias que en la extrusión de metal: en el espesor de la pared son ±8% y las lineales (ancho) varían desde ±8% en dimensiones pequeñas (menores de 3 mm) hasta ±1.5% en dimensiones grandes (más de 100 mm). Aunque la matriz de extrusión se puede diseñar para producir espesores de pared no uniforme, el enfriamiento diferencial provoca deformación, así que es preferible el espesor uniforme de pared. Las áreas grandes planas pueden distorsionarse, lo que se evita rigidizando con nervaduras.

El mercado para productos extruidos es amplio. Los perfiles se utilizan en edificios y en aplicaciones automotrices, en tubos, hojas y película para una gran variedad de aplicaciones generales y como material inicial para procesamiento posterior; así como en tubos de drenaje, y en líneas de desperdicio y de ventilación.

Moldeo La baja temperatura del moldeo de plásticos extiende en gran medida la vida de los moldes de acero para matrices y permite el uso de moldes de aluminio para corridas más cortas (hasta de decenas de miles de piezas).

1. *Forma.* Las limitaciones de la forma son similares a las de la fundición en matriz (Secc. 7-8-2), pero debido a las temperaturas de operación relativamente bajas, es factible fabricar moldes de complejidad considerable. Incluso los núcleos rotativos funcionan para partes roscadas. Si se inyecta el material alrededor de un núcleo desechable (*método del núcleo perdido, o de moldeo de núcleo fundible*) se eliminan muchas limitaciones de la forma, aunque a costa de un procesamiento más complejo.

2. *Dimensiones.* La remoción de gases (producidos por reacciones, o atrapados durante la compactación de los materiales iniciales granulados) se debe permitir y fomentar. Esto fija un límite práctico de 100 a 200 mm para el espesor máximo obtenible sin porosidad densa. La baja conductividad térmica de los plásticos (tabla 4-1) ocasiona una baja rapidez de enfriamiento y limita el espesor económico, por lo general por debajo de 6 mm (preferiblemente 3 mm). El espesor mínimo de la pared está limitado por la dificultad de retirar del molde piezas muy delgadas y también por las altas presiones necesarias para el llenado en una razón ancho-espesor grande. Las amplias diferencias en el espesor de la pared producen porosidad, vacíos internos o marcas de hundimiento, igual que en la fundición de metal (Secc. 7-30), y el diseño de una pieza debe tener como objetivo evitarlas (Fig. 14-13*a* y *b*).

3. *Tolerancias.* Aunque los moldes y las matrices pueden fabricarse con tolerancias estrechas, la gran sensibilidad de las dimensiones a las condiciones de procesamiento y los cambios en el postprocesamiento (polimerización, cristalización, pérdida de plastificante, envejecimiento, alivio de esfuerzos residuales) dicta que las toleran-

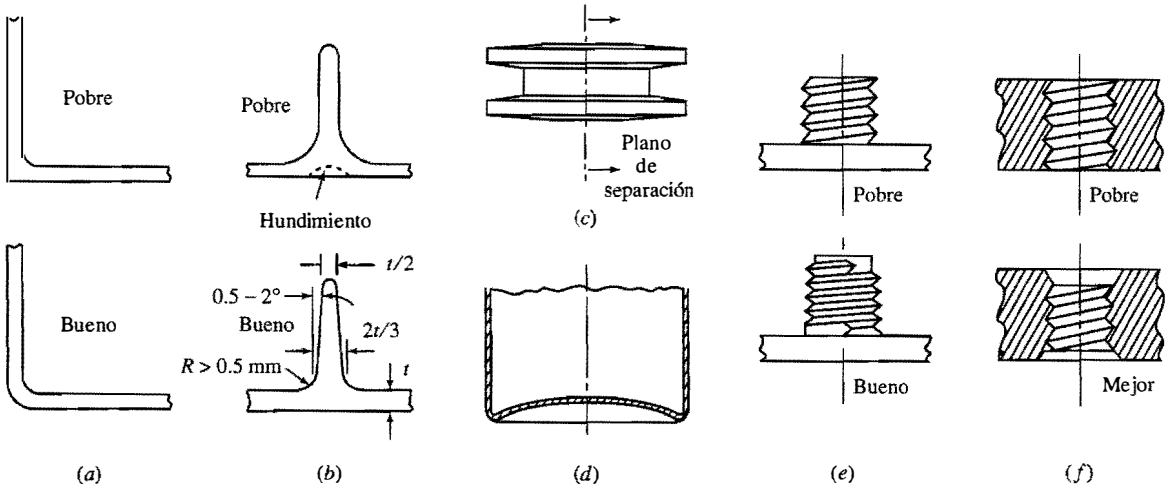


Figura 14-13 Algunas características del diseño para el moldeo por inyección.

cias sean tan amplias como sea permisible para la aplicación dada. Las variaciones dimensionales se reducen si se permite que haya suficiente tiempo para que el polímero se vuelva rígido antes de su retiro del molde. A menudo es posible disminuir el tiempo de ciclo retirando la pieza tan pronto como se enfríe a una temperatura en que mantenga su forma, de manera que se pueda enfriar hasta la temperatura ambiente fuera del molde.

4. *Acabado superficial.* En todos los procesos de moldeo, el plástico reproduce el acabado superficial del molde, y una vez que se fabrica la matriz que suele ser costosa, es posible obtener una superficie lisa o con un patrón, sin costo adicional. El desgaste se convierte en un factor significativo, principalmente para los plásticos rellenos. Las marcas de los expulsores arruinan la superficie, por lo que se deben colocar de modo que sus marcas no sean visibles.

5. *Plano de separación.* Como en la fundición en matriz y en el forjado, el plano de separación se debe elegir para minimizar la complejidad del molde, evitando cortes segados innecesarios (que precisarían insertos móviles y núcleos complejos) y para minimizar el costo del recorte de la rebaba, al realizarla por tamboreo por ejemplo. Esto es más difícil cuando el molde está dividido a lo largo del eje (Fig. 14-13*c*). La distorsión se minimiza cuando la compuerta se coloca para proporcionar un llenado simétrico del molde.

6. *Nervaduras.* La distorsión se minimiza reforzando las superficies grandes con nervaduras, pero el ancho de las nervaduras debe mantenerse pequeño para evitar la creación de amplias zonas calientes (Fig. 14-13*b*). La fabricación de superficies con forma de domo es una alternativa atractiva, especialmente en las piezas cilíndricas. (Fig. 14-13*d*).

7. *Ángulos de retiro y radios.* La liberación del molde requiere un ángulo de retiro de 0.5 a 2°, e incluso ángulos mayores en nervaduras y protuberancias. Los radios

agudos se pueden moldear, pero los radios generosos mejoran el flujo del material, incrementan la vida de la matriz y evitan la concentración de esfuerzos en el servicio. Se recomiendan radios mínimos de 1 a 1.5 mm. Los radios excesivos causan zonas calientes y hundimientos (Fig. 14-13*b*).

8. *Agujeros.* Los agujeros pasados están limitados únicamente por la resistencia del perno del núcleo, por lo que suelen mantenerse por debajo de una razón longitud-diámetro de 8. Los pernos del núcleo que se extienden libremente son necesarios para los agujeros ciegos; por lo tanto, esos agujeros están limitados a una razón profundidad-diámetro de 4 para $d > 1.5$ mm, y a una razón de 1 para los menores. Los agujeros roscados con diámetro de 5 mm o mayor se pueden moldear en forma directa, preferiblemente con una rosca gruesa, aunque se necesite un molde más complejo. Es preferible taladrar los agujeros con diámetros menores que 5 mm. Se debe proporcionar un alivio para evitar filos delgados y concentradores de esfuerzos (Fig. 14-13*e* y *f*). Las formas altamente complejas que necesitan núcleos no retraibles se pueden formar con núcleos fundibles (Fig. 14-14).

9. *Insertos.* El uso de insertos metálicos embebidos en el plástico expande en gran medida el alcance de la aplicación de los plásticos y con mucha frecuencia elimina los

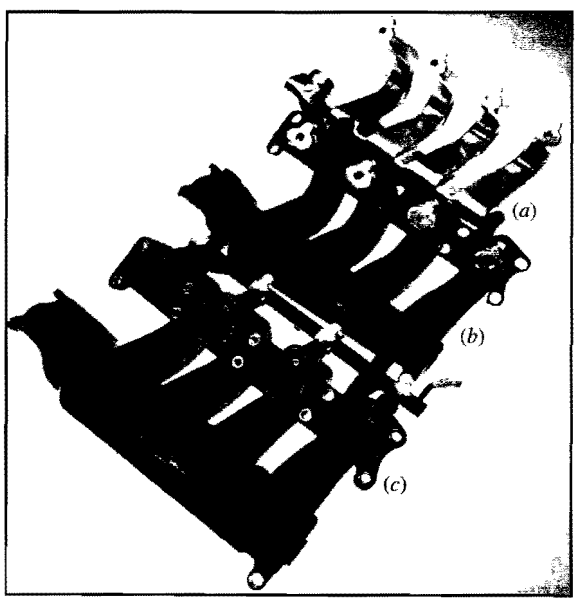


Figura 14-14 Se pueden formar pasajes internos complejos con paredes muy lisas a través del método del núcleo perdido: el núcleo se fabrica de un metal de bajo punto de fusión que se funde después que el nylon reforzado con fibra de vidrio se moldeo por inyección. (*Cortesía de Siemens Automotive, Auburn Hills, Michigan.*)

problemas en el ensamble subsiguiente, aunque con algún costo. Los insertos roscados, bornes, terminales eléctricas, placas de anclaje, tuercas y otros componentes metálicos se embeben en plástico por millones. Sin embargo, se deben tomar algunas precauciones. Hay que diseñar cuidadosamente el sistema de compuertas para evitar líneas débiles de unión cuando las corrientes de la fusión fluyen alrededor de un inserto. La forma de la pieza de metal debe asegurar el acoplamiento mecánico con el plástico, por ejemplo, por medio de moleteado áspero, ya que no hay adhesión entre metales y plásticos, al menos no sin una preparación superficial especial. La dilatación térmica de los plásticos es mucho mayor que la de los metales (tabla 4-1); esto ayuda a contraer el plástico hacia el inserto, pero también podría causar agrietamiento de un plástico frágil. Por lo tanto, el espesor de la pared alrededor del inserto debe ser suficientemente amplia para soportar los esfuerzos secundarios de tensión.

Ejemplo 14-7

Los pernos en los conectores para computadoras y otros artículos electrónicos se espaciaban a 2.54 mm (0.1 pulg) centro a centro. Con el impulso creciente hacia la miniaturización, el espaciamiento se redujo a 1 mm o incluso a 0.5 mm, con la disminución correspondiente en el espesor de pared de los conectores. Así, la tarea es llenar canales muy delgados sin presión excesiva, para no doblar los delicados conectores. Los polímeros de cristal líquido, aunque costosos, se eligen con frecuencia porque su estructura permite la inyección a alta velocidad y a baja viscosidad aparente. Las tolerancias son muy estrechas y la resistencia a la temperatura es alta, permitiendo la soldadura hasta una temperatura de 230°C.

Ejemplo 14-8

En el ejemplo 5-8 sobre el reciclado de automóviles, se vio que la pelusa de los molinos, constituida principalmente por plásticos, no se puede reciclar efectivamente. El problema se está haciendo más grave con el crecimiento del uso de los plásticos, impulsado por la economía y por la necesidad de reducción del peso. Por lo tanto, hay una campaña para reciclar plásticos. El objetivo es tener al menos 25% de plástico desechado de artículos de consumo en distintas piezas. Esto puede resultar, ocasionalmente, en el reemplazo de un plástico por otro. Por ejemplo, la almohadilla superior de un tablero para un automóvil grande se fabricaba de un plástico relleno de vidrio que se rompía durante su envío y era difícil de reciclar. Se reemplazó por una pieza idéntica hecha de una combinación de polímero PC/ABS que contiene 25% de ABS reciclado, luego de que lo utilizó el consumidor. [Fuente: *Adv. Mater. Proc.*, 1997(5):27.]

Ejemplo 14-9

Una de las áreas de crecimiento de los plásticos de ingeniería es en los componentes auxiliares de los motores de automóviles. Las temperaturas son altas y las formas suelen ser complejas. Los núcleos rígidos limitan la forma de las cavidades internas para configuraciones que se pueden retirar con un movimiento en línea recta o rotatorios (helicoidales). Las formas mucho más complejas son posibles con el uso de núcleos desechables. De esta manera, al hacer fabricar múltiples de succión (Fig. 14-14) con recirculación del aire de escape, se coloca un núcleo fundido en matriz de baja presión, hecho de una aleación Si-Bi (Fig. 14-14*a*) de bajo punto de fusión (< 150°C), en el molde de inyección. Se inyecta nylon reforzado con 35% de fibra de vidrio; después de algunos minutos, la pieza (Fig. 14-14*b*) se retira de la matriz y se transfiere a

un tanque de fusión donde la aleación se drena de la pieza moldeada. Así, se produce una parte con pasajes internos complejos (Fig. 14-14*c*). Respecto a una fundición de aluminio, el peso se reduce 60% y las superficies internas son excepcionalmente lisas. Un método similar se emplea para las resinas fenólicas termoestables: la aleación Sn-Bi se funde durante el curado posterior, después de ser retirada del molde. [Fuente: *Adv. Mater. Proc.*, 1994 (1): 19.]

14-4 PROCESAMIENTO EN EL ESTADO ELÁSTICO

El comportamiento viscoelástico de los termoplásticos, por encima de T_g, permite el procesamiento posterior de los productos semifabricados fundidos, extruidos, moldeados por inyección o calandrados. La deformación es nuevamente por desdoblamiento y alineación de moléculas, pero esta vez en tensión. La alineación molecular que originó el comportamiento seudoplástico (*esfuerzo reducido debido al adelgazamiento por cortante*) en el flujo cortante [ecuación (13-4)] ahora causa una sensibilidad positiva a la tasa de deformación [ecuación (8-11)]. La resistencia a la tensión (algunas veces referida como *resistencia de la fusión*) *se incrementa con la tasa de deformación*, y un valor m alto permite un estiramiento sustancial sin la localización de estricciones. Como la resistencia de una estricción incipiente aumenta más con una rapidez de deformación mayor [ecuación (8-11)], el estiramiento rápido es benéfico. Las presiones pueden ser muy bajas, de 0.2 a 1 MPa, rara vez hasta 2 MPa. El desdoblamiento y la alineación de las moléculas en dirección del estiramiento también afecta al producto: la resistencia se eleva en dirección de la alineación, pero la resistencia y, particularmente, la resistencia al impacto son menores en dirección perpendiculares a la alineación. El estirado biaxial incrementa la resistencia en todas direcciones, y los productos biaxialmente orientados presentan rendimiento superior en muchas aplicaciones.

14-4-1 Moldeo por soplado

En el *moldeo por soplado* un tubo extruido o preforma emergente del proceso de fusión se expande mediante presión interna (por lo general con aire caliente).

Extrusión de película soplada Esta técnica se emplea para fabricar película delgada biaxialmente orientada al expandir con aire un tubo que emerge del extrusor (Fig. 14-15), usualmente a una *razón de soplado* de 3:1 en materiales como PE. La alineación molecular equivale a la cristalización parcial y causa transparencia reducida. Los polímeros que tienen un valor m bajo y son lentos para cristalizar no se pueden procesar directamente. Así, una fusión de PP se enfría en línea para retener una estructura amorfa, se recalienta por arriba de T_g y se sopla; la cristalización inducida por esfuerzos produce cristales laminares pequeños que no afectan la transparencia (la configuración del proceso es inversa respecto a la Fig. 14-15). Las bolsas se fabrican mediante sellado por calor o por presión, y se producen películas planas muy anchas (más de 6 m) cortando a lo largo el cilindro. Los plásticos que cristalizan rápidamente (como el nylon y el acetato) no se pueden procesar.

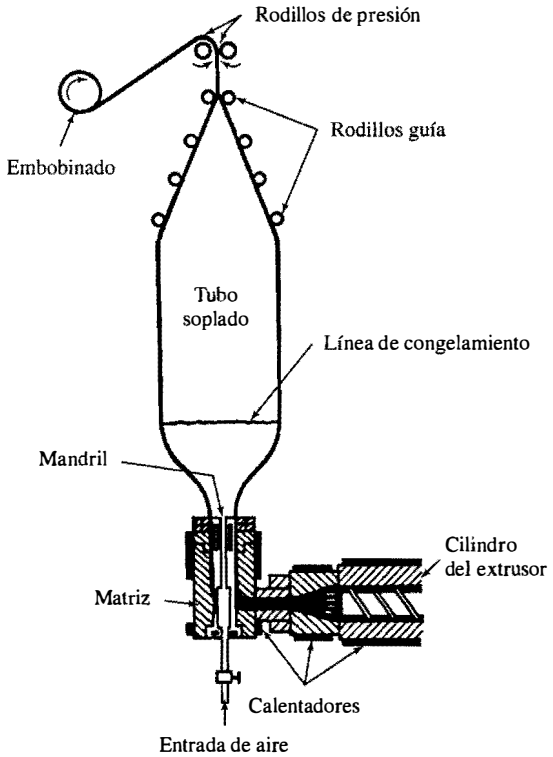


Figura 14-15 El tubo extruido se expande por aire en una película biaxialmente orientada; las temperaturas se controlan cuidadosamente para mantener la línea de solidificación (donde la película se vuelve ligeramente opaca) en una posición constante. (*De D.C. Miles y J.H. Briston: Polymer Technology, Chemical Publishing Co., 1979, p. 551. Con permiso.*)

Ejemplo 14-10 Se extruye una película soplada de 25 μm de espesor para bolsas de víveres. El ancho de las bolsas (el ancho del tubo soplado al aplanarse) es de 50 cm. Se obtienen propiedades óptimas por medio de una razón de soplado de 2.5:1. Al emerger de la matriz de extrusión, el tubo se jala a una rapidez mayor; la razón de estirado (razón de la abertura de la matriz al grosor del tubo) es 15:1. Calcule el diámetro y la abertura de la matriz de extrusión que se requieren.

La circunferencia de la burbuja es igual al doble del ancho en plano del tubo. Así $d\pi = 2(500) = 1\,000$ mm y $d = 318.3$ mm. La razón de soplado de 2.5 da un diámetro del tubo de $318.3/2.5 = 127.3$ mm (se puede elegir una matriz de 125 o 130 mm de diámetro). El espesor del tubo, antes de soplar, es $2.5(25) = 62.5$ mm $= 0.0625$ µm. La razón de estirado (de 15:1) proporciona una abertura de la matriz de $15(0.0625) = 0.9375$ mm (una abertura de 1 mm resulta adecuada).

Moldeo por extrusión y soplado Un tubo continuo se extruye y "pellizca" (estrangula) de manera que se produce una soldadura en estado sólido en la línea de estrangulación, y la preforma producida de esta manera se sopla posteriormente (Fig. 14-16), con frecuencia a una razón de soplado de 1.5 a 3, y rara vez a 7. Este método tiene la productividad más alta. Incluso se pueden moldear partes muy grandes como barriles de 2 000 L; además, los plásticos de ingeniería se forman en partes complejas, como los ductos de calentamiento/enfriamiento y los tableros de instrumentos de automóviles. Para evitar la necesidad de extrusores de muy alta capacidad, la fusión se recolecta en un acumulador del cual se puede extruir rápidamente, con un émbolo separado, hacia la matriz. El adelgazamiento localizado de las piezas se puede evitar, o se puede variar de forma intencional el espesor de la pared de las piezas a lo largo de su longitud mediante el movimiento programado de un mandril ahusado en en el orificio de la matriz de extrusión (Fig. 14-17). Las presiones son relativamente bajas (0.5-0.8 MPa); por lo tanto, se pueden fabricar matrices de pared más delgada y más económicas con aluminio o acero.

Moldeo por inyección y soplado Éste es el mismo proceso que se usa para las botellas de vidrio (Fig. 12-11), excepto que el parison se moldea por inyección —completo, con el cuello— alrededor de un núcleo hueco, y luego se sopla a través de éste. Se pueden permitir que las preformas se enfríen y se recalienten para el soplado. Muchas botellas de PVC, PP, PET y policarbonato de tamaños menores (digamos, hasta de 1.5 L) son soplados en máquinas de posicionamiento.

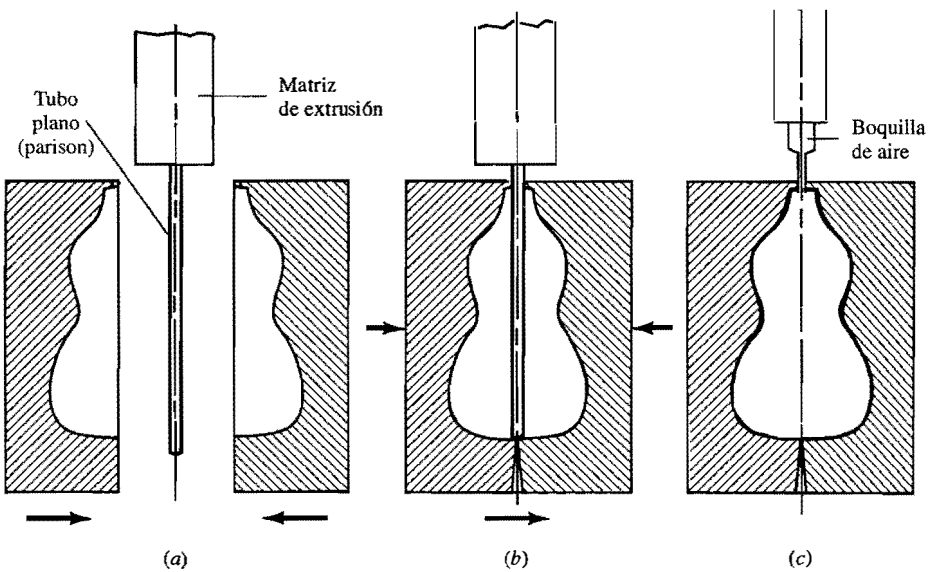


Figura 14-16 En el moldeo por soplado y extrusión, (a) un tubo plano extruido se estrangula y se suelda en el fondo al cerrar la matriz, y (c) se expande en la cavidad del molde mediante la presión de aire; la botella se enfría y se retira en la tercera y cuarta estaciones (no se muestran).

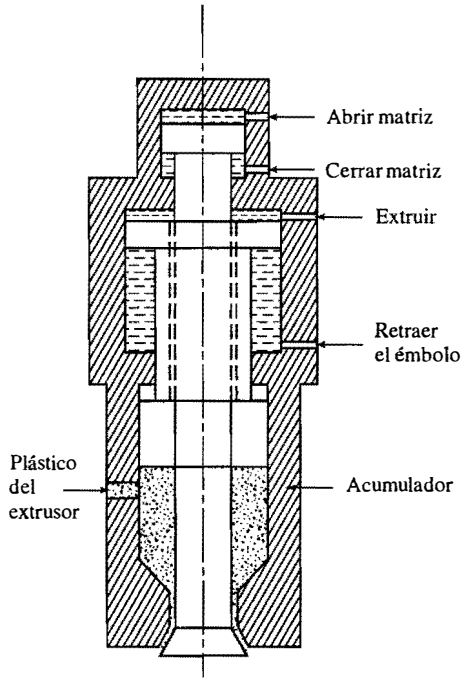


Figura 14-17 Las piezas grandes se fabrican acumulando una gran masa de plástico fundido y extruyéndola en un molde para soplado. El espesor de la pared se controla por el movimiento programado de un mandril ahusado.

Moldeo por estirado y soplado Este término se aplica a la expansión axial y radial simultánea de un parison, la cual produce un envase orientado axialmente. El parison se alarga en forma mecánica a través de la varilla del núcleo, mientras se expande mediante el aire. El proceso está sujeto a las reglas de la extrusión de película soplada. El parison extruido o moldeado por inyección primero se acondiciona, ya sea controlando su temperatura inmediatamente después de la extrusión, o recalentando el parison frío. De esta manera, las botellas de PET se refuerzan biaxialmente.

14-4-2 Termoformado

Es un término que se aplica al formado de una hoja termoplástica en el régimen ahulado, para fabricar formas abiertas como recipientes, pero a menudo muy complejas (el formado superplástico de lámina de metal, sección 10-9, se derivó de este proceso).

En el termoformado se emplea una abrazadera que sujeta la hoja alrededor de su circunferencia, un calentador para poner al polímero por arriba de la temperatura de

transición vítrea (normalmente alrededor de 55 a 90°C) y una matriz que puede ser hembra o macho. La conformación a la forma de la matriz se puede lograr por medios mecánicos o por presión de aire. Como la matriz es más fría, el polímero se enfría (y se endurece) por el contacto de ella, y las porciones de la pieza de trabajo que la tocan primero se vuelven rígidas mientras aún tienen un calibre más grueso. La deformación subsecuente está limitada por las porciones de la pieza de trabajo que se deforman libremente, así que el adelgazamiento excesivo podría conducir a la fractura. Gran parte del proceso del diseño tiene como objetivo controlar la distribución del espesor de pared por medio de la secuencia planeada de operaciones. Los números en la figura 14-18 se refieren a esta secuencia.

1. En las técnicas más simples (rectas), todo el formado se realiza con vacío o presión. En el *formado por vacío* (Fig. 14-18*a*), la hoja se (1) sujeta, (2) calienta por arriba de la T_g y luego (3) se aplica vacío para insertar la hoja en los recesos intricados de la matriz hembra.

2. Alternativamente, se aplica *presión de aire* caliente de 100 a 2 000 kPa (Fig. 14-18*b*) para empujar la hoja hacia la cavidad de la matriz hembra (a condición, por supuesto, de que se proporcionen agujeros de ventilación en el lado de abajo). Las esquinas de todas las piezas rectas formadas serán delgadas, como se verá al considerar los puntos del primer contacto con la matriz en las figuras 14-18*a* y *b*. Como en el moldeo por soplado, la alta tasa de deformación es benéfica, de ahí que el vacío o presión se apliquen repentinamente.

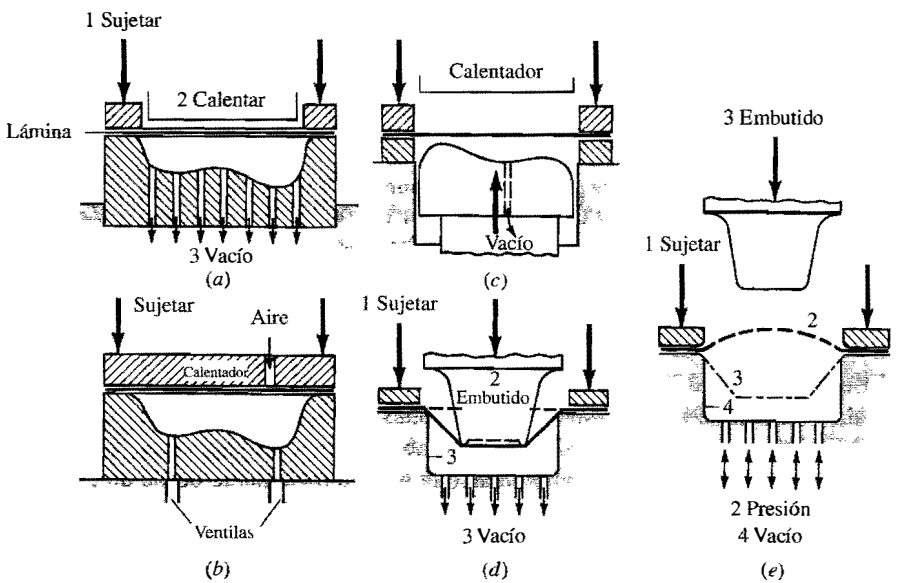


Figura 14-18 Los procesos de termoformado convierten a una lámina en formas complejas por métodos de (a) vacío, (*b*) presión, (c) cubrimiento por vacío, (*d*) asistido por un tapón, y (*e*) burbuja a presión asistido por un tapón. Los números se refieren a la secuencia del proceso.

3. La forma en que se puede desarrollar por medio del *formado cubierto* con una matriz macho (similar al formado por estirado de metales, Fig. 10-18*b*); las formas reentrantes se pueden formar proporcionando al punzón agujeros a través de los cuales se saca vacío, y así el polímero se jala hacia a las partes suspendidas (Fig. 14-18*c*).

4. Las esquinas se pueden hacer más gruesas primero deformando la lámina con un punzón (ahora llamado tapón) en el *formado asistido por tapón* (Fig. 14-18*d*). Después de (1) sujetar y calentar la lámina, (2) el punzón más frío se mueve hacia adentro para endurecer al polímero en los puntos que serán esquinas. Después de eso, (3) la parte se termina de formar por la aplicación de vacío.

5. Mayor control del espesor de la pared se logra en el *formado por estirado inverso* (Fig. 14-18*e*). Después de (1) sujetar y calentar la lámina, se (2) forma libremente en un domo por medio de la presión (*burbuja de presión*) o por vacío; esta preforma (3) se deforma luego mediante el tapón, y (4) la forma final se logra haciendo que la lámina se conforme al tapón, o combinando el tapón y la matriz con la aplicación de presión o vacío (note la similitud con el hidroformado, Fig. 10-33*b*).

6. El contacto con las superficies de la matriz se elimina y las partes con forma de domo de calidad óptica (bóvedas) se fabrican soplando hacia arriba una lámina sujeta (*formado libre*, una contraparte del abultamiento hidráulico de metales).

Ejemplo 14-11

Un recipiente cilíndrico de diámetro exterior $d_o = 200$ mm y profundidad interior $h_i = 70$ mm se fabricará a través del formado por vacío. El espesor promedio de la pared es de 1.5 mm. Calcule el diámetro y el espesor de la parte inicial, suponiendo que un borde de 20 mm (brida) es necesario para sujetar la parte.

Se aplica el principio de la invariabilidad del volumen. El volumen del recipiente es

$$V = [(d_o^2 - d_i^2)\pi / 4]h_i + (d_o^2\pi / 4)t = [(200^2 - 197^2)\pi / 4]70 + (200^2\pi / 4)1.5 = 112\ 603\ \text{mm}^3$$

Éste se forma partiendo de una pieza de $d_o = 200$ mm de diámetro, así que el espesor de ésta es $112\ 603/(200^2\pi/4) = 3.58$ mm. El diámetro inicial es $200 + 2(20) = 240$ mm. Si el borde (brida) debe recortarse, la utilización del material es $200^2/240^2 = 0.695$ o 69.5%.

El material inicial puede ser lámina cortada o tira enrollada, que se alimenta a través de sistemas de red continuos de estaciones múltiples (las contrapartes de las líneas de matrices progresivas en el trabajo de metal). El calor puede suministrarse a la lámina fría a la entrada, o puede alimentarse la línea directamente desde un extrusor. Muchos termoplásticos, incluyendo ABS, PP, PS, PVC, PMMA y poliésteres —rellenos y sin rellenar— se forman como productos diversos: parabrisas de aeronaves, revestimientos del techo de automóviles, revestimiento de las cavidades de las ruedas de automóviles; tableros para construcción, tinas de baño, cascos de botes, revestimientos de refrigeradores, y grandes cantidades de productos de empaque. El modelado por computadora de los cambios localizados de espesor ha eliminado gran parte de la experimentación prueba-error del diseño de la pieza y del proceso.

14-4-3 Estirado en frío

El término se aplica al alargado por estirado continuo de filamentos y fibras, incluyendo fibras que emergen de una hilera o cintas cortadas de una película. La alineación de las moléculas resulta en un incremento sustancial de la resistencia. El proceso es de máxima importancia para fibras textiles y de refuerzo, incluyendo PP, poliéster, nylon y fibras de aramida.

14-4-4 Formado en matrices acopladas

La terminología es un poco difusa. El *formado en estado sólido* (también denominado *formado en fase sólida*, y algunas veces mal llamado formado en frío) describe la deformación justo por encima de T_g (o, para polímeros altamente cristalinos como PP, justo por debajo de T_m) por medio de técnicas de trabajo de metal. El forjado tiene un alcance limitado, por ejemplo, para fabricar engranes, pero la mayor parte se realiza mediante técnicas de formado de lámina (también llamado *formado mecánico*), incluyendo doblado, alargado y estirado. La lámina se calienta y se empuja mediante un tapón caliente hacia el molde, luego se fuerza contra la matriz fría (similar a la Fig. 10-18*b*), a menudo en configuraciones rotarias de etapas múltiples o del tipo lanzadera (vaivén), que permiten que la pieza se enfríe antes de su expulsión. Muchos tubos de empaque de alimentos y envases se forman de PP, esencialmente por formado por estirado.

El *estampado termoplástico* (o *formado en matrices acopladas*) es un término que se utiliza para describir la deformación de lámina de un polímero termoplástico relleno a temperaturas de fusión, entre matrices frías acopladas, proporcionando de esta manera tiempos de ciclo reducidos. A temperaturas menores de precalentamiento, el comportamiento elástico se vuelve más dominante y se debe esperar mayor recuperación elástica.

14-4-5 Capacidades del proceso y aspectos del diseño

La deformación en el régimen ahulado es la contraparte del trabajo en caliente de metales. Sin embargo, las temperaturas de procesamiento son mucho menores, y los plásticos tienen un valor m mucho mayor que los metales (excepto para los superplásticos, los cuales se pueden trabajar con técnicas de procesamiento de plásticos). Todos estos beneficios se combinan para que el moldeo por soplado y por termoformado sean los procesos de elección para productos de pared relativamente delgada, a menudo de gran complejidad. Las botellas de PET de 2 litros para gaseosas son recipientes a presión con desempeño extraordinario; sólo se necesita inspeccionar el recubrimiento de la puerta de un refrigerador para ver las deformaciones severas que se pueden lograr. Hay aplicaciones técnicas menos visibles pero igualmente impresionantes, como los tanques con nervios de refuerzo para gasolina en automóviles, tableros de instrumentos, componentes de pared doble, y ductos de aire. Las láminas o tubos coextruidos proporcionan propiedades a la medida. Así, un tanque de gasolina puede tener un recubrimiento de nylon resistente a la gasolina y una capa exterior de PP más fuerte y más barata.

La forma y el tamaño están limitados sólo por el tamaño y operación de la matriz. Como siempre, los planos rectos de separación significan moldes menos costosos, pero los planos de separación complejos se pueden justificar para la producción en masa y para la consolidación de varias piezas. Los cortes sesgados requieren núcleos móviles pero son factibles. En todos los casos, las esquinas agudas causan un adelgazamiento local excesivo y los radios generosos son obligatorios. Las piezas moldeadas por soplado no necesitan ser cerradas; es factible fabricar piezas distintas en las dos mitades del molde y luego separarlas.

14-5 TÉCNICAS DEL PROCESAMIENTO PARA GRANULADOS

Aunque muchos polímeros son procesados con partículas (polvo, pastillas, etcétera), las técnicas descritas hasta este punto no son procesos de granulación en el sentido adoptado en el capítulo 11, ya que las partículas se unen por fusión y derriten. Sin embargo, algunos polímeros de peso molecular muy alto, como UHMWPE, PTFE y poliimida, se descomponen antes de alcanzar una temperatura en que sea posible el flujo viscoso. Por lo tanto, se deben procesar por medio de técnicas usuales para metales (Secc. 11-3).

El polvo se compacta en frío, con presiones de hasta 350 MPa (50 kpsi) y luego se sinteriza a entre 360 y 380°C para formar una palanquilla sólida o un componente conformado. Alternativamente, el polvo se moldea por compresión a una temperatura un poco mayor (como en el prensado en caliente de polvos metálicos), o el polvo se extruye en caliente en una prensa de tipo de émbolo (como en la Fig. 9-28*b*). La extrusión de sólidos causa la alineación de moléculas; así que la extrusión a una razón elevada de extrusión es uno de los métodos para crear fibras de polímero de resistencia ultraalta.

14-6 PLÁSTICOS CELULARES O ESPUMAS

Los *agentes de soplado* crean vacíos rellenos de gas, células en el polímero; así, se habla de la producción de *plásticos celulares* (*espuma*). Muchas técnicas están disponibles: se introduce aire por batido mecánico; los gases se difunden a presiones elevadas; se incorporan líquidos de bajo punto de ebullición, gases (como CO_2), o compuestos químicos que se descomponen al calentarlos; se agregan esferas de vidrio hueco o plástico hueco o expandible; o el polímero se moldea con un aditivo que subsecuentemente se elimina.

En general, un polímero altamente viscoso produce células cerradas, en tanto que un polímero menos viscoso propicia una porosidad abierta (interconectada). La porosidad es completamente uniforme en productos como espumas flexibles o elastoméricas, que se usan en aislamiento, empaque, acolchados, etcétera. Las *espumas estructurales*

son superficialmente sólidas. Para ellas, el polímero se vacía o se inyecta en un molde frío, que suprime la dilatación del polímero, formando una película sólida en la superficie; en contraste, el núcleo de enfriamiento lento es espumoso. El núcleo de espuma previene el colapso de la superficie, y el producto final tiene baja densidad combinada con una resistencia razonable.

Se usan varias técnicas de manufactura:

1. Poliestireno expandido. Un hidrocarburo volátil (por lo general, pentano) se agrega a las cuentas de polímero como agente de soplado. Cuando se calienta con vapor vivo (introducido en el polímero), se obtienen cuentas preexpandidas. Las cuentas se almacenan para permitir la evaporación de la humedad y luego se alimentan al molde apropiado. Tanto el molde como las cuentas se calientan con vapor vivo para causar la expansión final y la fusión, seguidos del enfriamiento. El tablero aislante se compone de cuentas grandes con densidades de 15 a 30 kg/m^3; los vasos de espuma se fabrican de cuentas pequeñas de 50 a 65 kg/m^3.

2. Espumas termoplásticas extruidas. Con mayor frecuencia, el gas (pentano, flurocarbonos) se introduce de forma directa en el plástico fundido en el cilindro de extrusión. La expansión ocurre a medida que la lámina o el perfil extruidos salen de la matriz. Para controlar el tamaño de la célula, se mezcla un polvo fino y seco en el plástico como agente de nucleación; el gas sale de la solución en las partículas de polvo. La aplicación principal es para charolas y empaque, con densidades de 30 a 150 kg/m^3 en el PE y PS. Las extrusiones de PVC se utilizan como sustitutos de molduras de madera en la industria de la construcción.

3. Espumas estructurales. Todos los termoplásticos (como el ABS) se pueden moldear por inyección, a una rapidez de inyección alta, hasta entre 60 y 90% de la densidad sólida. Hay muchas aplicaciones: carcasas de computadora y de electrodomésticos, plataformas y recipientes para transporte de material, puertas y persianas, y tableros de instrumentos para automóviles.

4. Procesamiento de espuma líquida de componentes múltiples. En éste, se vacían o se inyectan compuestos químicos en moldes para formar espumas termoestables *in situ*. El RIM también puede aplicarse. El que más se usa es el poliuretano en las formas de célula abierta (flexible) y rígida (hasta 500 kg/m^3). También se fabrican estructuras para soporte de carga como marcos de muebles y puertas. Por medio de esta técnica también se producen espumas de poliéster y de caucho de silicón.

Ejemplo 14-12

La densidad del poliestireno es de 1.05 g/cm^3. Calcule el volumen del espacio de aire en las paredes de un vaso de espuma de poliestireno expandido de 50 kg/m^3 de densidad.

Para facilidad de conversión, considere que 1 gr/cm^3 = 1 000 kg/m^3 (puede desear verificarlo). De ahí que el volumen del polímero en 1 m^3 de cuentas sea 50 kg/1 050 kg/m^3 = 0.0476 m^3 o 4.75%. El volumen de aire es 100 – 4.76 = 95.24%.

14-7 PROCESAMIENTO DE ELASTÓMEROS

En la sección 13-7-3 se vio que los elastómeros son termofijos con enlaces cruzados o termoplásticos anclados. Nos referimos a su procesamiento cuando resultó apropiado. No obstante, será útil hacer un repaso breve con énfasis en las diferencias.

La elasticidad de los cauchos permite el procesamiento en estado líquido mediante inmersión (también llamada *vaciado por inmersión*, que es lo contrario de la fundición por inversión). La forma se sumerge (si es necesario, repetidamente) en un *látex* (una emulsión de caucho en agua) o en una solución de caucho. La capa acumulada de esta manera se seca y se provocan los enlaces cruzados en un horno. Luego el producto, por ejemplo, un guante, se retira.

El caucho vulcanizado forma enlaces cruzados por calor; en consecuencia, se controla el procesamiento para evitar la vulcanización prematura (llamada *quemado*). Primero, el caucho se mezcla con negro de humo y con auxiliares de procesamiento en mezcladoras poderosas (especialmente las denominadas Banbury), que descomponen el caucho en una masa de viscosidad menor, al tiempo que elevan su temperatura a 150°C. El agente de vulcanización, normalmente azufre, se agrega en la segunda etapa donde las temperaturas se mantienen más bajas. El producto luego se extruye, calandra o moldea por inyección, transferencia o compresión en la misma forma que los otros termofijos. Las fibras o telas se incorporan durante el moldeo. La formación de enlaces cruzados tiene lugar en el proceso o durante calentamiento subsiguiente.

14-8 EQUIPO PARA PROCESAMIENTO DE PLÁSTICOS

Los moldes (matrices) que se usan en el procesamiento de plásticos pueden ser de construcción relativamente ligera si las presiones son bajas (como en el termoformado, moldeo rotatorio y moldeo por soplado) y a menudo se fabrican de una aleación de aluminio 7075 con tratamiento térmico completo. Las matrices para moldeo por inyección y para extrusión se fabrican con acero tratado térmicamente. Las superficies suelen estar muy pulidas (a menos que se les dé un acabado decorativo), y para mayor resistencia al desgaste, se pueden chapar con cromo o revestir con un recubrimiento superficial resistente al desgaste. Éste es de interés particular cuando los polímeros que contienen rellenos muy abrasivos se mueven a alta velocidad sobre las superficies de la matriz, como en las matrices de moldeo por inyección. El control de la temperatura de las matrices es crítico y se necesitan sistemas complejos de calentamiento y enfriamiento.

El equipo para procesamiento de plásticos comparte muchas características con el equipo de procesamiento de metales; sin embargo, la mayor sensibilidad de los plásticos a la temperatura, rapidez de cortante y tiempo de permanencia, ocasionan que el control del proceso sea más crítico. Por lo tanto, se ha hecho un esfuerzo sustancial para el desarrollo de detectores (de presión y temperatura del molde, velocidad y posición del émbolo) que permitan la adquisición de datos y el control de lazo cerrado, o adaptable, de todas las variables importantes del proceso. La introducción de controladores lógicos programables y de microcomputadoras ha hecho al procesamiento más repro-

ducible. Por ejemplo, el control adaptable se emplea en la extrusión de lámina y película para ecualizar el espesor a través de piezas muy anchas: el espesor de la lámina se mide continuamente en varios puntos a través del ancho, y el flujo del polímero se redistribuye al ajustar la forma de la matriz con la ayuda de pernos (Fig. 14-7*b*). La introducción de técnicas CAD/CAM ha eliminado gran parte de la experimentación de prueba-error del diseño del proceso. Los dispositivos eléctricos de velocidad variable y los hidráulicos servocontrolados dan la oportunidad de aplicar el control CNC a la mayoría de los procesos.

14-9 RESUMEN

La disponibilidad de una gran variedad de plásticos hace la tarea del diseño de piezas y de procesos más difícil que para los metales. La dificultad se complica aún más por las diferentes respuestas de varios plásticos a las condiciones de servicio como carga estática y de impacto a la temperatura de servicio; los efectos de la humedad, la radiación (incluyendo la luz) y otros factores del ambiente en el deterioro a largo plazo de las propiedades (envejecimiento); estabilidad dimensional; desgaste; la liberación de compuestos químicos indeseables en contacto con alimentos o el aire, y la respuesta a campos eléctricos. Un respaldo cada vez mayor de literatura técnica actualizada y software ayuda al diseñador. Como en todo diseño, la interacción de los procesos con el material debe plantearse con anticipación, con la debida consideración de las cantidades que se van a producir. Con frecuencia, la elección inicial del material se debe cambiar a la luz de restricciones impuestas por la economía del procesamiento. De ahí que la elección del material final también fije el proceso, por lo que éste se lleva a cabo tomando en cuenta sus capacidades y limitaciones. Una ventaja a menudo decisiva de los plásticos es la posibilidad de la integración de la pieza, la cual reduce el ensamble y resulta en menor costo.

Los procesos de los plásticos están relacionados con los de vaciado y los de deformación de plástica en metales, con algunas diferencias significativas atribuibles a la naturaleza de los polímeros.

1. El vaciado bajo la influencia de la fuerza de gravedad es posible para fusiones de baja viscosidad, plastisoles y precursores. Se practica el vaciado en moldes, la fundición por inversión y la continua.
2. La deformación bajo presión en el régimen de fusión (flujo viscoso) se emplea tanto para termoplásticos como para termofijos.
   a. La extrusión con tornillo se basa en el calor desarrollado al esforzar el plástico a corte. Barras, secciones y tubos se extruyen en matrices relacionadas con las de trabajo de metal. La extrusión de lámina y película anchas es sólo para los plásticos, pero el diseño de las matrices sigue principios universales.
   b. El moldeo por inyección es capaz de producir en masa piezas con gran complejidad, ya que los plásticos presentan reducción de la viscosidad por esfuerzo cortante y pueden fluir por canales angostos. Las temperaturas de procesamiento relativamente bajas permiten la operación de matrices con

núcleos móviles. En el moldeo por inyección de reacción, el polímero se forma en el molde. El moldeo por compresión y por transferencia amplían aún más el alcance del procesamiento, especialmente para los termofijos.

3. La alineación molecular responsable del adelgazamiento por esfuerzo cortante sirve para promover una alta elongación uniforme en la deformación por tensión; por lo tanto las preformas y la lámina fabricadas mediante extrusión o moldeo por inyección se pueden formar posteriormente en el moldeo por soplado y en el termoformado. La deformación biaxial origina productos libres de propiedades direccionales.
4. Muchas técnicas también son adecuadas para procesar plásticos en forma de espuma y elastómeros (cauchos).
5. El equipo de procesamiento de plásticos implican los mismos peligros que la maquinaria de fundición y de trabajo de metal. Además, muchos constituyentes de los plásticos representan un peligro para la salud y liberan vapores tóxicos.

PROBLEMAS 14A

14A-1 (*a*) Defina un plastisol. (*b*) Sugiera un proceso en el que se usaría.

14A-2 (*a*) Explique el procesamiento por fusión. (*b*) Defina termoplástico. (*c*) Establezca qué es termofijo o termoestable. (*d*) Con base en estas definiciones, conteste si se puede procesar un termofijo por fusión. Justifique su respuesta.

14A-3 (*a*) Dibuje un boceto de un extrusor de tornillo, identificando los elementos principales. (*b*) Marque las diferentes zonas del tornillo e indique las características que las distinguen. (*c*) Muestre la matriz y un producto redondo emergente; establezca la diferencia.

14A-4 Haga un bosquejo para explicar el fenómeno de la fractura de fusión.

14A-5 (*a*) Dibuje un boceto del calandrado. (*b*) Indique a qué proceso del trabajo de metal se parece.

14A-6 (*a*) Realice un bosquejo simplificado del moldeo de inyección por tornillo completo, con una matriz sencilla. (*b*) Determine las temperaturas relativas a la salida del cañón y en la matriz para un termoplástico y para un termofijo. (*c*) Identifique los elementos esenciales de la matriz.

14A-7 Dibuje bocetos que ilustren los principios del (*a*) moldeo por compresión y (*b*) moldeo por transferencia. Muestre los elementos esenciales de la matriz e indique (genéricamente) las temperaturas para un polímero termoplástico amorfo y para los elementos de la matriz. (*c*) Determine cuál de los dos procesos proporciona mayor rendimiento del material. (*d*) Mencione la razón principal para preferir el proceso de menor rendimiento del material. (*e*) Nombre las técnicas de procesamiento de metal más parecidas a estas técnicas de polímeros.

14A-8 Defina, genéricamente, las temperaturas para (*a*) el procesamiento por fusión y para (*b*) el procesamiento en el régimen de estado ahulado para un plástico amorfo y uno cristalino.

PROBLEMAS 14B

14B-1 Seis piezas idénticas se van a moldear por inyección al mismo tiempo en una matriz. Realice un boceto de un sistema de compuertas que (*a*) proporcione flujo uniforme en cada cavidad y (*b*) uno que no.

14B-2 Elija una solución para el sistema de compuertas para el moldeo por inyección del anillo del ejemplo 7-9; justifique su elección.

14B-3 En los metales, los productos huecos se fabrican mediante la fundición por inversión, y en los cerámicos a través del vaciado en hueco. (*a*) Establezca la contraparte de estos procesos en la tecnología de polímeros (no de plastisoles), y dé una definición sucinta de este proceso. Indique la secuencia principal de proceso y las temperaturas características (genéricamente) para el polímero y para el molde si el polímero es termoplástico (*b*) amorfo, (*c*) cristalino o (*d*) un polímero termofijo.

14B-4 Un polímero termoestable se moldea por inyección, en la etapa de prepolímero, con una forma intricada. Algunas partes de la cavidad no se llenan. Recomiende si la temperatura del molde se debe elevar o disminuir para el llenado completo (para apoyar su argumento, dibuje una gráfica que muestre, en principio, el cambio en la velocidad del flujo como una función de la temperatura del molde).

14B-5 Una barra rectangular se va a extruir en un termoplástico. (*a*) Superponga en el rectángulo de la matriz la forma del producto extruido. (*b*) Sugiera dos cambios posibles para el diseño de la matriz con el fin de obtener la sección transversal correcta.

14B-6 Una barra redonda de termoplástico que emerge de una matriz de extrusión tiene una superficie similar a la piel de tiburón. (*a*) Plantee una razón de su apariencia (*sugerencia*: los esfuerzos de tensión en la superficie pueden causar una deformación como ésa). (*b*) Proponga una forma de eliminar el problema.

14B-7 Un compañero argumenta que un polímero seudoplástico no se puede formar por soplado debido a su sensibilidad negativa a la rapidez de deformación. Realice una evaluación razonada de la afirmación.

14B-8 Los tubos de polímero termoplástico se extruyen sobre un mandril enfriado por agua, de ahí que las capas interiores se enfríen primero. ¿Qué distribución de esfuerzos residuales se debe esperar? ¿Es probable que persista durante un gran periodo?

14B-9 Los envases de leche retornables de HDPE se deben moler y remanufacturar después de unos 12 ciclos de uso por el cliente, ya que se contraen. Explique por qué sucede esto.

14B-10 (*a*) Dibuje un bosquejo de un proceso por medio del cual se pueda fabricar un recipiente rectangular abierto de espesor de pared uniforme, a partir de una lámina de polímero termoplástico amorfo. Especifique las temperaturas de la pieza de trabajo y de los elementos de la matriz (genéricamente). Indique la secuencia de operaciones. (*b*) El recipiente fabricado en el inciso (*a*) pierde su forma en el servicio. Identifique la causa probable. (*c*) Establezca una recomendación para eliminar el problema.

14B-11 Colecte varias botellas y envases diferentes de plástico (incluya, si está disponible, una botella con asa). Inspeccione las superficies exteriores y busque evidencias de las técnicas de manufactura. Después de seccionarlas, revise las superficies interiores y verifique las variaciones del espesor de la pared. A partir de sus conclusiones, describa el proceso de manufactura más probable para cada recipiente.

14B-12 Una caja cuadrada se fabrica por termoformado. En el formado completamente al vacío, las orillas se adelgazan excesivamente. Para explicar su análisis y recomendación, (*a*) dibuje un boceto del formado al vacío puro, mostrando la matriz y las temperaturas del polímero; (*b*) demuestre por qué las esquinas y las orillas se adelgazan, y (*c*) sugiera un método de producción para reducir el adelgazamiento.

14B-13 Enuncie al menos tres procesos por medio de los que se puede fabricar una lámina de plástico de 2 m de ancho y 0.2 mm de espesor.

14B-14 Se va a fabricar una botella soplando una preforma de 40 mm a 100 mm de diámetro. La pared de la botella debe ser uniforme y no se permite el adelgazamiento local. Los materiales propuestos son (*a*) polímero termoplás-

tico, (*b*) vidrio y (*c*) metal. Determine qué propiedad es esencial para la manufactura exitosa, y luego juzgue si los tres materiales la poseen; de ser así, bajo qué condiciones.

PROBLEMAS 14C

14C-1 Una botella se sopla, como en la figura 14-16, desde un tubo extruido de HDPE de 30 mm de diámetro exterior y 28 mm de diámetro interior. (*a*) ¿Cuál será el espesor de pared en el acabado en el talle (diámetro 70 mm) y en el abultamiento (diámetro 110 mm)? (*b*) ¿Cómo se podría ecualizar el espesor de la pared?

14C-2 Mida el espesor de la pared de un recipiente de margarina suave o requesón, en el borde, lado y fondo (utilice un micrómetro de punta redonda y ejerza muy poca presión). Si están disponibles, verifique dos recipientes de diámetro idéntico pero de profundidad diferente. Demuestre que la profundidad se desarrolló a partir de una pieza circular con un espesor igual al del borde.

14C-3 Las bolsas de víveres a menudo se fabrican de película de LDPE (0.920 g/cm^3) soplado de 25 μm de espesor. Una bolsa típica es de 60 cm de longitud y 50 cm de ancho, y el precio de la resina es US$0.8/kg. Ahora se sugiere que la bolsa se fabrique de LLDPE (0.922 g/cm^3, US$0.96/kg). Como este material es más resistente y se estira menos, el calibre se puede reducir a 18 μm. Calcule si la propuesta es económica.

14C-4 Una presión de 300 MPa se aplica al punzón de una matriz de moldeo por transferencia. El diámetro del punzón es de 50 mm, y el área proyectada de las cavidades del molde, incluyendo los canales y compuertas de alimentación, es de 3 600 mm^2. Determine el tamaño de la prensa y la fuerza de sujeción requerida.

14C-5 Verifique el cálculo del ejemplo 14-12 midiendo las dimensiones de un vaso de poliestireno expandido y también pesándolo. Explique las causas de las posibles discrepancias.

14C-6 Una barra redonda de 15 mm de diámetro se extruye por medio de un extrusor de un tornillo único con diámetro del cañón de 100 mm. El material es LDPE. Calcule (*a*) la rapidez aproximada del flujo, (*b*) la velocidad de la extrusión emergente y (*c*) la potencia necesaria esperada.

14C-7 La parte mostrada en la figura del ejemplo 7-9*b* se va a fabricar de resina de fenol-formaldehído mezclada con aserrín. (*a*) De los datos en la tablas 13-3 y 14-1, elija un proceso adecuado. (*b*) Tomando valores promedios de la tabla 13-3 y del texto relevante, especifique las condiciones del proceso. (*c*) Diseñe, en principio, la matriz e indique sus elementos principales. (*d*) Determine el tamaño del equipo necesario.

LECTURAS ADICIONALES (véase también el capítulo 13)

ASM Engineered Materials Handbook: Desk Edition, ASM International, 1995.

ASM Engineered Materials Handbook, vol. 2, *Engineering Plastics*, ASM International, 1988.

Mitchell, P. (ed.): *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, vol. 8, *Plastic Part Manufacturing*, Society of Manufacturing Engineers, 1996.

Modern Plastics Encyclopedia, McGraw-Hill, Annual.

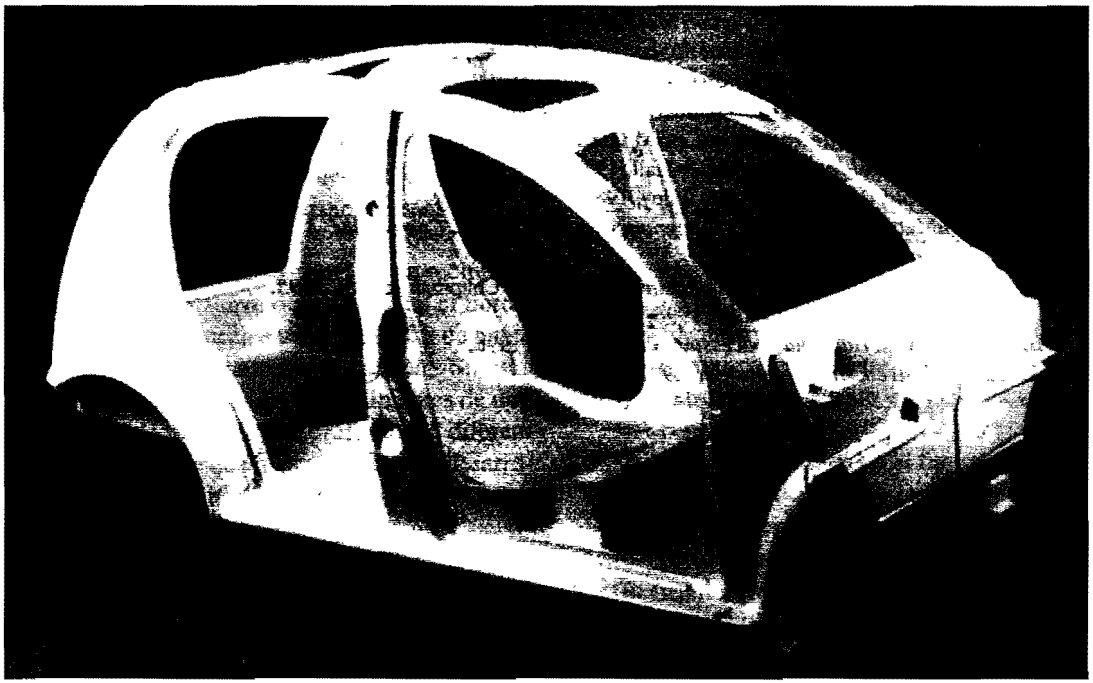
Agassant, J.F., P. Avenas, J.Ph. Sergent y P.J. Carreau: *Polymer Processing: Principles and Modeling*, Hanser, 1991.

Buckleitner, E.V. (ed.): *Dubois and Pribble's Plastics Mold Engineering Handbook*, Chapman & Hall, 1995.

Bryce, D.M.: *Plastic Injection Molding*, SME, 1996.

Campbell, P.: *Plastic Component Design*, Industrial Press, 1996.

Chabot, J.F.: *The Development of Plastics Processing Machinery and Methods*, Wiley, 1992.
Chanda, M. y S.K. Roy: *Plastics Technology Handbook*, 2a. ed., Dekker, 1992.
Charrier, J.-M.: *Polymeric Materials and Processing*, Hanser, 1991.
Crawford, R.J. (ed.): *Rotational Moulding of Plastics*, Wiley, 1992.
Griskey, R.G.: *Polymer Process Engineering*, Chapman & Hall, 1995.
Lee, N.C. (ed.): *Plastic Blow Molding Handbook*, Van Nostrand Reinhold, 1990.
Levy, S. y J.F. Carley (eds.): *Plastics Extrusion Technology Handbook*, 2a. ed., Industrial Press, 1989.
Malloy, R.A.: *Plastic Part Design for Inyection Molding*, Hanser, 1994.
Michaeli, W.: *Extrusion Dies for Plastics and Rubber*, 2a. ed., Hanser, 1992.
Morton-Jones, D.H.: *Polymer Processing*, Chapman & Hall, 1989.
Muccio, E.A.: *Plastic Part Technology*, ASM International, 1991.
Muccio, E.A.: *Plastics Processing Technology*, ASM International, 1994.
Potter, K.: *Resin Transfer Molding*, Chapman & Hall, 1997.
Pye, G.W.: *Inyection Mold Design*, Longman-Wiley, 1989.
Rosato, D.V., D.P. DiMattia y D.V. Rosato: *Designing with Plastics and Composites: A Handbook*, Van Nostrand Reinhold, 1991.
Rosato, D.V. y D.V. Rosato: *Injection Molding Handbook*, 2a. ed., Chapman & Hall, 1995.
Shastri, R.: *Plastics Product Design*, Dekker, 1996.
Strong, A.B.: *Plastics: Materials and Processing*, Prentice Hall, 1996.
Xanthos, M. (ed.): *Reactive Extrusion*, Hanser, 1992.



Los plásticos se han empleado por largo tiempo en las carrocerías de automóviles, pero generalmente como lienzos de cubierta unidos al bastidor metálico portador de carga. Una futura solución posible se muestra a través del Vehículo de Concepto Compuesto de Chrysler: la carrocería completa se fabrica a partir de cuatro piezas moldeadas de PET termoplástico reforzado con fibra de vidrio, con lo cual se ahorra masa y se simplifica el ensamble sobre el bastidor metálico inferior. (*Cortesía de Ticona, Summit, N.J.*)

capítulo

15

Compuestos

Ahora estamos en condiciones de revisar los métodos para combinar los beneficios de diferentes materiales, con el fin de influir en las propiedades volumétricas de compuestos que:

Hacen a los plásticos competitivos con el acero

Permiten construir el casco de un bote de una sola pieza

Incrementan el módulo elástico y la resistencia de los metales ligeros

Construyen alambres que transportan corriente sin resistencia

La terminología de los compuestos presenta algunas dificultades. Los compuestos siempre se forman para combinar los beneficios de dos o más materiales con el propósito de mejorar la resistencia mecánica, la rigidez, la resistencia a la corrosión, las propiedades eléctricas o simplemente la apariencia. Por definición, los compuestos son estructuras hechas de materiales diferentes, cuyas identidades se mantienen aun después de que el componente se ha formado por completo. Así, siempre hay una interfase entre los dos materiales y las propiedades de ésta tendrán una influencia decisiva en las del compuesto. En la sección 6-3-2 se vio que éste también es el caso para los materiales de dos fases, y en efecto, los metales de dos fases, las mezclas cerámicas y poliméricas son, en este sentido, compuestos. Sin embargo, sus propiedades se ven afectadas por acontecimientos en la escala atómica o molecular y para distinguirlos de los compuestos en el sentido generalmente aceptado, se debe reducir la definición de compuestos a *estructuras formadas en la escala macro*. Lo "macro" depende del sistema particular, pero por lo regular está en el orden de varios micrómetros.

Frecuentemente las propiedades deseables se obtienen aplicando una capa superficial, por lo que se habla de un *recubrimiento* o *revestimiento*. Como algunas veces esto se realiza como el último paso en la secuencia de manufactura, los recubrimientos se analizan junto con los tratamientos superficiales en el capítulo 19; aquí nuestro interés son los *compuestos que se forman para influir en las propiedades del volumen* de un producto.

15-1 CLASIFICACIÓN DE LOS COMPUESTOS

El material que rodea al otro componente del sistema es la matriz, y se puede hablar de compuestos de matriz metálica, cerámica o polimérica. El compuesto embebido también puede ser metal, cerámico o polímero; en términos de su efecto, la forma es de importancia particular.

15-1-1 Compuestos particulados

En ellos, el material embebido está en forma de gránulos más o menos equiaxiales y las propiedades son casi isotrópicas. Esto también es cierto para partículas laminares pequeñas (como hojuelas) o fibrosas, si están orientadas aleatoriamente. Por simplicidad, les llamamos *rellenos*, aun si afectan las propiedades.

Regla de las mezclas La masa m_c del cuerpo compuesto es

$$m_c = m_f + m_m = \rho_f V_f + \rho_m V_m = \rho_c V_c \tag{15-1}$$

donde m es la masa, ρ la densidad y V el volumen; los subíndices c, f y m se refieren al compuesto, relleno y matriz, respectivamente. Entonces la densidad del componente es

$$\rho_c = \frac{\rho_f V_f + \rho_m V_m}{V_c} \tag{15-2}$$

Si se denota $V_f/V_c = f$ como la fracción del volumen del relleno,

$$\rho_c = f\rho_f + (1-f)\rho_m \tag{15-3}$$

Ésta es la regla de las mezclas: cada componente contribuye a las propiedades del compuesto en proporción a su fracción de volumen.

15-1-2 Reforzamiento fibroso

Cuando el relleno más fuerte o de módulo mayor está en forma de fibras delgadas, sólidamente pegadas a la matriz, las propiedades dependen de las fibras y de su proporción, así como de su orientación relativa a la aplicación de la carga (Fig. 15-1). Una fracción mínima (crítica) del volumen debe estar presente y la fibra debe ser continua, o si se corta, debe ser lo suficientemente larga para que los esfuerzos se transfieran de la matriz a la fibra. Se puede obtener una *longitud crítica* l_{cr} partiendo de la condición que ésta debe ser más fuerte para cortar la matriz en el límite de la fibra (sacar la fibra) en lugar de romperla:

$$l_{\text{cr}} = \frac{d(\text{TS})}{2\tau_i} \tag{15-4}$$

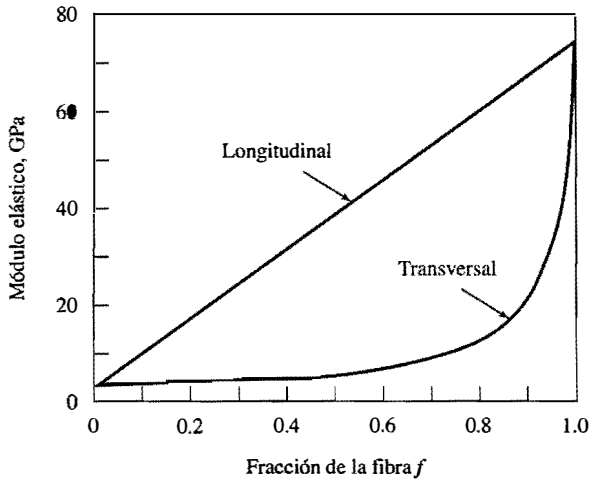


Figura 15-1 El módulo elástico de un compuesto unidireccional se incrementa rápidamente en dirección de la fibra, pero se gana poco en dirección transversal. (Los valores son para el epóxico reforzado con fibra de vidrio del ejemplo 15-1.)

donde TS es la resistencia a la tensión, d el diámetro de la fibra y τ_i la resistencia (al corte) del enlace interfacial. En general, cuando la fibra tiene una longitud mayor de $15l_c$, su efecto es similar al de una continua.

Compuestos unidireccionales (UDC) En éstos, todas las fibras están alineadas. Cuando la carga se aplica en forma paralela a las fibras, éstas y la matriz están igualmente esforzadas (*condición de isodeformación*), por lo que el módulo elástico sigue la regla de las mezclas. Así, el módulo elástico compuesto E_c es

$$E_c = fE_f + (1-f)E_m \qquad \textbf{(15-5)}$$

donde f es de nuevo la fracción del volumen de la fibra, y E_f y E_m son los módulos elásticos de la fibra y de la matriz, respectivamente. En consecuencia, el módulo elástico (y el de flexión) se pueden incrementar incorporando a la matriz un material de módulo mayor, así el aumento es directamente proporcional a la fracción de la fibra (Fig. 15-1).

La resistencia a la tensión está sujeta a sucesos más complejos. Bajo carga, primero se rompe una fibra individual y las consecuencias de esto dependen de las propiedades de la matriz y de las condiciones locales. El objetivo es neutralizar el efecto de la falla local; para ello, la matriz debe tener una ductilidad suficientemente alta para no propagar una grieta y poder soportar el esfuerzo cortante en la interfase fibra-matriz. Aunque se puede hacer una primera estimación de la resistencia por medio de la regla de las mezclas, el diseño real se basa en un tratamiento estadístico de las propiedades.

Cuando las fibras están orientadas perpendicularmente a la aplicación de la carga se necesita más fibra para rigidizar el material, de modo que las propiedades transversales de los compuestos orientados son más pobres. Las fibras transfieren esfuerzos a la matriz y ambas están igualmente esforzadas (*condición de isoesfuerzo*). El módulo se incrementa, aunque ligeramente, de acuerdo con

$$E_c = \frac{E_f E_m}{f E_m + (1-f)E_f} \tag{15-6}$$

Una diferencia importante implica un volumen de fibra muy grande (Fig. 15-1), y el efecto en la resistencia a la tensión es aún menor.

Compuestos biaxiales Cuando el componente se somete a esfuerzos biaxiales (como en un recipiente bajo presión o en un tubo), los mejores resultados se obtienen con fibras biaxialmente orientadas (capas cruzadas). La orientación aleatoria proporciona un mejoramiento útil (Fig. 15-2).

Laminados Una alternativa a las fibras biaxialmente orientadas es unir compuestos unidireccionales en un laminado de dos o más capas (de preferencia un número impar).

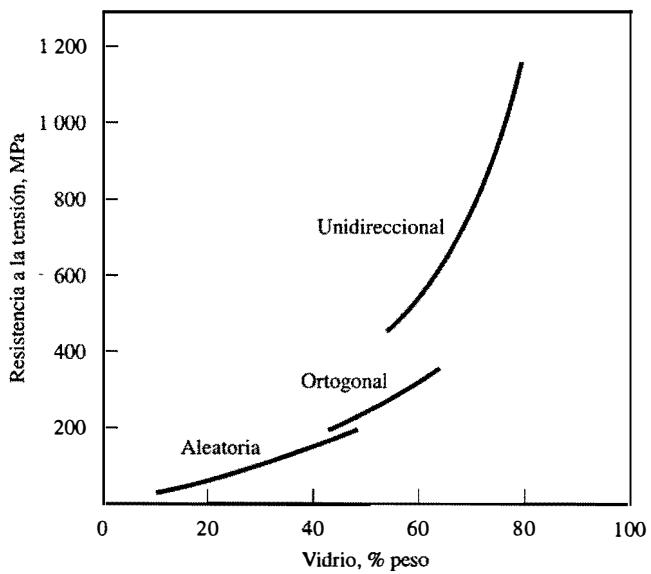


Figura 15-2 La orientación de la fibra es un factor importante al determinar las propiedades obtenidas en los compuestos de poliéster-fibra de vidrio. [*Según R.M. Ogorkiewicz, The Engineering Properties of Plastics (Engineering Design Guide No. 17), The Design Council, Londres, 1977. Con permiso.*]

La madera contrachapada, formada por dos o más placas es un ejemplo familiar. La madera, por sí misma, es un compuesto unidireccional natural extremadamente complejo. En la escala microscópica, se forma de células tubulares, cuyas paredes se componen de cadenas de celulosa cristalina $(C_6H_{10}O_5)_n$. Las microfibras de celulosa de 10 a 30 nm de diámetro y de 2 a 4 mm de longitud proveen el esqueleto que está encerrado en hemicelulosa semicristalina y está enlazado por una matriz de lignina. La alineación de las células da a la madera su alta resistencia a la tensión en la dirección axial (paralela), y varias capas combinadas con una alineación mutuamente perpendicular proporcionan las propiedades biaxiales superiores de la madera contrachapada. Los laminados a menudo se fabrican para aplicaciones distintas al soporte de carga; así, la capa puede ser un material no reforzado. La lámina bimetálica y la hoja plástica coextruida son ejemplos de ello. Sin embargo, las propiedades del volumen no se ven afectadas; por lo que estos productos no cumplen uno de nuestros criterios respecto a un compuesto, de modo que se analizan en la sección 18-12.

La tenacidad de las estructuras reforzadas es una cuestión compleja y depende en gran medida del mecanismo por el cual fallan la matriz y el reforzamiento. Una fibra fuerte, muy enlazada a una matriz de polimérica o metálica, eleva la tenacidad porque se requiere energía extra para romper la fibra. Sin embargo, se verá que la resistencia

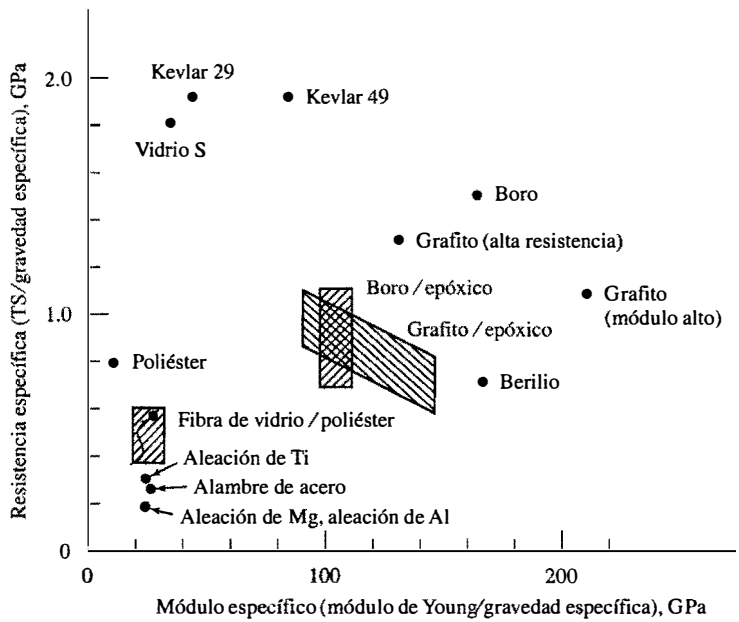


Figura 15-3 Para un peso dado, los materiales compuestos con fibras orientadas en la dirección de la carga ofrecen ganancias tremendas en resistencia y rigidez, como lo muestran su resistencia y módulo específicos (áreas sombreadas). Por comparación, los valores característicos se muestran para fibras desnudas y para los miembros de resistencia mayor de los grupos de aleaciones.

del enlace debe optimizarse en los compuestos de matriz cerámica para permitir la separación controlada de las fibras. Una ventaja de los compuestos es que la fractura de una de las fibras no daña la estructura total; con frecuencia la falla es gradual, por lo que es posible realizar reparaciones, aunque a menudo es costoso.

Las mejoras se pueden apreciar en los datos para plásticos reforzados de las tablas 13-2 y 13-3. Los beneficios potenciales relativos a los metales se muestran en la figura 15-3, donde se dan la resistencia y la rigidez específicas para varios compuestos. (En principio, la resistencia y el módulo elástico deben dividirse entre la densidad pero, para mantener las unidades en GPa, aquí se dividen entre la gravedad específica.)

15-2 FIBRAS DE REFUERZO

Una buena fibra de refuerzo tiene un módulo elástico alto, resistencia elevada, baja densidad y es humedecida por la matriz. A menudo es necesario mejorar la humectación por medio de la aplicación de agentes de acoplamiento, recubrimientos, o de un tratamiento de conversión de la superficie de la fibra.

Los principales tipos de fibras se muestran en la tabla 15-1. Las composiciones de vidrio se producen a la medida para resistencia eléctrica alta (vidrio E), resistencia (vidrio S) o resistencia química (vidrio C). Las fibras de polímero son adecuadas sobre todo para aplicaciones de tensión. Las fibras de grafito se fabrican por *pirólisis* (calen-

Tabla 15-1 Propiedades de algunas fibras reforzantes

Fibra	Densidad, g/cm³	Módulo de Young, GPa	Resistencia a la tensión, GPa
Acero de alta resistencia	7.83	210	2.1
Tungsteno	19.3	350	4.2
Berilio	1.84	300	1.3
Vidrio E	2.48	75	3.5
Vidrio S	2.54	85	4.6
Vidrio C	2.56		3.3
Alúmina	3.15	320	2.1
SiC	3.0	400	2.8
Boro	2.6	420	4.0
Grafito			
Alto módulo	1.9	390	2.1
Alta resistencia	1.9	240	4.0
Kevlar* 29	1.44	83	2.8
Kevlar* 49	1.44	130	3.2

* Marca registrada para aramidas DuPont.

tamiento en una atmósfera inerte entre 800 y 1 200°C) con precursores de polímero, betún o rayón. Los monofilamentos de boro y SiC se fabrican por deposición química de vapor (Secc. 19-7) en un sustrato de alambre de tungsteno. Los microfilamentos ("whiskers") son monocristales de diámetros del orden de micrómetros y una longitud igual a decenas o cientos de diámetros. Como están libres de dislocaciones, tienen una resistencia muy alta. Los monocristales en forma de laminillas son menos efectivos pero aún útiles para aumentar la tenacidad en forma no direccional, por lo general tienen < 1 μm de espesor, y entre 10 y 30 μm de diámetro.

El diámetro de las fibras varía entre 2 y 30 μm; el pequeño diámetro permite la flexión alrededor de radios menores, sin exceder el límite elástico [véase la ecuación (10-3*a*)]. Las fibras están disponibles en *filamentos* (o *monofilamentos*; es decir, fibras continuas individuales muy largas), *hilo* (manojo retorcido de filamentos), *mecha* (manojos de filamentos sin retorcer, unidos paralelamente), *estopas* (manojos sin retorcer de miles de filamentos), *telas tejidas* (hechas de filamentos, hilo o mecha, tejidos en ángulos de 90° unos respecto a otros), *mallas* (fibras tejidas en un tubo, en vez de tela plana), *esteras* (fibra continua depositada en un patrón de remolino, o fibra cortada en un patrón aleatorio), *esteras de combinación* (una capa de mechas tejidas, unidas a una capa de estera de trenza cortada), *esteras de superficie* (esteras de monofilamentos muy delgados para mejor acabado superficial), *fibras* o *mecha cortadas* (de 3 a 50 mm de longitud), y en materiales frágiles, *fibras bataneadas* (de 0.5 a 3 mm de longitud). Las fibras de vidrio son las que se utilizan con mayor frecuencia por lo menos en matrices poliméricas, en parte debido a su bajo costo. Si el costo de un peso unitario de vidrio E es 1, el de fibras de aramida y carbono es de cerca de 10, y el de SiC 30 y boro, de más de 100.

15-3 COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA

Por mucho, las cantidades mayores de los compuestos se basan en polímeros que tienen bajas resistencia, rigidez y resistencia a la termofluencia. La proporción del refuerzo rara vez es menor a 20% y puede llegar a 80% en estructuras orientadas. Ya se vio en la sección 13-5 que muchos plásticos contienen rellenos (que simplemente pueden incrementar el volumen, pero también afectar otras propiedades) y/o partículas de refuerzo (agregadas con el propósito expreso de mejorar las propiedades mecánicas). Convencionalmente, se llaman plásticos reforzados o rellenos, aunque pueden satisfacer nuestra definición de compuestos. Únicamente cuando las fibras son largas (o continuas), se aplicará el término compuesto, y se usarán procesos específicos para su manufactura (Fig. 15-4).

15-3-1 Polímeros

El polímero es con mucha frecuencia un termofijo. Los poliésteres que permiten enlaces cruzados resultan relativamente baratos, fáciles de procesar, y son las resinas dominantes para el refuerzo intermedio (fibra recortada). Para aplicaciones de mayor tempe-

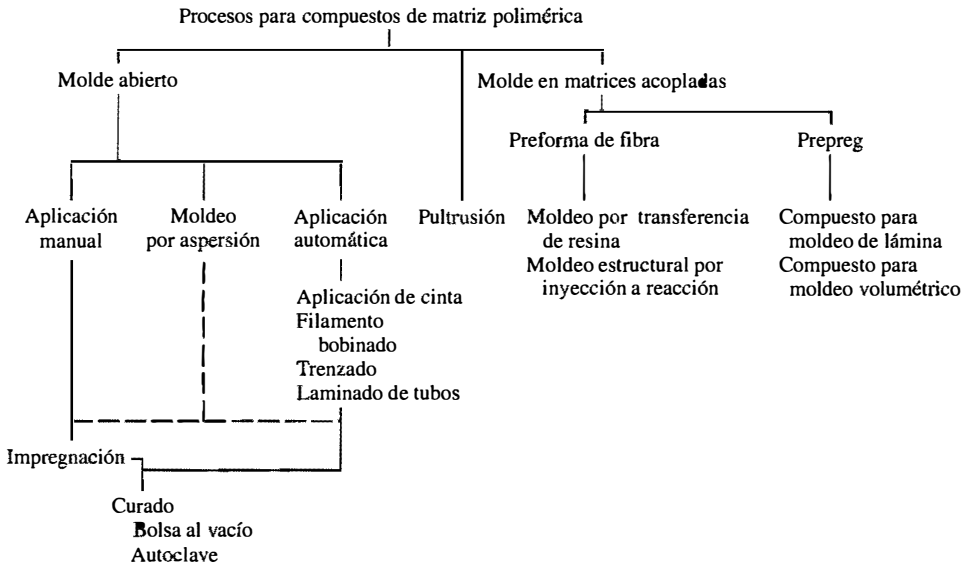


Figura 15-4 Clasificación de los procesos de manufactura para compuestos de matriz polimérica. [*Adaptada de J.A. Schey, ASM Handbook, vol. 20, Materials Selection and Design, ASM International, 1997, p. 701. Se publica con autorización.*]

ratura, las resinas fenólicas son adecuadas pero desarrollan un subproducto de condensación. Si también se necesita resistencia más alta, se emplean resinas de epoxi o de bismaleimida que se polimerizan sin subproductos y proporcionan piezas libres de poros. Para una temperatura mayor se emplean las poliimidas. Las temperaturas de procesamiento son bajas, alrededor de la T_g del prepolímero (de 20 a 175°C para epoxis, pero es mayor para la poliimida). Los tiempos de procesamiento son largos, por lo común de varias horas. El reciclado está limitado a la incorporación de material remolido.

Hay un auge en el uso de los termoplásticos, sobre todo de los PP, poliésteres, poliamidas y polisulfonas, especialmente para refuerzo con fibras cortas. A menos que se formen *in situ* a partir de monómeros, su temperatura de procesamiento es mucho mayor (arriba de T_m), siendo la humectación de las fibras más difícil que para los termofijos. Sin embargo, los tiempos de ciclo son más cortos (en el orden de minutos), los defectos se pueden remediar y es posible el reciclado total. Con frecuencia, se incorporan rellenos tanto en matrices termoplásticas como en las termofijas.

15-3-2 Aplicación de los polímeros

El polímero (o prepolímero) y el refuerzo se pueden aplicar por separado; pero grandes cantidades de mechas, esteras, etcétera, también se venden como compuestos (o "prepregs") previamente impregnados con la resina. Se encuentran en dos formas básicas:

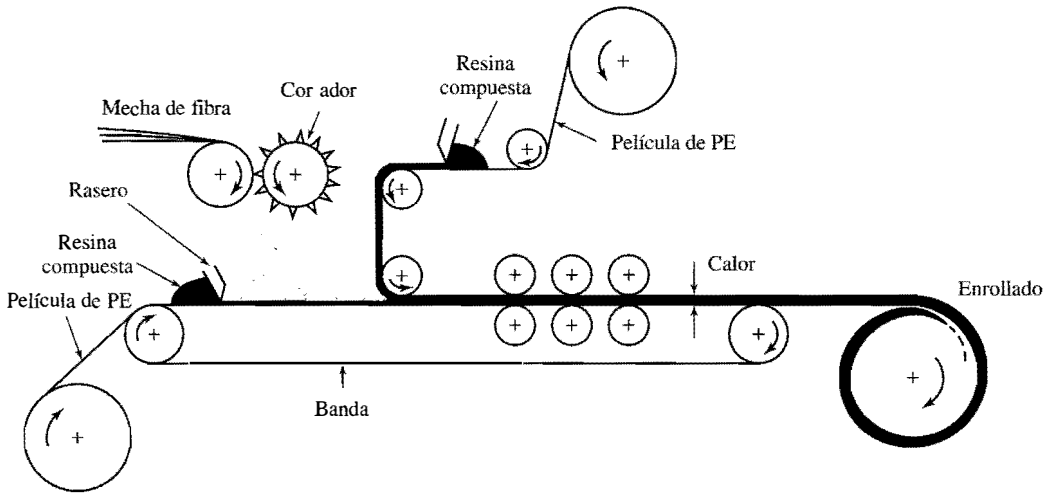


Figura 15-5 Los compuestos para el moldeo de lámina (SMC) se fabrican en grandes cantidades para el moldeo subsecuente en matrices de acoplamiento. La película de PE se retira antes del moldeo.

Los *compuestos para moldeo volumétrico* (BMC), de una consistencia parecida a la masilla, se producen premezclando el polímero con fibras, rellenos, colorantes, iniciadores, catalizadores, etcétera.

Los *compuestos para moldeo de láminas* (SMC) se preparan para piezas grandes como láminas. Primero, se deposita una mezcla de resinas (principalmente poliéster, con algunos termoplásticos agregados para mejorar las propiedades del impacto) en una película portadora de PE (el espesor se define con un rasero); luego encima de ella se deposita mecha de fibra cortada de 6 a 75 mm de longitud; por último, se utiliza otra capa de mezcla de resina —aplicada a una película portadora— como cubierta. Después, el emparedado se compacta con rodillos y se calienta para asegurar la humectación completa de las fibras y para iniciar el espesamiento (Fig. 15-5). Este SMC se enrolla en bobinas y se almacena (si es necesario, refrigerado) durante un tiempo limitado. Una secuencia de procesamiento similar se usa para la cinta unidireccional y para la cinta laminada compuesta de varias capas, cada una con una orientación específica. Los compuestos termofijos se deben emplear antes de que comience la formación de enlaces cruzados, y a menudo se refrigeran para su almacenamiento. Los compuestos termoplásticos tienen la ventaja de tener una vida infinita de almacenamiento. Los puntos críticos son la humectación y la penetración completa del refuerzo por el plástico. La laminación entre rodillos es un método efectivo. El tratamiento posterior de los SMC es similar al de la lámina de metal. Las piezas se pueden cortar con matrices de regla de acero (Fig. 10-10*b*), con un haz de láser, o con cuchillas recíprocas utilizadas en la industria textil.

Ejemplo 15-1

Un tablero de compuesto unidireccional se fabricará con resina epóxica reforzada con fibra de vidrio E. Se desea un módulo elástico longitudinal de 20 GPa. Calcule (*a*) la proporción de fibra de vidrio requerida por volumen y (*b*) por peso, (*c*) la densidad del compuesto, (*d*) el módulo elástico en dirección transversal y (*e*) la cantidad de la carga aplicada que soportan las fibras. El módulo del vidrio E es 75 GPa (tabla 15-1) y el de un epóxico sin rellenar es 3.0 GPa (tabla 5-4).

(*a*) De la ecuación (15-5), $E_c = f E_f + (1 - f)E_m$. Así, $20 = 75f + (1-f)3.0$ y $f = 0.236$ o 23.6% en volumen.

(*b*) La densidad del epóxico es 1.22 g/cm³ y la del vidrio 2.48 g/cm³. En 100 cm³ de compuesto, hay 23.6(2.48) = 58.5 g de vidrio y (100 – 23.6)(1.22) = 93.2 g de epóxico. El peso total es 58.5 + 93.2 = 151.7 g. De éste, 58.5/151.7 = 0.3856 o 38.56% wt es vidrio, y 93.2/151.7 = 0.6143 o 61.43% wt es epoxi.

(*c*) La densidad es 151.7 g/100 cm³ = 1.157 g/cm³. Esto se podría haber obtenido de manera directa por medio de la regla de las mezclas, ecuación (15-3): $\rho_c = f\rho_f + (1 - f)\rho_m$ y

$$0.236(2.48) + (1 - 0.236)(1.22) = 1.517 \text{ g/cm}^3$$

(*d*) Ecuación (15-6)

$$E_c = \frac{E_f E_m}{f_f E_m + f_m E_f} = \frac{3.0(75)}{(0.236)(3.0) + (0.764)(75)} = 3.88 \text{ GPa}$$

así, hay un incremento menor en el módulo.

(*e*) Si el vidrio representa 23.6% del volumen, también representa 23.6% del área de la sección transversal. El vidrio y el epóxico son obligados a extenderse juntos bajo carga, por lo que la deformación es igual en ambos. De la ecuación (4-5)

$$e = \frac{\sigma}{E} = \frac{P}{AE}$$

así

$$\frac{P_f}{P_m} = \frac{A_f E_f}{A_m E_m} = \frac{0.236(75)}{0.764(3)} = 7.72$$

en otras palabras, 88.5% de la carga la soporta el 23.6% de fibra.

15-4 FABRICACIÓN DE COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA

El método de fabricación depende en gran medida de la forma y del tamaño del producto, así como de las cantidades necesarias.

15-4-1 Procesos en molde abierto

Sólo se necesita un molde (macho o hembra) que puede estar hecho de cualquier material, como madera, plástico reforzado o, para corridas más grandes, de lámina de metal

o de níquel electroformado. Los moldes de yeso se pueden romper; en consecuencia, es factible producir conductos con pasajes complejos. La superficie de la pieza que hace contacto con el molde reproduce la de éste y puede ser muy lisa.

Conformado Para permitir la separación de la parte, primero se aplica un agente desmoldante al molde (silicona, alcohol polivinilo, fluorocarbono o, algunas veces, película plástica). Para mejor calidad superficial, a continuación se puede depositar una capa superficial sin refuerzo (*recubrimiento de gel*). La superficie libre es mucho más rugosa porque la alta contracción de los plásticos resalta al reforzamiento.

1. En la *aplicación manual*, la resina y la fibra (o piezas cortadas de compuesto de moldeo) se colocan en forma manual, el aire se expulsa con escobillas de goma y si es necesario, se acumulan capas múltiples. El endurecimiento ocurre a temperatura ambiente, pero se puede acelerar mediante el calentamiento. El volumen de los vacíos es por lo general 1%. Es factible incorporar núcleos de espuma (y dejarlos en la pieza) para mayor complejidad de forma. En consecuencia, se pueden producir esencialmente todas las formas de la figura 3-1. El proceso es lento (la velocidad de deposición es de alrededor de 1 kg/h), implican mucha mano de obra y la calidad depende en gran medida de la habilidad del operador.

2. Los costos de mano de obra son más bajos en la *aspersión*, con una pistola aspersora que suministra la resina en dos corrientes convergentes, dentro de las que la mecha se corta (Fig. 15-6). La automatización con robots propicia una fabricación altamente reproducible.

3. Se obtiene una alta productividad (5 kg/h) con *máquinas de aplicación en cinta* que cortan y aplican la capa o compuestos de moldeo (prepreg) bajo control por computadora y sin tensión; de esta manera es factible producir formas reentrantes. El costo es de cerca de la mitad del de la aplicación manual. Todas las técnicas anteriores se usan mucho para productos como componentes de aeronaves, botes, cuerpos de camiones, tanques, piscinas y conductos.

4. En el *bobinado de filamentos* se producen formas esféricas, cilíndricas y otras formas, embobinando en un filamento continuo sobre un patrón prediseñado, bajo tensión constante en un mandril. Debido a la tensión, las formas reentrantes no se pueden producir. Frecuentemente se emplean máquinas de bobinado de CNC con varios grados de libertad (algunas veces 7). El filamento (o cinta, estopa o banda) se prerrecubre con el polímero, o se extrae a través de un baño de polímero, por lo que lo levanta en su camino hacia la bobinadora. El volumen de vacíos puede ser mayor (3%). El costo es de cerca de la mitad de la aplicación en cinta, y la productividad es alta (50 kg/h). Los tubos, tanques y recipientes bajo presión se fabrican de esta manera, ya que el filamento puede orientarse. El ángulo en el bobinado helicoidal (Fig. 15-7*a*) y polar (Fig. 15-7*b*) se elige en dirección del esfuerzo máximo; el bobinado de anillo (Fig. 15-7*c*) asegura una resistencia circunferencial máxima. Con frecuencia, los recipientes cilíndricos se fabrican con varias capas de orientaciones diferentes. Las carcasas de los motores de cohetes reforzadas con fibra de carbono que se emplean para el trasbordador espacial y para otros cohetes se fabrican de esta forma. (Cada propulsor de combustible sólido del trasbordador espacial tiene cuatro carcasas de 3.6

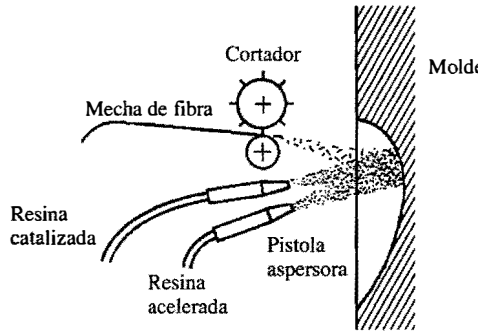


Figura 15-6 La aspersión es un método de bajo costo para crear partes compuestas de resistencia media.

m de diámetro y 9 m de longitud.) Se pueden producir formas más complejas a menor costo por medio de la aplicación de técnicas de tejido textil que producen trenzados en configuraciones bidimensionales o tridimensionales. Las telas tejidas se pueden envolver alrededor de contornos complejos.

Ejemplo 15-2

El fuselaje del jet de negocios Premier 1 de la Raytheon Aircraft se fabrica sólo de dos piezas de 1.8 m de diámetro. Un sistema de colocación de estopa de 7 ejes pone hasta 24 madejas de fibra de carbono de 3 mm de ancho en forma simultánea. Las madejas se alimentan a través de una cabeza con rodillos segmentados, los cuales comprimen la madeja hacia el área de trabajo. Se acumulan varias capas y el programa de control alimenta, corta y reinicia a las madejas en la forma que sea necesaria para producir aberturas de ventanas y puertas. Primero, la pared interior se deposita en el mandril, luego se coloca a mano el panal (Secc. 18-12), en seguida se pone la capa exterior de la capa de fibra de carbono, y finalmente se aplica una capa de tela con filamentos metálicos que completa la cubierta exterior. El curado tiene lugar en un autoclave. El compuesto de fibra de carbono, en combinación con la estructura de panal, tiene un espesor de pared de 21 mm, en comparación con los 75 mm característicos de la construcción de aluminio; de esta manera, incrementa sustancialmente el volumen de la cabina. [*Fuente*: *Manufacturing Engineering*, 1998 (3): 48.]

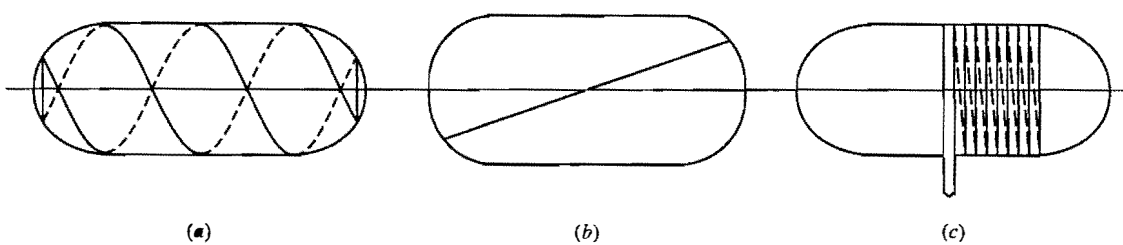


Figura 15-7 El bobinado de filamento ofrece la posibilidad de orientar el reforzamiento en dirección del esfuerzo máxima, haciendo bobinados (a) helicoidales, (b) polares o (c) de aro.

Curado Aunque el curado a menudo ocurre al aire, se emplean varias técnicas para lograr mayor calidad.

1. En el *moldeo con bolsa al vacío*, primero se aplican varias capas arriba del compuesto. Entre éstas, la *película de liberación* es no adherente (tela), porosa y se retira al final del proceso; el *purgador* (fieltro de poliéster, fibra de vidrio o algodón) absorbe el exceso de resina; la *barrera* (una capa porosa) evita que la resina bloquee las líneas de vacío. Después, el ensamble completo se cubre con una película plástica y después de sellar las orillas se succiona el vacío; de esta manera, el curado se hace bajo presión atmosférica, se reducen los vacíos y la superficie libre es más lisa.

2. Es posible obtener presiones mayores en el *moldeo con bolsa a presión*, en el cual se aplica presión a la superficie libre con una bolsa de caucho hecha a la medida.

3. Las mejores propiedades se obtienen con el *moldeo en autoclave*. Éste es un recipiente a presión, calentado, grande (hasta de 30 m de diámetro por 50 m de longitud) con circulación de gas. Debido al peligro de explosión, se prefiere el nitrógeno en vez del aire. Igual que el moldeo con bolsa al vacío, el laminado compuesto se cubre con capas diseñadas para absorber el exceso de resina y para permitir el escape de subproductos volátiles. Para mejor control del espesor y de la definición de la superficie libre, se pueden colocar placas de metal arriba del ensamble. La pieza, completa con el molde, después se *embolsa* de manera que los gases atrapados se puedan remover mediante el vacío. El curado ocurre bajo presión y a temperaturas elevadas (por ejemplo, 600 kPa y 175°C para el epóxico).

15-4-2 Pultrusión

Las fibras se impregnan con un prepolímero, se posicionan con exactitud mediante guías, se precalientan y se jalan a través de una matriz ahusada y calentada, donde tiene lugar el curado. El producto emergente se enfría y se jala por medio de abrazaderas oscilantes o de una oruga (Fig. 15-8); los productos de diámetro pequeño se enrollan. Se fabrican formas bidimensionales, incluyendo varillas sólidas, perfiles o tubos huecos, similares a los que se producen por extrusión, de ahí el nombre de *pultrusión*. La rapidez de producción es de alrededor de 1 m/min. Las aplicaciones son en artículos deportivos (mangos de palos de golf), flechas de transmisión para vehículos (debido a la alta capacidad de amortiguamiento), peldaños de escalera no conductores para servicio eléctrico y miembros estructurales para aplicaciones en vehículos y aeronaves.

15-4-3 Moldeo en matrices acopladas

Para una alta rapidez de producción, tolerancias estrechas y mejor acabado superficial, la pieza se fabrica entre dos *matrices* calientes *acopladas*.

1. La resina y el refuerzo se colocan en la matriz inferior, que se cierra en el denominado *moldeo húmedo*.

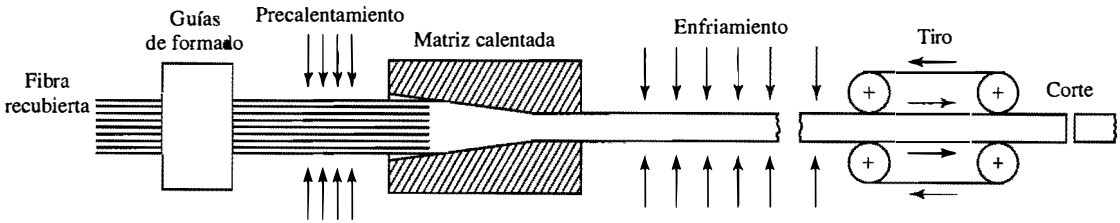


Figura 15-8 Las formas bidimensionales reforzadas con fibra continua se fabrican mediante pultrusión.

2. Los BMC se moldean esencialmente mediante el moldeo por compresión, aunque cada vez más se practica el moldeo por transferencia y por inyección, y el RIM. Si la direccionalidad resultante de la inyección es inaceptable, se usa vidrio en hojuela para el refuerzo. Varios automóviles y camionetas ("minivans") producidos en masa tienen lienzos hechos de plástico —incluyendo tableros laterales, puertas traseras, capotas, etcétera— sujetas a un marco espacial flexible de acero soldado, con maquinado de precisión.

Ejemplo 15-3

A las personas con movilidad limitada se les ayuda a caminar con aparatos ortopédicos en las piernas que tienen una placa para el pie y miembros verticales largos y delgados. Comúnmente se fabrican de aleaciones de aluminio y acero. Un nylon reforzado con fibra de carbono se eligió para fabricar los aparatos ortopédicos, ya que así son dos tercios más ligeras, pero 40% más rígidas y el doble de resistentes. Una ventaja significativa es que el termoplástico permite el formado posterior de los aparatos ortopédicos para el ajuste a la medida. Se entreteje fibra de carbono larga con nylon, con fibra de carbono en la trama (la dirección de la longitud) y con fibra de nylon en dirección de la urdimbre (relleno). La fibra completamente continua se rompería durante el formado posterior, por lo tanto, la tela entretejida se cortó en piezas de 60 mm de longitud y 25 mm de ancho, que se colocaron extremo con extremo en capas sobrepuestas. Después, los aparatos se formaron a través del moldeo por compresión a 250°C y 20 MPa. [*Fuente*: *Adv. Mater. Proc.*, 1993 (3): 47-47.]

3. Las láminas de SMC, cortadas a la medida, se forman por medio de técnicas similares al prensado de metales, excepto que la deformación se ve afectada por la geometría del refuerzo, y las presiones son bajas (7 a 10 MPa). El tiempo del ciclo es de 2 a 8 min y se mantienen varios moldes en circulación para una rapidez razonable de producción. La pieza se retira del molde y el curado final ocurre fuera de la prensa, con frecuencia en aditamentos diseñados para evitar la distorsión. Las partes estructurales normalmente necesitan refuerzo continuo y se debe evitar el estiramiento, que provocaría el rompimiento de las fibras.

4. Los métodos de tapón de caucho (Fig. 10-32) e hidroformado (Fig. 10-33*a*) reducen el costo de la matriz y permiten formas más complejas, ya que parte del esfuer-

zo de formado se transfiere al caucho. Es posible fabricar secciones largas y formas similares por medio del formado con rodillos (Fig. 10-16*c*).

5. En una variante de RIM, una forma de fibra se precoloca en el molde (*RIM estructural* o SRIM, se pronuncia esrim). El *moldeo por transferencia de resina* (RTM) difiere en que la resina ya reaccionada se inyecta en el molde, en el cual se colocó una forma de fibra. Ambos procesos permiten gran complejidad y una rapidez de producción razonables; de ahí el interés de la industria automotriz. La penetración de la forma de fibra y la humectación de las fibras son críticas; por lo tanto, se han desarrollado resinas especiales de baja viscosidad. Como la terminación de la pieza tiene lugar en el molde, se pueden lograr buena calidad superficial y aceptables tolerancias dimensionales.

15-4-4 Capacidades del proceso y aspectos del diseño

En las secciones que tratan de procesos diversos se vio que el intervalo de tamaño y la variedad de las formas son muy amplios. Los avances rápidos en el modelado por computadora han hecho posible el diseño de piezas para aplicaciones de soporte de carga. Los radios generosos son esenciales, especialmente con refuerzo de fibra larga. El acabado superficial es tan bueno como la superficie del molde. Las tolerancias son, por lo general, inferiores a las de los productos de metal, pero la consolidación de piezas puede hacer a los compuestos competitivos, especialmente si se usa el moldeo en matrices acopladas. En todos los casos, la alta contracción de los plásticos en relación con las fibras de refuerzo (tabla 4-1) puede establecer esfuerzos internos en la parte, lo cual luego conduce a la distorsión. Los ángulos se cierran; así, un ángulo de 90° se convierte en uno de 87 a 89° ("recuperación negativa" o "recuperación hacia adentro"). Para compensar esto, el molde se puede fabricar con un ángulo mayor. La contracción diferencial en el molde es otra fuente de distorsión. La manera más conveniente es usar un molde con el mismo coeficiente de dilatación térmica. Los compuestos de fibra de carbono a menudo tienen nula contracción; así, el molde se fabrica de un compuesto de fibra de carbono, o para corridas de producción mayores, de Invar (tabla 4-1).

Los costos del capital son muy variables. La inversión es muy poca para la aplicación manual y muy alta para el bobinado de ejes múltiples controlado por computadora. Las autoclaves también son instalaciones costosas que necesitan un monitoreo y precauciones continuos. Las matrices acopladas para moldeo son menos costosas que las de trabajo de metal y las prensas tienen una capacidad nominal menor.

La mayor parte de las ventajas del refuerzo de fibra se pierden cuando el enlace entre la matriz y la fibra es débil. Las fibras se desgajan y la delaminación puede ocurrir a esfuerzos bajos. Así, el control estricto del proceso es un prerrequisito esencial. El modelado de infiltración asistido por computadora ayuda a anticipar problemas y encontrar soluciones. Las técnicas NDT (principalmente, rastreo ultrasónico) se emplean para detectar defectos como la orientación impropia de la fibra, la falta de enlace, la delaminación, las regiones ricas en resina (más débiles) y las subalimentadas en resina (no aglutinadas). El procesamiento de las señales NDT mediante imágenes y análisis por computadora permiten la inspección en 100% de las partes grandes y críticas, como

el recubrimiento del ala reforzada con carbono del avión Harrier II. Los defectos son difíciles o imposibles de reparar en los termofijos, por lo que las partes deben rechazarse en el punto donde ya se hizo la mayoría de los gastos; por lo tanto, se realizan esfuerzos para desarrollar técnicas de medición en el proceso, con el fin de revelar problemas en la deposición y el curado. En las aplicaciones aeroespaciales, el costo de garantizar la calidad puede igualar al de la producción.

15-5 COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA

La terminología es, nuevamente, difusa. En este capítulo se redujo la definición de los compuestos a estructuras que se ven afectadas por las propiedades volumétricas. De acuerdo con esta definición, muchos productos de la metalurgia de polvos son compuestos: el hierro infiltrado con cobre se clasifica como un compuesto metal-metal; los cermets (incluyendo los carburos cementados) son cerámicos aglutinados con metal, y los cojinetes de metal infiltrados con PTFE o nylon son metal-polímero. Sin embargo, usualmente a ninguno de ellos se les considera compuestos; el término *compuesto de matriz metálica* (MMC) se reserva para combinaciones más recientes, en las cuales el material embebido es una fibra o un polvo cerámico. La mayor parte de las veces, se incorpora para obtener una mejor resistencia, pero también es útil para otros propósitos.

La matriz suele ser un metal de baja densidad, principalmente aluminio o magnesio, y con menor frecuencia, de titanio. El reforzamiento más común es SiC, Al_2O_3 o carbono, y se incorpora por medio de una de varias técnicas. Los polvos de cerámica y de metal se pueden mezclar y procesar de manera directa mediante técnicas de metalurgia de polvos (Cap. 11). Por ejemplo, los compuestos de TiC en una matriz de Ti-6Al-4V se producen por prensado isostático en frío, seguido de sinterizado y HIP. Alternativamente, el compuesto se fabrica en forma de hojuelas obtenidas a través de la tecnología de solidificación rápida, en particular mediante hilado de fusión (Secc. 11-2-3) y luego se consolida. Algunos compuestos se procesan al fundirlos en lingotes (Secc. 7-5-2), los cuales se trabajan como metal (Cap. 9).

Muchas de sus aplicaciones son en el fundido de formas, en el que el compuesto fundido se vacía de manera directa en la forma final. El refuerzo particulado se empuja delante del crecimiento de dendritas, por lo que el control de la solidificación es importante para la distribución adecuada de los gránulos. Otra opción es que una preforma de fibra se coloque en el molde y se infiltre con metal. En algunas aplicaciones, la penetración se hace mediante la presión o el vacío, como en la fundición a presión de émbolos; en otros casos, la infiltración es instantánea, como en la fundición en molde permanente. La humectación de las fibras es crucial y se asegura por medio de varios tratamientos patentados. Al grafito no lo humedecen los metales, por lo tanto, la fibra primero se recubre con un metal, carburo metálico, o una capa de SiO_2; luego, la preforma se infiltra fácilmente por el metal fundido. En algunas aplicaciones, como en la fundición de émbolos, los beneficios principales de los compuestos son: una elevada resistencia a la alta temperatura y una dilatación térmica reducida.

Ejemplo 15-4

Una aleación Al 356 (7Si-0.3Mg-0.35Zn-0.25Ti), reforzada con partículas de SiC, se puede fundir en cáscara por medio de técnicas convencionales. En la condición de tratamiento técnico completo (T6) dio los resultados siguientes:

	YS, MPa	TS, MPa	el., %	*E*, GPa	Dilatación térmica, μm/m
356	200	255	4	75	21.4
20% SiC	296	317	0.5	96	16.4

La baja dilatación térmica es benéfica para aplicaciones a altas temperaturas, así como para sustratos y soportes de componentes electrónicos; así se pueden obtener beneficios con poco desembolso. [Datos de D.O. Kennedy, *Adv. Mater. Proc.*, 1991 (6): 42-46.]

Una clase especial de MMC son los *compuestos in situ*. Ya nos hemos encontrado con varios ejemplos, como los eutécticos, las aleaciones supersaturadas solidificadas rápidamente y la aleación hipereutéctica Al-Si, en las que los cristales primarios de silicio se embeben en una matriz eutéctica. De forma más general, el término se aplica a todos los materiales de fases múltiples en donde *la fase de refuerzo se sintetiza dentro de la matriz durante la fabricación del compuesto*. Esos compuestos se pueden producir, por ejemplo, por medio de reacciones exotérmicas (de ahí el término XD = *dispersión exotérmica*); la segunda fase formada de esta manera es muy estable a temperaturas elevadas. Un ejemplo importante es la dispersión de TiB_2 en una matriz intermetálica de aluminato de titanio (Ti_3Al y TiAl). El metal tiene propiedades favorables a alta temperatura en sólo la mitad de la densidad de las superaleaciones que puede reemplazar.

Los alambres superconductores tienen numerosos filamentos continuos del material superconductor embebidos en una matriz de metal (Fig. 15-9). Su manufactura representa varios retos técnicos.

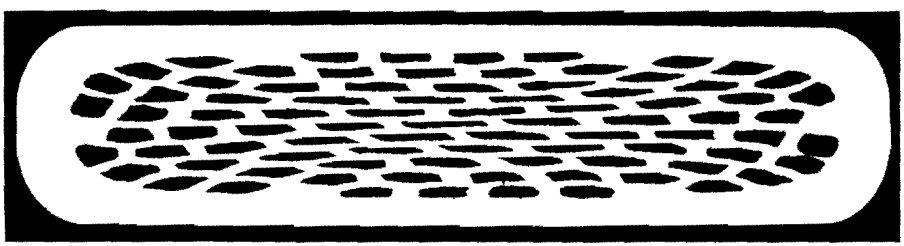


Figura 15-9 Un óxido de PbBiSrCaCu está contenido en tubos de plata para formar un filamento que, al combinarse en un alambre de filamentos múltiples y enfriarse por debajo de su temperatura crítica, conduce cien veces más corriente que un alambre de cobre de la mismo sección transversal, lo cual realiza sin pérdidas resistivas. (*Cortesía de la American Superconductor, Westborough, Massachussetts.*)

Ejemplo 15-5

Los superconductores de baja temperatura funcionan en helio líquido a 4.2 K. El material de superconducción es una aleación dúctil Nb-Ti o una intermetálica frágil Nb_3Sn en una matriz de cobre. Se insertan varillas redondas del material superconductor en tubos de cobre con una superficie exterior hexagonal, que luego se ensamblan dentro de un tubo grande para formar palanquillas de extrusión con un diámetro usual de 305 mm. La extrusión en caliente produce una barra de 85 mm de diámetro, que se estira en frío a través de docenas de estirados, hasta un diámetro de 0.68 mm. En ese momento, el diámetro de cada filamento superconductor se reduce a 10 μm. Luego, varios de estos alambres se pueden combinar y deformar aún más para obtener alambre con miles de filamentos de 1 μm, que se usan posteriormente para productos como imanes de unidades de MRI (imagen de resonancia magnética). (*Fuente*: B.A. Zeitlin, *ASM Handbook*, vol. 14, pp. 338-342.)

Ejemplo 15-6

En la sección 4-9-3 se vio que los cerámicos pueden ser superconductores a temperatura elevada. Para aplicaciones prácticas, se necesitan alambres largos o cintas con ductilidad suficiente para permitir el bobinado en núcleos. En la técnica óxido-polvo en tubo (OPIT), un óxido calcinado se coloca en un tubo de metal conductor (por lo general Ag), el cual luego se reduce por medio de procesos como suajado, estirado o, para cintas, laminado. Después, una multitud de esos alambres compuestos de metal-cerámico se unen en un alambre conductor. Se necesita un alto grado de alineación cristalográfica del óxido para tener superconductividad a densidades altas de corriente, y esto se obtiene mediante una secuencia termomecánica de procesamiento con tratamientos térmicos intermedios o finales. Una aplicación prometedora es en unidades SMES (almacenamiento de energía magnética por superconducción), en que la corriente que fluye en una bobina superconductora (a baja temperatura) genera un campo magnético intenso para almacenar electricidad, con pérdidas muy bajas. Conectada a una fuente de potencia, la SMES libera su energía en algunos milisegundos, suficientes para mantener el voltaje durante apagones momentáneos que podrían causar disrupciones masivas en las industrias de procesos químicos. La eficiencia de estas unidades se ha incrementado con líneas de corriente OPIT, que reducen las pérdidas por calor. (*Fuente*: A.P. Molozemoff *et al.*, *Applied Superconductivity Conference*, Palm Desert, California, 1998.)

15-6 COMPUESTOS DE MATRIZ CERÁMICA

En los compuestos de matriz polimérica el refuerzo siempre es más resistente y de un módulo elástico mucho mayor que la matriz; de ahí que se pueda elevar significativamente la resistencia al transferir esfuerzos de la matriz a la fibra a través de una interfase fuerte. Esto también es cierto para los compuestos de matriz metálica, al menos si el metal tiene un módulo elástico bajo, como en el caso del Al, el Mg e incluso el Ti. Los cerámicos (excepto los vidrios) tienen módulos elásticos altos, cercano al de las fibras de refuerzo potenciales. En consecuencia, el propósito de los *compuestos de matriz cerámica* (CMC) generalmente es incrementar la tenacidad.

Un cerámico monolítico falla de un modo frágil y catastrófico (Fig. 15-10). Los refuerzos tienen poco efecto en el módulo (incluso pueden reducirlo) y la falla en la matriz se puede originar antes. La diferencia es que la falla no es catastrófica y se retarda por medio de varios mecanismos:

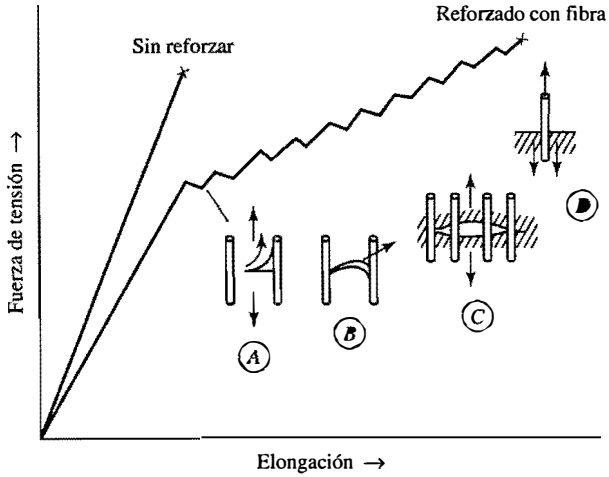


Figura 15-10 El incremento de la tenacidad en los cerámicos reforzados con fibra se obtiene por (*A*) desvío de grietas, (*B*) arqueo de grietas, (*C*) puenteo de fibras y (*D*) arranque de fibras.

Microgrietas. En la sección 12-2-1 se vio que las microgrietas retardan a las grietas grandes. Las microgrietas se originan por un ligero *desacoplamiento* en el coeficiente de dilatación térmica (un desacoplamiento grande causaría el rompimiento de las fibras).

Desvío de las grietas. Una grieta que se encuentra con el refuerzo se desvía a lo largo de la interfase donde la energía se utiliza para efectuar la separación (Fig. 15-10, *A*).

Barrera para propagación de las grietas. El refuerzo puede obligar al frente de la grieta a arquearse y así se incrementa el esfuerzo necesario para la propagación (Fig. 15-10, *B*; el efecto es similar al de los obstáculos para la propagación de la dislocación, Secc. 6-3).

Puente de fibra. Si la geometría es favorable, las fibras soportan la carga a través de una grieta, poniéndola en compresión (Fig. 15-10, *C*).

Desgajamiento de fibra. Prioritariamente, la energía se gasta en arrancar una fibra de la matriz (Fig. 15-10, *D*). Por esta razón, la *resistencia del enlace interfacial* (concentración) *no debe ser tan alta como para que la fibra se rompa en vez de salir.*

Aun este breve repaso de los mecanismos de refuerzo hace evidente que el procesamiento de los CMC presenta muchos retos. El material de refuerzo suele ser un óxido (principalmente Al_2O_3), un carburo (sobre todo SiC) o un nitruro (por ejemplo, Si_3N_4). Los diámetros típicos de la fibra son de 3 a 30 μm; también se utilizan microfibras. La

resistencia de enlace a la matriz se controla (comúnmente se degrada) mediante recubrimientos, como carbono para temperaturas por debajo de 400°C, y nitruro de boro para temperaturas mayores.

Los compuestos de fibra corta se consolidan mediante técnicas típicas del procesamiento de cerámicos, en particular HIP. Las fibras largas se pueden recubrir con una pasta de la matriz mezclada con un aglutinante orgánico; después de la consolidación en la forma deseada, éste se quema y ocurre la consolidación final por HIP. Alternativamente, la estructura de la fibra se infiltra con cerámico fundido, o el cerámico se forma por reacciones de materiales iniciales. La generalidad de estos procesos son demasiado específicos y costosos, justificables principalmente para aplicaciones aeroespaciales de alto valor.

Compuestos de matriz vítrea Se basan en gránulos (por lo general, Al_2O_3), o fibras (primordialmente, SiC) dispersas en el vidrio.

Ejemplo 15-7

Un vidrio álcali-borosilicato reforzado con fibra de SiC tiene resistencia, tenacidad y resistencia al impacto térmico muy elevadas. Por lo tanto, se puede usar para soportar partes de vidrio caliente en la producción de vajillas de vidrio.

	E, GPa	Resistencia a la flexión, MPa	Trabajo de fractura, J/m²	Resistencia al impacto térmico, °C
Vidrio	63	30-50	120	> 100
40% SiC	110	450	35 000	> 530

[*Fuente*: W. Beier y S. Markman, *Adv. Mater. Proc.*, 1997 (12): 37-40.]

Compuestos carbono-carbono (CCC) Los CCC tienen baja densidad (1.9 g/cm³), combinada con alta capacidad calorífica y resistencia al impacto térmico. Se desarrollaron para aplicaciones donde se genera repentinamente calor elevado, como en las narices de los cohetes y en los frenos de aeronaves y automóviles de carreras. Para estos últimos, el alto coeficiente de fricción también es benéfico. La matriz es carbono formado por la pirólisis de una resina termofija o de alquitrán, a menudo con presión, o infiltrando la preforma de fibra con un gas carbonoso (*infiltración química de vapor*). Como el carbono se oxida rápidamente en el aire por arriba de los 400°C, se deben aplicar recubrimientos superficiales a la pieza terminada.

15-7 RESUMEN

Las estructuras compuestas aumentan en gran medida el alcance de aplicación de todos los materiales de ingeniería al combinar las propiedades deseables de dos o más materia-

les. Las identidades de los materiales constituyentes se conservan, las de la interfase, se controlan, y las volumétricas del compuesto se ven afectadas. La fase embebida puede ser un granulado, o para propiedades orientadas controladas, una estructura fibrosa.

1. Los plásticos se benefician sobre todo del incremento de la resistencia, la rigidez, la tenacidad, así como de la resistencia a la termofluencia proporcionada por las fibras y otros rellenos de refuerzo; es factible fabricar componentes y ensambles con excepcionales razones resistencia-peso y rigidez-peso. Una temperatura mayor de operación también es permisible. La matriz es un termofijo o, cada vez más, un termoplástico. Los procesos de molde abierto son capaces de producir piezas grandes de forma compleja, mientras que el moldeo en matrices acopladas ofrece mejor control dimensional, rapidez de producción mayor, y puede ser competitivo con el formado de metales en volumen medio, y para ciertas piezas, incluso para producción en masa. Las reparaciones cosméticas son relativamente fáciles, pero las estructurales pueden ser costosas y no siempre confiables.
2. Los compuestos de matriz metálica suelen basarse en metales ligeros (Al, Mg y con menor frecuencia Ti), y los refuerzos son en su mayor parte cerámicos o carbono. Una combinación especial es un cerámico superconductor en una matriz metálica.
3. Los compuestos de matriz cerámica difieren en que el enlace interfacial se mantiene intencionalmente más débil para arrancar la fibra como el mecanismo principal de aumento de tenacidad. Los compuestos de carbono-carbono sirven para situaciones especiales donde se genera calor elevado a una rapidez alta.
4. El procesamiento de compuestos involucra aspectos de seguridad y riesgos para la salud característicos de las industrias de plásticos, metales y cerámicos, por lo que se deben tomar medidas apropiadas para la protección del trabajador y del ambiente.

PROBLEMAS 15A

15A-1 Enumere por lo menos tres clases de fibras que se puedan usar para compuestos de matriz polimérica.

15A-2 Defina qué significa longitud crítica de la fibra.

15A-3 Dibuje un diagrama que indique el módulo de elasticidad de un compuesto unidireccional reforzado con fibra continua, como función de la fracción de fibra. Dibuje líneas para (*a*) carga longitudinal y (*b*) carga transversal. (*c*) Agregue una línea para fibra cortada aleatoriamente de longitud crítica.

15A-4 Defina recubrimiento de gel.

15A-5 Explique qué es pultrusión.

15A-6 Defina los términos (*a*) compuesto preimpregnado (prepreg), (*b*) compuesto de moldeo volumétrico y (*c*) compuesto de moldeo en hoja.

15A-7 Sugiera tres formas de fabricar el casco de un bote sencillo, utilizando plástico reforzado con fibra de vidrio.

15A-8 Describa los pasos esenciales en la aplicación manual de un plástico reforzado con fibra de vidrio cortada (también indique, genéricamente, el polímero que se usará).

15A-9 (*a*) ¿Qué es una autoclave y (*b*) para qué se usa?

15A-10 Defina (*a*) RIM estructural y (*b*) RTM.

15A-11 Determine qué son (*a*) geometría, (*b*) estructura y (*c*) materiales posibles de las microfibras ("whiskers").

15A-12 ¿Es benéfica la resistencia más alta posible de enlace fibra-matriz para compuestos de (*a*) matriz polimérica, (*b*) matriz metálica y (*c*) matriz cerámica? Justifique sus respuestas.

15A-13 Explique la diferencia entre un compuesto y un producto revestido, con base en las definiciones adoptadas en este libro.

PROBLEMAS 15B

15B-1 Retome el problema 15A-3 y agregue una línea para un compuesto de tela tejida a 90°, cargado (*a*) en dirección de la fibra y (*b*) a 45° de ella. (*c*) Explique su respuesta para el inciso (*b*) mostrando la deformación de la tela bajo carga.

15B-2 Para explicar la diferencia entre un plástico relleno y un compuesto basado en polímero, formule una definición para cada uno.

15B-3 Al producir un componente particular, se puede emplear ya sea un compuesto preimpregnado termoplástico o uno termofijo. El cliente necesita una entrega rápida del producto terminado pero no puede decir cuándo. ¿Cuál compuesto elegiría y por qué?

15B-4 Las fibras de refuerzo generalmente se fabrican de metal, vidrio o polímero. La mayoría de ellas se estiran o alargan (atenúan) para reducir su diámetro. (*a*) Nombre el proceso e indique el rango de temperatura usual para estirar cada una de las tres clases de materiales. Indique la fuente estructural del refuerzo, si existe alguno, al estirar fibras de (*b*) metal, (*c*) vidrio o (*d*) polímero.

15B-5 Un tanque cilíndrico de 1 000 litros sometido a presión interna se fabrica de un polímero reforzado con fibra. El diseñador hizo los extremos planos. Considere el método para fabricar el tanque y sugiera cambios en el diseño, si es necesario. Clarifique con bocetos.

15B-6 Un polímero se refuerza con vidrio (de 20 y 50%) en forma de: (*a*) polvo, (*b*) hojuelas, (*c*) fibras cortas orientadas aleatoriamente, de proporción dimensional 10:1, (*d*) fibras cortadas orientadas unidireccionalmente de proporción dimensional 100:1 y (*e*) fibras continuas unidireccionales. Dibuje gráficas para mostrar su juicio cualitativo en el incremento de la resistencia de cendencia que se debe esperar respecto a la matriz para cada compuesto en dirección (*f*) longitudinal y (*g*) transversal. Justifique su respuesta.

15B-7 Un compuesto unidireccional reforzado con fibra continua se carga en dirección de la fibra. Comparada con la fibra, la matriz es muy débil. Un compañero alega que, debido a esto, la resistencia de enlace entre la fibra y la matriz es inmaterial. ¿Está de acuerdo? Si no, justifique su punto de vista.

15B-8 Se va a fabricar un esquí con un núcleo de polímero reforzado con fibra de vidrio. Partiendo de consideraciones básicas de ingeniería, ¿elegiría capas de material cruzadas (*a*) longitudinales, (*b*) transversales, (*c*) al azar, (*d*) longitudinales/transversales o (*e*) a 45°? (*Sugerencia*: es deseable que el esquí resista la torcedura, al tiempo que permita la flexión longitudinal.)

15B-9 El tratamiento superficial de las fibras de carbono es un paso importante al crear compuestos con ellas. Explique el propósito primario para (*a*) compuestos de matriz metálica y (*b*) de matriz de carbono.

PROBLEMAS 15C

15C-1 En el ejemplo 15-4 se vio que 20% de partículas de SiC mejoran las propiedades de la aleación fundida 356 Al. Calcule el mejoramiento esperado en (*a*) la dilatación térmica (considere 4×10^{-6}/K para el SiC) y (*b*) en el módulo elástico. (*c*) Compare con la información documentada y comente su acuerdo o desacuerdo.

15C-2 Algunos insertos para herramientas de corte se fabrican con alúmina reforzada con SiC. Usando la información de este libro y considerando el modo de carga en el corte de metal, determine si el principal incentivo es la

resistencia mejorada o el módulo elástico incrementado. Si no es ninguno, sugiera una razón para fabricar esos insertos.

15C-3 Verifique los datos del ejemplo 15-7 para establecer si el incremento en el módulo elástico obedece la ecuación (15-5) o a la (15-6).

15C-4 Demuestre la ecuación (15-4) para la longitud crítica de la fibra. (¡Recuerde que la fibra se jala desde dos direcciones!)

15C-5 Un compuesto de matriz de epoxi se va a fabricar con fibra de vidrio E de 10 μm de diámetro. Calcule la longitud crítica si $\tau_i = 30$ MPa.

15C-6 Un compuesto de matriz poliimida se refuerza unidireccionalmente con 30% de fibra de carbono de módulo alto. ¿Qué módulo elástico se debe esperar en dirección de la fibra y transversal a ella?

15C-7 Calcule y grafique el cambio en los módulos elásticos longitudinal y transversal para 20 a 80% de fibra continua unidireccional, si la razón del módulo elástico fibra/matriz es 100:1.

15C-8 Repita el problema 15C-7 para una razón del módulo elástico fibra/matriz de 100:20. A partir de la comparación entre ambos problemas, saque sus conclusiones acerca de la importancia del módulo de la matriz.

15C-9 Un molde de aluminio se emplea para fabricar una charola de 500 mm de longitud y 300 mm de ancho, de un compuesto de resina epóxica reforzada con fibra de carbono. El refuerzo es unidireccional en la longitud de la charola. El coeficiente de dilatación térmica del compuesto es cercano a cero en dirección de la fibra, y 19×10^{-6}/K en dirección transversal. En la autoclave, el epóxico solidifica (alcanza temperatura de gel) a 120°C. Calcule la longitud y el ancho del molde, si la temperatura ambiente es de 20°C.

LECTURAS ADICIONALES

ASM Engineered Materials Handbook, vol. 1, *Composites*, ASM International, 1987.

Belitskus, D.L.: *Fiber and Whisker Reinforced Ceramics for Structural Applications*, Dekker, 1993.

Buchanan, R.C.: *Ceramic Materials for Electronics*, 2a. ed., Dekker, 1991.

Chawla, K.K.: *Composite Materials*, 2a. ed., Springer, 1998.

Clyne, T.W. y P.G. Withers: *An Introduction to Metal Matrix Composites*, Cambridge University Press, 1993.

Gutowski, T.G. (ed.): *Advanced Composites Manufacturing*, Wiley, 1997.

Hollaway, L.: *Handbook of Polymer Composites for Engineers*, Woodhead, Cambridge, 1994.

Jang, B.Z.: *Advanced Polymer Composites: Principles and Applications,* ASM International, 1994.

Mallick, P.K. (ed.): *Composites Engineering Handbook*, Dekker, 1997.

Mallick, P.K.: *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*, 2a. ed., Dekker, 1993.

Patter, K.: *An Introduction Composite Products: Design, Development and Manufacture,* Chapman and Hall, 1997.

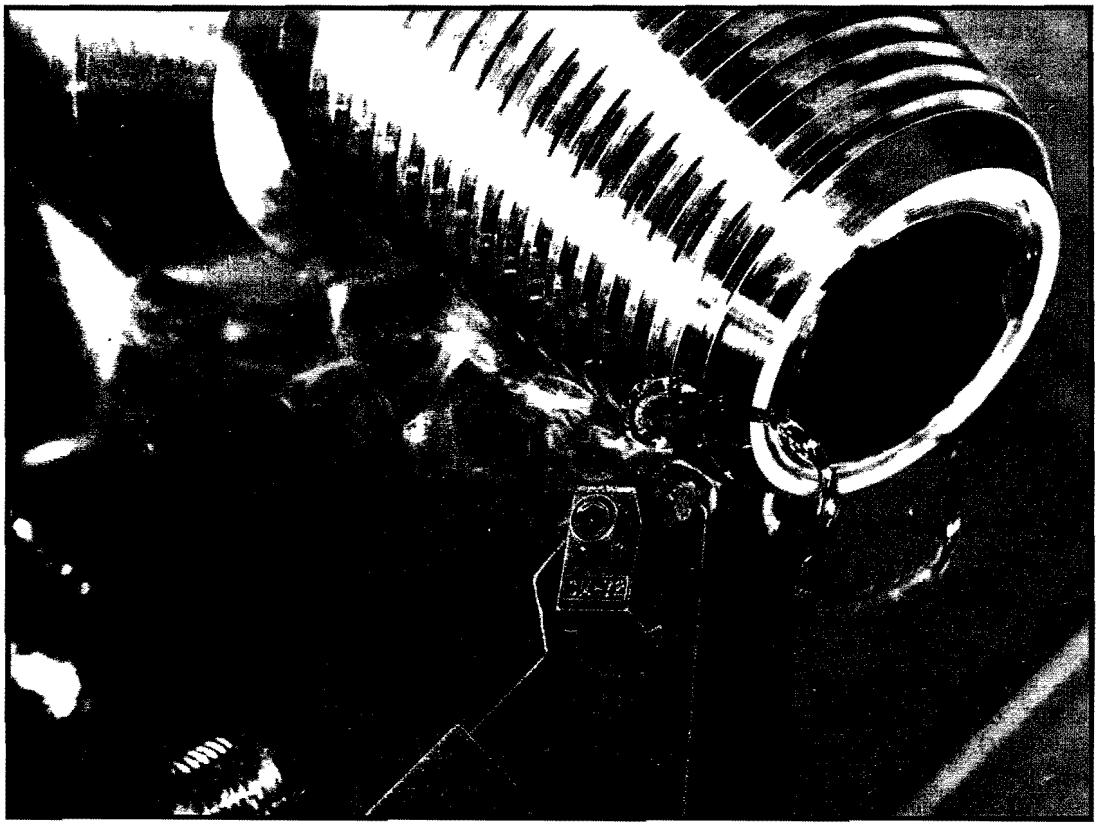
Schwartz, M.M.: *Composite Materials Handbook*, McGraw-Hill, 1992.

Schwartz, M.M.: *Handbook of Composite Ceramics*, McGraw-Hill, 1992.

Schwartz, M.M.: *Joining of Composite Matrix Materials*, ASM International, 1994.

Strong, A.B.: *Fundamentals of Composites Manufacturing*, Society of Manufacturing Engineers, 1989.

Woishnis, W.A.: *Engineering Plastics and Composites*, 2a. ed., ASM International, 1993.



Los procesos de maquinado crean una forma al retirar material; la viruta producida representa una pérdida, pero se pueden fabricar formas complejas con tolerancias estrechas y excelente acabado superficial. (*Cortesía Kennametal, Latrobe, Pennsylvania.*)

capítulo

16

Maquinado

Ahora cambiaremos muestro enfoque y, en vez de formar o consolidar material, nos enfocaremos a la creación de formas removiendo material en forma de virutas. Para ello, examinaremos:

El proceso idealizado de la formación de viruta en metales

La formación de viruta en materiales reales

Los factores que afectan la calidad de la pieza maquinada

Las herramientas de corte y los avances en materiales para herramientas

Los métodos por medio de los cuales se pone en uso el proceso básico de la formación de viruta

La optimización de las condiciones del proceso

El maquinado con procesos abrasivos

El diseño de piezas para maquinado

En los procesos que se han analizado hasta este punto, la forma de la pieza de trabajo se obtuvo por la solidificación, deformación plástica o consolidación del material. La cantidad de material perdido en desecho fue relativamente pequeña, y las partículas de desecho tendían a ser suficientemente grandes y a separarse fácilmente según el tipo de aleación, permitiendo el reciclado sencillo y económico. En contraste, el maquinado tiene como objetivo generar la forma de la pieza de trabajo partiendo de un cuerpo sólido, o mejorar las tolerancias y el acabado superficial de una pieza de trabajo previamente formada, al retirar el material en exceso en forma de virutas. El maquinado es capaz de crear configuraciones geométricas, tolerancias y acabados superficiales a menudo no obtenibles por cualquier otra técnica. Sin embargo, el maquinado elimina material por el cual ya se ha pagado, en forma de partículas relativamente pequeñas que son más difíciles de reciclar y que fácilmente se pueden mezclar. Por lo tanto, con frecuencia los avances tienen como objetivo reducir o, si es posible, eliminar el maquinado, especialmente en la producción en masa. Por estas razones, el maquinado ha perdido algunos mercados importantes aunque, al mismo tiempo, también se ha desarrollado y crecido y, especialmente con la aplicación del control numérico por computadora, ha capturado nuevos mercados. Con el incremento en las tasas de remoción de metal, algunas veces resulta más económico desbastar una pieza, partiendo de una pieza sin terminar sólida extruida o laminada, en vez de maquinar una forja o una fundición, especialmente para un volumen de producción de bajo a medio.

Si es absolutamente esencial, se puede encontrar un proceso de maquinado para cualquier material de ingeniería, incluso si sólo puede ser esmerilado o pulido. No obstante, la economía exige que una pieza de trabajo sea maquinable hasta un grado razonable. Antes que se pueda explorar el concepto de maquinabilidad, es necesario identificar un proceso básico, el del corte de metal. El *maquinado* es un término genérico, aplicado a toda la remoción de material, en tanto que el *corte de metal* se refiere a los procesos en que el exceso de metal (o aleación) se elimina por medio de una herramienta más dura, a través de un proceso de deformación plástica extensa o por fractura controlada. En el capítulo 17 se analiza que al menos algunos de los fenómenos que se observan en el corte de metal también son relevantes para el maquinado de otros materiales.

16-1 PROCESO DE CORTE DE METAL

La variedad de los procesos de corte de metal es muy amplia; sin embargo, es posible idealizar el proceso de la remoción de viruta.

16-1-1 Corte ortogonal ideal

Como su nombre lo indica, en el *corte ortogonal* el filo de corte de la herramienta es recto y perpendicular a la dirección del movimiento (Fig. 16-1*a*). En el caso más sencillo, la pieza de trabajo es rectangular y de un ancho w suficientemente grande para que los cambios en él sean despreciables (deformación plana). El corte se realiza con una herramienta inclinada con un *ángulo de ataque* α, medido desde la normal a la superficie que se va a maquinar. Para evitar la fricción excesiva en la superficie maquinada, la herramienta se alivia en la parte posterior o *flanco* mediante el *ángulo de alivio* θ.

En principio, no hay diferencia si la herramienta o la pieza de trabajo se mueven. Se puede visualizar una pieza de trabajo estacionaria, con la herramienta moviéndose a una *velocidad de corte* v. La herramienta se fija para mover una capa de espesor h. Para evitar confusión, a ésta *no* se le llama profundidad de corte, sino *espesor de la viruta sin deformar* h. En el caso más sencillo, la deformación ocurre con un cortante intenso sobre el *plano de corte*, inclinado por el *ángulo de corte* ϕ. La viruta formada de esta manera tiene un espesor h_c. El ángulo de corte ϕ determina la *razón de corte* r_c

$$r_c = \frac{h}{h_c} = \frac{l_c}{l} \tag{16-1}$$

donde l es la longitud de corte y l_c la longitud de la viruta. Frecuentemente se asigna el valor recíproco de r_c, llamado *factor de compresión de la viruta*. Ambos se pueden obtener del espesor medido de la viruta o, si ésta está rasgada o desigual, de la longitud medida l_c o, si el ancho de la viruta ha cambiado, del peso de una de longitud medida.

En la práctica, la viruta siempre es más gruesa que el espesor de la viruta sin deformar y $r_c < 1$. Con la disminución del ángulo de ataque, ϕ, r_c también baja y es particularmente menor cuando se corta con una herramienta de ángulo negativo de ataque (Fig. 16-1*b*). El valor de r_c proporciona pistas valiosas respecto a la eficiencia del proceso. De la geometría del proceso, el ángulo de corte se define por

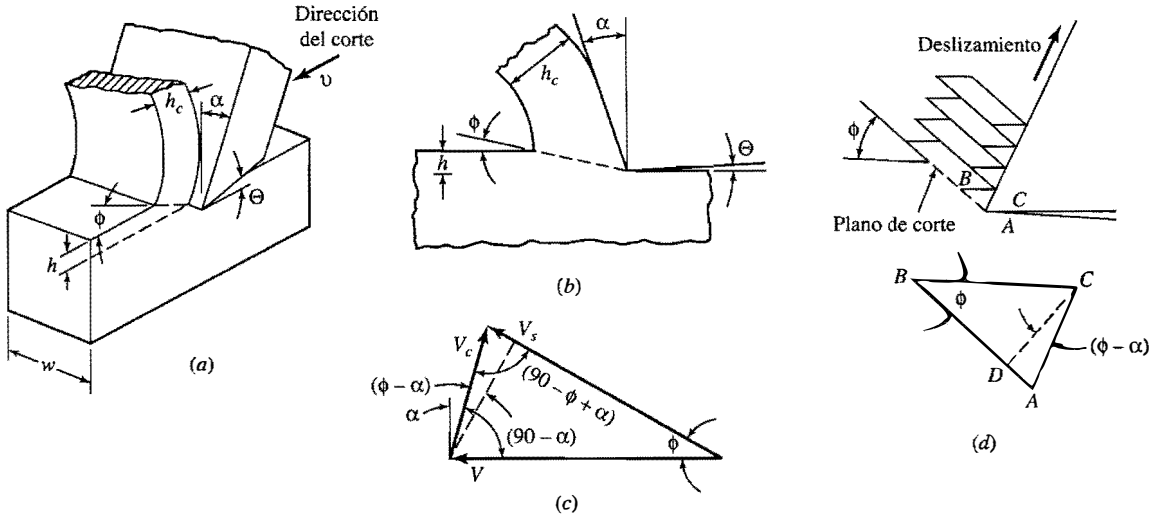


Figura 16-1 En el corte ortogonal, el filo de corte es perpendicular a la dirección del movimiento. El ángulo de ataque puede ser (*a*) positivo o (*b*) negativo. (*c*) Las velocidades se obtienen si, para una primera aproximación, (*d*) la formación de la viruta se visualiza como cortante simple.

$$\tan \phi = \frac{r_c \cos \alpha}{1 - r_c \operatorname{sen} \alpha} \tag{16-2}$$

Debido a la invariabilidad del volumen, la razón del espesor de la viruta también se puede expresar por medio de la velocidad de salida de la viruta v_c y de la velocidad de corte v (Fig. 16-1*c*)

$$r_c = \frac{v_c}{v} = \frac{\operatorname{sen} \phi}{\cos(\phi - \alpha)} \tag{16-3}$$

así, *aumentando el ángulo de corte ϕ, la viruta se vuelve más delgada y sale a una velocidad mayor.*

En el caso ideal, todo el corte se concentra en una zona de corte infinitamente delgada. La deformación unitaria por cortante γ es (Fig. 16-1*d*)

$$\gamma = \frac{AB}{CD} = \frac{AD}{CD} + \frac{DB}{CD} = \tan(\phi - \alpha) + \cot \phi \tag{16-4}$$

y, expresada como deformación natural, baja de 5 a 2 cuando ϕ se eleva de 10° a 35°.

Para un plano de corte infinitamente delgado, la tasa de deformación por cortante $\dot{\gamma}$ alcanzaría el infinito. En la realidad, el plano de corte tiene algún espesor finito Δy, típicamente 0.03 mm (0.001 pulg), y la rapidez de la deformación por cortante se puede calcular a partir de

$$\dot{\gamma} = \frac{v_s}{\Delta y} \quad \frac{\cos \alpha}{(\phi - \alpha)} \frac{v}{\Delta y} \tag{16-5}$$

Fácilmente puede alcanzar valores de miles por segundo.

La magnitud del ángulo de corte es de importancia fundamental. Para cualquier espesor dado de la viruta sin deformar, un ángulo pequeño significa un plano de corte largo y, por lo tanto, una fuerza y energía de corte altas; también, un ángulo pequeño resulta en una deformación por cortante elevada, de ahí que la viruta se endurezca en gran medida mediante la deformación.

Ejemplo 16-1

El acero AISI 4340, tratado térmicamente a HB 270, se tornea con herramientas de acero de alta velocidad (HSS) con un ángulo de ataque de $\alpha = 8°$. El espesor de la viruta sin deformar es de 0.3 mm, la profundidad de corte (ancho de la viruta) es de 1.5 mm, y la velocidad de corte es de 0.6 m/s. La viruta sale en forma helicoidal continua; una viruta de 1 m de longitud pesa 5.7 g; el ancho de la viruta permanece sin cambiar en 1.5 mm. Calcule la razón del espesor de la viruta.

Volumen de la viruta = peso/densidad = 5.7/7.9 = 0.72 cm^3. El espesor de la viruta $h_c = 0.72/(100)90(0.15) = 0.048$ cm = 0.48 mm. La razón del espesor de la viruta, de la ecuación (16-1), $r_c = 0.3/0.48 = 0.625$ (razón de compresión de la viruta = 1.6).

Ejemplo 16-2

En el curso del corte del acero del ejemplo 16-1, la viruta cambia al tipo recto. Una repetición de los cálculos demuestra que ahora r_c es 0.5. ¿Cuáles son el nuevo ángulo de corte y la velocidad de la viruta?

Los ángulos de corte son, de la ecuación (16-2): para $r_c = 0.625$,

$\tan \phi = 0.625(0.9903)/[1 - (0.625)(0.1392)] = 0.678$ y $\phi = 34°$; para $r_c = 0.5$, $\phi = 28°$.

La velocidad de la viruta cambió, de acuerdo con la ecuación (16-3), de $v_c = 0.625(0.6) = 0.375$ m/s a $v_c = 0.5(0.6) = 0.3$ m/s. Así, el cambio en la forma de la viruta fue acompañado por una disminución de la velocidad de la viruta.

16-1-2 Fuerzas en el corte

La magnitud del ángulo de corte ϕ depende de las magnitudes relativas de las fuerzas que actúan en la cara de la herramienta (Fig. 16-2). Se pueden establecer tres puntos de esta situación:

1. Con la ayuda de un dinamómetro (un dispositivo que contiene varias celdas de carga para descomponer las fuerzas que actúan en direcciones mutuamente perpendiculares) se miden *las fuerzas externas que actúan en el portaherramienta.* En el corte ortogonal hay dos fuerzas: una *fuerza de corte* P_c se ejerce en dirección del corte, paralela a la superficie de la pieza de trabajo; en tanto que una *fuerza de empuje* P_t, que actúa perpendicular a la superficie de la pieza de trabajo, es necesaria para mantener la herramienta en el corte. (En ángulos de ataque positivos, la fuerza de empuje es negativa, y la herramienta se jala hacia el material.)

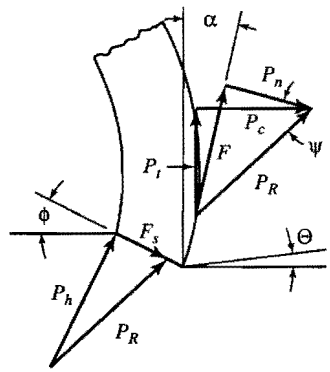


Figura 16-2 Las fuerzas que actúan sobre la viruta, la herramienta y el portaherramienta se pueden descomponer fácilmente.

2. Desde el punto de vista de las *fuerzas que actúan sobre la herramienta*, se considera que la *fuerza resultante* P_R está compuesta de la fuerza normal P_n, que se ejerce perpendicularmente a la cara de la herramienta, y la fuerza de fricción F, que actúa a lo largo de la cara. Sus magnitudes se pueden calcular a partir de las fuerzas medidas y del ángulo de ataque

$$P_n = P_c \cos \alpha - P_t \operatorname{sen} \alpha \qquad \textbf{(16-6a)}$$

$$F = P_c \operatorname{sen} \alpha + P_t \cos \alpha \qquad \textbf{(16-6b)}$$

Una forma simple de interpretar los resultados sería en términos de un modelo que postula el deslizamiento de la viruta a lo largo de la cara de ataque de la herramienta. Entonces, la magnitud de la fuerza de fricción F determinaría un *ángulo de fricción* ψ para el que

$$\tan \psi = \frac{F}{P_n} \quad (= \mu) \qquad \textbf{(16-7)}$$

Alternativamente, de las fuerzas medidas,

$$\tan \psi = \frac{P_t + P_c \tan \alpha}{P_c - P_t \tan \alpha} \qquad \textbf{(16-8)}$$

Sin embargo, esta presentación puede ser engañosa, porque con la disminución de la fricción, F a menudo disminuye menos rápidamente que P_n y μ en realidad puede incrementarse. Por lo tanto, llamamos μ al *coeficiente de fricción medio aparente.*

3. Desde el punto de vista de las *fuerzas que actúan sobre el material*, la fuerza resultante P_R se puede descomponer en una fuerza cortante F_s que actúa en el plano de

corte, y en una fuerza de compresión P_h que ejerce una presión hidrostática sobre el material cortado. En la sección 4-1-5 se vio que la presión hidrostática no afecta el esfuerzo de fluencia del material, sino que retrasa la fractura; así, en un material razonablemente dúctil, la viruta se forma de manera continua, aunque las deformaciones unitarias son altas. El equilibrio de ambas fuerzas depende del ángulo de corte ϕ. Claramente, con un ángulo de ataque ϕ progresivamente positivo, ϕ debe aumentar y la viruta adelgazarse. La fricción en la cara de ataque tiene el efecto opuesto: resiste el flujo libre de la viruta y reduce ϕ. Así, en contraste con la mayoría de los otros procesos de trabajo de metal, la geometría del proceso de corte no sólo depende de la geometría de la herramienta/pieza de trabajo, sino también del proceso mismo. Para encontrar una relación cuantitativa, se puede suponer que el material "elegirá" cortarse en un ángulo que minimice la energía requerida.[1] Esto conduce a

$$\phi = 45^\circ - \frac{1}{2}(\psi - \alpha) \tag{16-9a}$$

Otra aproximación con base en un análisis de límite superior[2] lleva a un resultado cualitativamente similar,

$$\phi = 45^\circ - (\psi - \alpha) \tag{16-9b}$$

Así, el ángulo de corte disminuye y la fuerza de corte (y con ella el trabajo de corte) se incrementa con el decremento del ángulo de ataque (en aproximadamente 1.5% por cada grado de cambio) y con el aumento del ángulo de fricción. Se puede concluir que condiciones favorables, en términos del consumo de energía, se aseguran empleando ángulos de ataque positivos grandes y minimizando la fricción a lo largo de la cara de la herramienta.

Ahora podemos regresar a la fuerza de empuje P_t. Es importante por varias razones. Primero, causa deflexión de la pieza de trabajo, y esto hace necesario el soporte de piezas grandes y esbeltas; si la pieza tiene paredes delgadas, el soporte puede ser difícil y la fuerza de empuje se debe minimizar. Segundo, causa deflexión de la herramienta y del portaherramienta, lo que impacta directamente a las tolerancias alcanzables. Tercero, puede variar como una función de las condiciones de corte, y lleva a dimensiones variables, así como a inestabilidades. Aunque es factible medir directamente la fuerza de empuje, es útil considerar cómo influyen en ella las condiciones del corte. De la figura 16-2

$$P_t = P_R \operatorname{sen}(\psi - \alpha) \tag{16-10a}$$

$$P_t = P_c \tan(\psi - \alpha) \tag{16-10b}$$

---

[1] H. Ernst y M.E. Merchant, en *Surface Treatment of Metals*, American Society of Metals, Nueva York, 1941, pp. 299-378.

[2] E.H. Lee y B.W. Shaffer, *Trans. ASME J. Appl. Mech.* **73**: 405-413, 1951.

así, para una fuerza de corte P_c dada (o fuerza resultante P_R dada), la fuerza de empuje disminuye cuando la fricción (ψ) decrece o el ángulo de ataque (α) es más positivo. Si $\psi < \alpha$, la herramienta es atraída hacia la pieza de trabajo.

16-1-3 Corte ortogonal realista

Aunque las condiciones anteriores son cualitativamente correctas, el modelo está sobresimplificado en muchas formas.

La zona de corte En la visión idealizada se consideró que el corte de metal procede del corte que ocurre en una zona infinitamente angosta (Fig. 16-1*d*). La realidad es diferente (Fig. 16-3).

1. La mayoría de los metales se endurecen por deformación cuando se deforman. El plano del corte se ensancha en una *zona de corte* (normalmente denotada como *zona primaria de corte*). El espesor de la zona de corte es mayor para un material más pesadamente endurecido por deformación (n mayor) y también para un material de alta sensibilidad a la tasa de deformación (m alta). La situación se complica porque la energía empleada en el corte eleva la temperatura y reduce el esfuerzo de fluencia. En general, con una n mayor, la zona de corte es más amplia y larga, y el consumo de energía aumenta. El endurecimiento por deformación se extiende adelante y abajo de la zona de corte y alcanza a la superficie recién formada.

2. La presión de interfase en la cara de la herramienta es alta. En la sección 8-2-3 (Fig. 8-16) se vio que el deslizamiento de la pieza de trabajo sobre la superficie de la herramienta se detiene (se inicia la fricción adherida) cuando el producto de la presión de la interfase y el coeficiente de fricción exceden el esfuerzo de fluencia por cortante

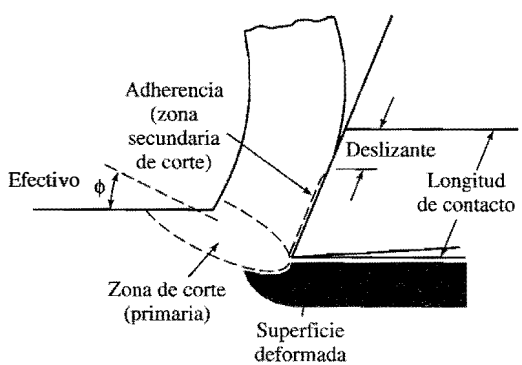


Figura 16-3 La formación de viruta es en realidad muy compleja. La zona de corte se ensancha y se extiende delante del corte y se forma una zona secundaria de corte en la cara de ataque de la herramienta.

del material que se deforma ($\mu p > \tau_f$). Por lo tanto, el coeficiente de fricción realmente no tiene importancia. Como no hay movimiento sobre la cara de herramienta, la viruta debe fluir hacia arriba, en la *zona secundaria de corte*, sobre el material estacionario encontrado próximo a la cara de ataque. Este corte intenso es una segunda fuente de calentamiento. El contacto deslizante se limita a una distancia corta (típicamente, menos de 30% del contacto total) donde la viruta comienza a curvarse (Fig. 16-3).

3. Alrededor del filo la herramienta, las condiciones son aún más complejas. El material de la pieza de trabajo es recalcado y se *ara* con el filo de la herramienta; la fricción contra la superficie de metal recién formada (esencialmente, un planchado ligero) crea una tercera zona de entrada de calor (algunas veces denominada *zona terciaria de corte*).

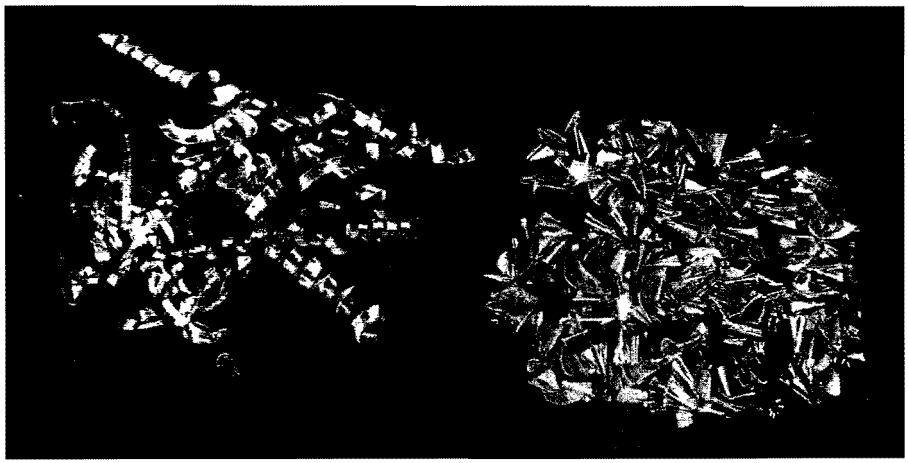
Formación de la viruta El corte de metal realista también difiere del ideal en la formación de la viruta.

1. En el caso ideal, la zona de corte está bien definida, el corte primario ocurre en planos de corte cercanamente espaciados (Fig. 16-1*d*) y se forma una *viruta continua* (Fig. 16-4*a*). Esta situación se aproxima bajo varias condiciones de proceso:

a. A velocidades moderadamente bajas, en presencia de un fluido de corte que actúa como un lubricante y encuentra acceso tanto a la cara de ataque como a la del flanco, la viruta se desliza sobre la cara de ataque. La superficie recién formada es lisa (Fig. 16-5*b*), como lo es la parte inferior de la viruta, la cual aún es continua, aunque el lado interior está serrado, evidenciando la formación de la viruta por cortante.

b. A velocidades un poco mayores, la generación de calor causa un incremento en las temperaturas. La fricción aumenta hasta que el deslizamiento en la cara de la herramienta se detiene, y el sistema busca minimizar el gasto de energía al hallar la geometría óptima del proceso. Se recordará que en el proceso de indentación (Secc. 8-2-5) y extrusión (Secc. 9-4-1), la fricción adherida condujo a la formación de zonas de metal muerto (Fig. 8-17*a* y 9-28*a*). En el corte de metal también, a una velocidad intermedia, el cortante ocurre a lo largo de una nariz del material estacionario pegado a la cara de la herramienta. Esto se denomina *acumulación en el filo* y actúa como una extensión de la herramienta (Fig. 16-5*c*): el corte se esparce a lo largo del límite de la acumulación; de ahí que el *ángulo de ataque efectivo* se haga muy grande y el consumo de energía baje. Sin embargo, tiene una desventaja: el control dimensional se pierde y, como la acumulación en el filo es periódicamente inestable, deja protuberancias ocasionales de metal y grietas dañinas; además, el acabado superficial es pobre. Bajo ciertas condiciones, una acumulación pequeña y estable puede ser mantenida; esto es deseable porque protege a la herramienta sin producir un acabado superficial inaceptablemente pobre.

c. Con el incremento de la velocidad, el material del BUE se calienta y suaviza, y la acumulación en el filo desaparece gradualmente o, más aún, se degenera en la zona de corte secundaria (Fig. 16-5*d*). Las velocidades a las cuales ocurren la transición a la acumulación y el desarrollo de la zona de corte secundaria se indican en la figura 16-5 para el caso del acero. Cambios similares tienen lugar cuando se corta con otros materiales; las velocidades críticas dependen de la temperatura alcanzada en la zona de corte, pero también se ven afectadas por la adhesión entre los materiales de la herramienta



(*a*) (*b*)

Figura 16-4 Las virutas son (*a*) continuas, rectas o helicoidales en el carte de materiales dúctiles, pero (*b*) cortas y fragmentadas en el corte de materiales para maquinado libre.

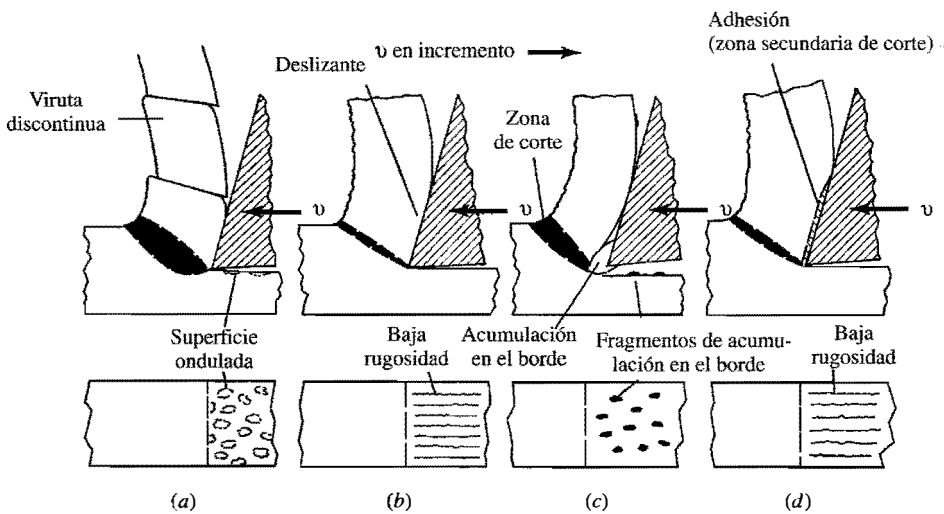
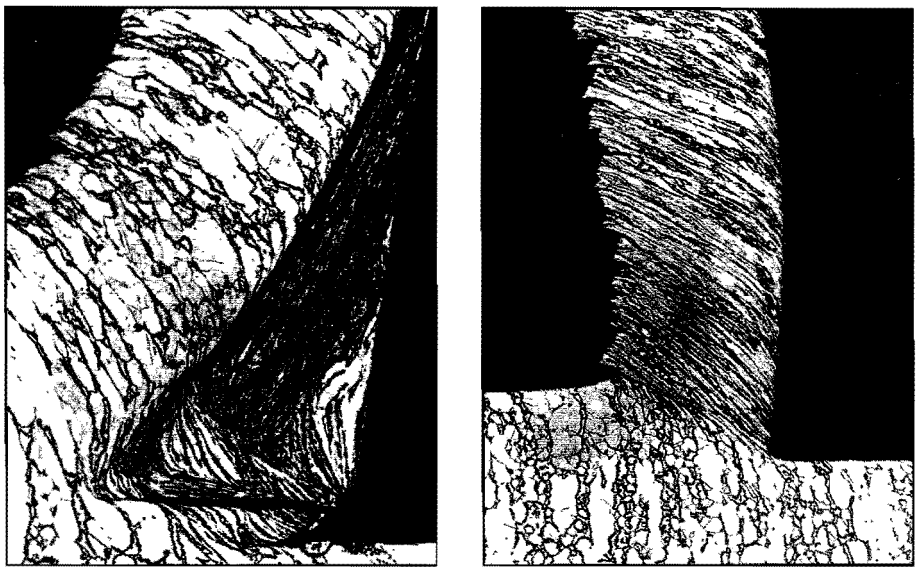


Figura 16-5 El proceso de la formación de viruta cambia con la velocidad de corte. En el corte de acero, la viruta (*a*) es discontinua a velocidades menores de 2 m/min, (*b*) continua y se desliza sobre la cara de ataque a 7 m/min, (*c*) se forma con una acumulación en el borde a 20 m/min, y (*d*) desarrolla una zona secundaria de corte a 40 m/min. (*Según M.C. Shaw, en Machinability, Spec. Rep. 94, The Iron and Steel Institute, London, 1967, pp. 1-9. Con permiso.*)



(*a*) (*b*)

Figura 16-6 En el corte de latón 60Cu-40Zn, la formación de viruta procede con (a) formación de la acumulación en el borde a 30 m/min, y (*b*) en una forma continua a 100 m/min. (*Cortesía del Dr. P.K. Wright, University of California en Berkeley.*)

y de la pieza de trabajo. Como en los procesos de deformación de metal, los efectos de la temperatura se pueden normalizar utilizando la referencia a la escala de temperatura homóloga. En la figura 16-6 se dan ejemplos de virutas continuas, con y sin formación de acumulación.

2. Bajo condiciones especiales, la viruta puede ser continua pero presenta un cambio periódico en el espesor. Una *viruta ondulada* (Fig. 16-7*a*) presenta variaciones casi senoidales en el espesor, que normalmente están relacionadas con el *castañeo* (vibración) atribuible a cambios periódicos en las fuerzas de corte. Como en todas las máquinas, las fuerzas impuestas causan deflexiones elásticas de la pieza de trabajo, de la herramienta, del portaherramienta y de la máquina herramienta (Secc. 4-1-2). Cualesquiera variaciones en las fuerzas resultan en un cambio del espesor de la viruta sin deformar, y por lo tanto en una ondulación visible y mesurable de la superficie maquinada. Las fuerzas desbalanceadas aceleran el desgaste de la herramienta y pueden causar su fractura, imponiendo de esta manera limitaciones serias en la velocidad y en la rapidez de producción.

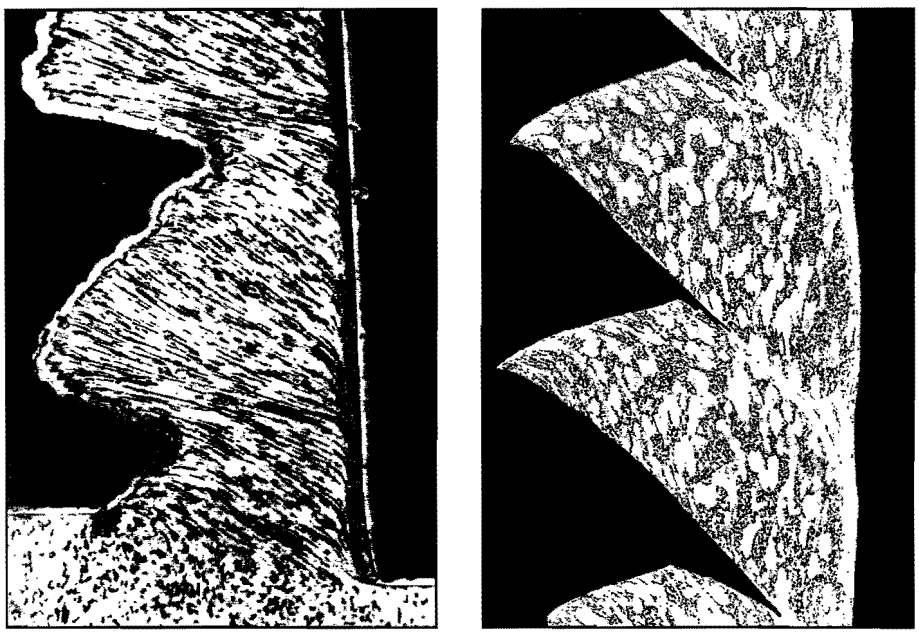
a. En el *castañeo regenerativo* (*vibración autoexitada*), la fuente de vibración es un cambio en el espesor de la viruta sin deformar (de la ondulación producida en un corte precedente por la presencia de una zona dura u otra irregularidad) o una pérdida periódica de la acumulación en el filo. Una solución se encuentra normalmente al cambiar las condiciones del proceso (velocidad, alimentación, soporte de la pieza de trabajo, soporte de la herramienta).

b. El castañeo también puede originar *vibraciones forzadas*, debido a una variación periódica de las fuerzas que actúan dentro de la máquina herramienta (por ejemplo, de una caja de engranes o de un acoplamiento), o puede transmitirse desde una fuente externa, como una máquina herramienta vibratoria cercana. Los montajes de aislamiento de la vibración o mover la máquina herramienta responsable elimina el problema. Los cortes interrumpidos en el fresado también originan vibraciones; entonces, el espaciamiento desigual de los dientes es útil.

3. Las *virutas segmentadas* presentan una ondulación parecida a los dientes de una sierra. Las secciones gruesas sólo se deforman ligeramente y se unen mediante varias secciones más delgadas, severamente rasgadas (Fig. 16-7*b*).

a. Una forma extrema de formación de viruta segmentada se observa en los materiales de baja conductividad térmica, como el titanio. El proceso se inicia por medio del engrosamiento delante de la herramienta, resultando en la *localización del corte.* Como el calor generado en el plano de corte no puede disiparse, el material se calienta, se debilita y se corta hasta que un segmento de viruta se mueve. Entonces, el proceso comienza de nuevo con el engrosamiento.

b. Las virutas segmentadas también se forman a velocidades muy elevadas (en el *maquinado a alta velocidad*), cuando la caída en el esfuerzo cortante debida al calenta-



(*a*) (*b*)

Figura 16-7 Bajo algunas condiciones, la viruta formada es (*a*) ondulada (acero AISI 1015, 55 m/min) o (*b*) segmentada (Ti-6Al-4V, 10 m/min) (*Cortesía del Dr. R. Komanduri, Oklahoma State University, Stillwater.*)

miento es mayor que el incremento originado por el endurecimiento por deformación. La velocidad a la que esto ocurre depende del material; en el corte de acero tratado térmicamente es de alrededor de 1 000 m/min. La fuerza de corte disminuye y la mayoría del calor se elimina en la viruta. Sin embargo, es importante notar que el maquinado a alta velocidad no necesariamente iguala al maquinado de alto rendimiento, porque la velocidad puede estar limitada por el incremento de la temperatura, y es factible obtener mayores tasas de remoción de material con cortes más pesados (Secc. 16-1-8).

4. Bajo ciertas condiciones se forma una *viruta discontinua*:

a. Cuando se cortan materiales dúctiles a velocidades muy bajas, el severo endurecimiento por deformación del material causa engrosamiento hasta que se acumula suficiente deformación para iniciar el corte. Los elementos elásticos en el sistema (por ejemplo, el portaherramienta) permiten la aceleración repentina y la separación completa de una viruta, para ser seguido por un nuevo ciclo de engrosamiento. Las fuerzas de corte fluctúan violentamente, la nueva superficie se rasga (Fig. 16-5*a*) y ondula. La alta adhesión y las bajas velocidades de corte que generan bajas temperaturas homólogas favorecen esta configuración de la viruta.

b. La formación de viruta discontinua se introduce intencionalmente en algunas aleaciones de maquinado libre al incorporar inclusiones o partículas de segunda fase que sirven como concentradores de esfuerzos y causan la separación total de fragmentos de viruta cercanamente espaciados (Fig. 16-4*b*). Las partículas o inclusiones de segunda fase a menudo reducen la resistencia al corte tanto en la zona primaria de corte como en la secundaria; por consiguiente, las fuerzas de corte son bajas. Como la separación de la viruta se facilita, el acabado superficial es bueno y la tendencia al castañeo se reduce.

El análisis anterior se basa en la suposición de un accionamiento continuo del filo de corte, típico en operaciones como torneado y taladrado. En otros procesos, notablemente en el fresado, el corte se interrumpe y el filo emerge del corte después de un accionamiento limitado. Esto tiene ventajas en términos del desecho de la viruta, pero somete a la herramienta a una carga de impacto y a la fluctuación rápida de la temperatura.

Eliminación de viruta Con la elevación de la tasa de remoción de metal, se producen grandes cantidades de virutas que deben removerse efectivamente. Hay pocos problemas con las virutas cortas que se producen en el corte de materiales de maquinado libre (Fig. 16-4*b*). En contraste, la viruta continua que se forma al maquinar materiales dúctiles bajo condiciones estables (Fig. 16-4*b*) es una molestia: es difícil de remover; puede tapar la zona de trabajo, puede enredarse sobre la pieza de trabajo o sobre la herramienta y presentar peligro para las herramientas, la máquina y el operador.

Los *rompedores de virutas* son una solución parcial. Algunos se diseñan para impartir deformación adicional a la viruta, causando que se rompa en longitudes más cortas o que al menos se curve en rollos apretados que se rompen frecuentemente. Incrementan el ángulo efectivo de ataque y de esta manera reducen la fuerza de corte, la temperatura y el desgaste. En otras ocasiones, la viruta es forzada a doblarse y a golpear una obstrucción como el portaherramienta, el flanco de la herramienta, o la misma

pieza de trabajo. Con un extremo fijo, la viruta crece hasta que los esfuerzos flexionantes la hacen romperse. Las virutas continuas formadas por materiales dúctiles se deben recortar o sacar de la zona de trabajo. Si la superficie cortada es vertical, la remoción de viruta es más fácil, ya que las virutas caen por la fuerza de gravedad.

Se puede incorporar un rompedor de virutas en la herramienta dándole una curvatura a la cara de ataque, lejos del filo de corte. Los rompedores de viruta del *tipo surco* (Fig. 16-8*a*) son típicos de los insertos; actualmente incorporan almohadillas y protuberancias diseñadas para desviar la viruta (Fig. 16-8*c*). Alternativamente, se puede colocar un rompedor de virutas separado en la cara de ataque (del *tipo de obstrucción*, Fig. 16-8*b*). Los rompedores de virutas elevan el ángulo efectivo de ataque pero, si se mueven demasiado cerca del filo de corte, concentran calor en él y pueden causar la pérdida rápida de la herramienta debida al sobrecalentamiento. La curvatura natural de las virutas es una función de muchas variables del proceso; en general, el radio de curvatura de la viruta se vuelve más pequeño (la viruta está más apretada) con el incremento de h y la disminución de la velocidad. En correspondencia, los rompedores de virutas funcionan con mayor eficiencia en espesores de la viruta sin deformar y velocidades específicos, y se diseñan insertos especiales para cortes de desbaste o de terminado. Las piezas fundidas o forjadas con forma casi neta presentan retos inusuales, en que la superficie de la pieza tiene escamas y zonas duras locales normalmente removidas en el desbastado; ahora la profundidad del corte es pequeña, la viruta no se rompe fácilmente, y los insertos deben tener características que faciliten el rompimiento de la viruta. El modelado por computadora de la formación de viruta ha avanzado a tal punto que se aplica para acelerar el diseño del rompedor de viruta.

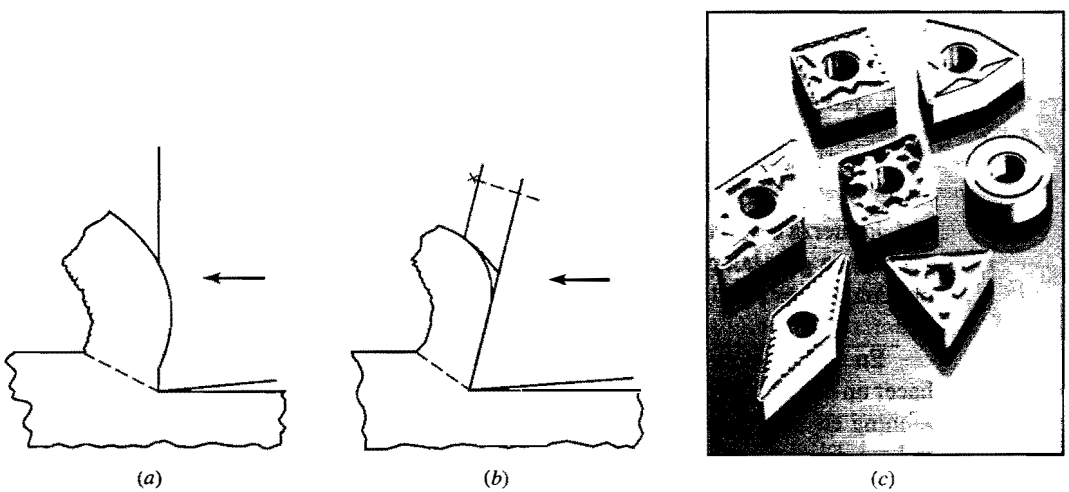


Figura 16-8 Las virutas son forzadas a formar rizos más cerrados y se fragmentan cuando se usan rompedores de viruta (*a*) del tipo de acanaladura o (*b*) de obstrucción. (*c*) Se pueden incorporar patrones complejos de rompimiento de viruta en insertos ajustables. [*Inciso (c) cortesía de Kennametal, Latrobe, Pennsylvania.*]

Ejemplo 16-3

Se encuentran marcas de traqueteo en la superficie de una pieza de trabajo que está siendo torneada. Identifique la causa del traqueteo.

Es posible medir la longitud de onda del traqueteo (la distancia entre zonas altas consecutivas). La velocidad de corte dividida entre la longitud de onda da la frecuencia. (*a*) Si la frecuencia concuerda con o es un múltiplo de la frecuencia rotacional de una parte de una máquina, o la frecuencia vibratoria de una máquina herramienta cercana, entonces la vibración es forzada. La mejor solución es la eliminación de la fuente, aunque cambios en las condiciones de corte son útiles si aumentan las fuerzas de corte en dirección de la vibración (porque la carga más pesada resulta en un incremento de la rigidez). (*b*) Si la vibración no es forzada, a menudo es factible eliminarla cambiando la velocidad de corte, ya que las máquinas herramienta tienen rigidez mayor a ciertas velocidades; adicionalmente, las condiciones se pueden cambiar para reducir las fuerzas de corte.

Se obtiene mejor discriminación si la prueba se realiza a dos velocidades diferentes. Si la frecuencia de la vibración cambia y de nuevo es igual a algún múltiplo de la velocidad del husillo, la vibración es forzada. Si la frecuencia de la vibración permanece esencialmente sin cambiar, es autoexitada.

16-1-4 Corte oblicuo

En la mayoría de los procesos prácticos de corte, el filo de corte se fija en un *ángulo de inclinación i* (Fig. 16-9*a*). Ese *corte oblicuo* difiere del ortogonal en varios aspectos:

1. La viruta se curva en forma helicoidal en vez de espiral y se retira más fácilmente de la zona de trabajo. Comúnmente la viruta fluye a una velocidad v_c, en un ángulo η_c igual al ángulo de inclinación i (regla de Stabler, Fig. 16-9*b*).

2. El *ángulo normal de ataque* α_n se mide del plano que contiene la normal hacia la superficie de la pieza de trabajo y la velocidad de la herramienta v. El *ángulo efectivo de ataque* α_e se mide en el plano que contiene v y v_c y es mayor que α_n

$$\operatorname{sen} \alpha_e = \operatorname{sen}^2 i + \cos^2 i \operatorname{sen} \alpha_n \qquad \textbf{(16-11)}$$

Así, la fuerza de corte es menor que con una herramienta ortogonal de igual ángulo de ataque. En general, para ángulos de ataque efectivos iguales, una herramienta de corte oblicua es más resistente que una ortogonal.

En muchos procesos, el filo de la herramienta no es lo suficientemente ancho para hacer un corte sobre todo el ancho de la pieza de trabajo; entonces, la capa superficial se elimina en incrementos, avanzando la herramienta a través del ancho de la pieza de trabajo. El *avance es la distancia entre accionamientos sucesivos del filo de corte*. En el ejemplo mostrado en la figura 16-10*a*, la herramienta se mueve en una trayectoria en línea recta; se hace un corte durante el movimiento hacia delante, y la herramienta se levanta fuera del contacto durante la carrera de retorno. El avance f se realiza antes que inicie el siguiente movimiento hacia delante, y es igual en magnitud al espesor de la viruta sin deformar h.

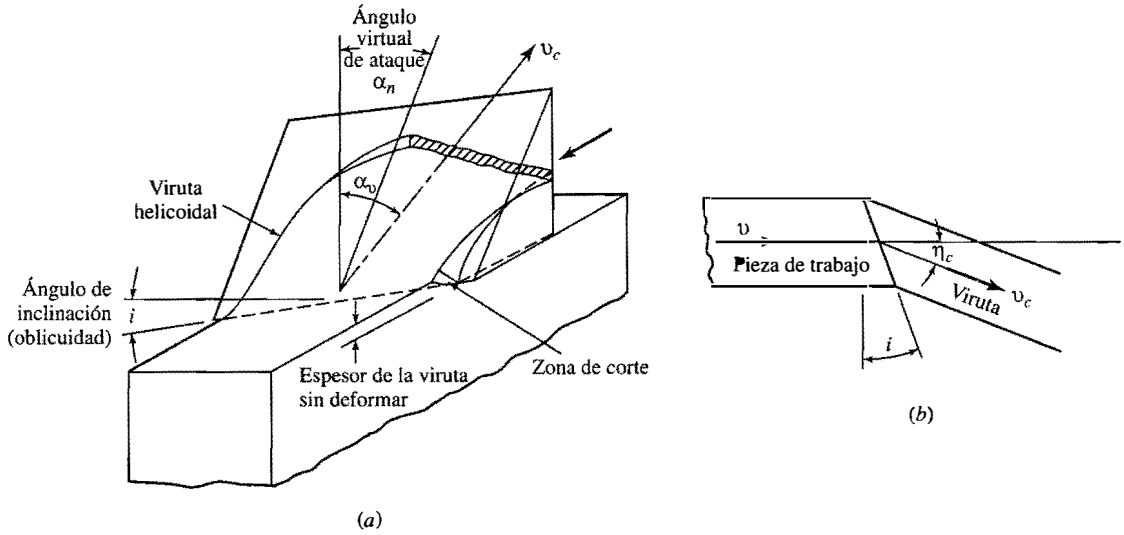


Figura 16-9 En el corte oblicuo, la viruta fluye a un ángulo sobre la cara de ataque para formar una hélice.

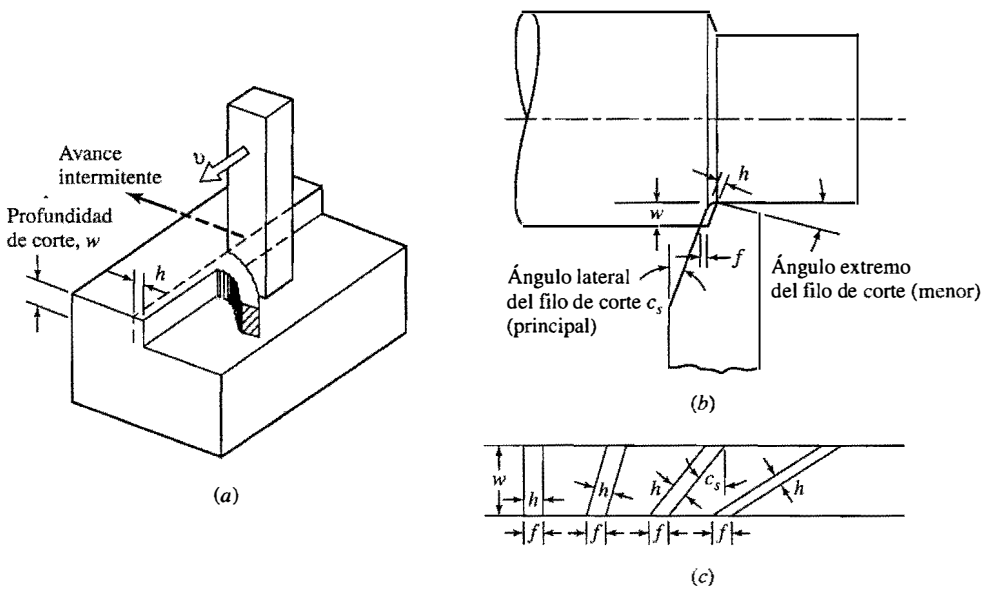


Figura 16-10 Para maquinar una superficie grande, (a) a la herramienta se le debe dar un avance. Para facilitar la remoción de la viruta, (b) el filo de corte está en un ángulo que (c) afecta el espesor de la viruta sin deformar para un avance dado.

La geometría de la herramienta de la figura 16-10*a* no es práctica, y una variedad de cambios es deseable para permitir que la viruta fluya fácilmente y para evitar el daño a la superficie recién formada. Estos cambios se muestran mejor para el corte de un cilindro (torneado, Fig. 16-10*b*).

1. El filo de corte se fija a un ángulo en dirección del avance. Un incremento en este ángulo del *filo lateral de corte* (de *aproximación*) C_S resulta en una h menor para el mismo avance ($h = \cos C_S$, Fig. 16-10*c*) y eleva las fuerzas radiales así como las axiales. Los ángulos típicos son de 15 a 30°, excepto para piezas largas y esbeltas para las cuales un ángulo cero proporciona menos deflexión.

2. El extremo de la herramienta se alivia, creando *filos de corte mayor* y *menor*. Los dos se juntan en la *esquina* o *nariz*; a la transición entre los bordes de corte se le da un *radio* para obtener un acabado más liso.

Se pueden hacer cambios adicionales, por ejemplo para impartir un ángulo de ataque positivo o negativo; también es posible inclinar el filo principal de corte.

16-1-5 Fuerzas y requerimientos de energía

Existe una variedad de teorías con un punto de vista realista del proceso de corte. Esas teorías son altamente valiosas en los estudios paramétricos, es decir, al explorar los efectos de las variables del proceso. Sin embargo, para la predicción de las fuerzas y de los requerimientos de energía, existe el problema de determinar el esfuerzo de fluencia relevante. En la sección 16-1-1 se vio que se producen grandes deformaciones por cortante en una zona angosta de corte, y que la tasa de deformación alcanza valores muy altos. El esfuerzo de fluencia de la mayoría de los materiales aumenta debido a esa tasa, incluso a temperaturas de trabajo en frío; sin embargo, esto se contrarresta por el gran incremento de la temperatura que disminuye el esfuerzo de fluencia. Por lo tanto, sólo los valores del límite elástico determinados a las temperaturas apropiadas —a menudo desconocidas— y la tasa de deformación son relevantes. Aun entonces, las predicciones del ángulo de corte y del ancho de la zona de corte se requieren antes de hacer una estimación razonable. No obstante, el modelado, a menudo por métodos numéricos, ha avanzado.

Los cálculos aproximados de los requerimientos de fuerza y energía, con exactitud suficiente para todos los propósitos prácticos, se hacen partiendo de las constantes del material determinadas experimentalmente. Tres aproximaciones son usuales:

1. La fuerza de corte P_c dividida entre el área de la sección transversal de la viruta sin deformar proporciona el esfuerzo nominal de corte o *presión específica de corte* p_c

$$p_c = \frac{P_c}{hw} \quad \left(\frac{N}{m^2}\right) \tag{16-12}$$

Note que p_c no es un esfuerzo verdadero, aunque tiene las dimensiones de esfuerzo.

2. La energía consumida al arrancar un volumen unitario de material se llama *energía específica de corte* E_1. La energía (o trabajo) es la fuerza P_c multiplicada por la distancia l sobre la cual actúa la fuerza. Como el volumen del material arrancado es $V = hwl$, la energía específica de corte se puede escribir como

$$E_1 = \frac{P_c l}{hwl} \quad \left(\frac{\text{J}}{\text{m}^3} \text{ o } \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right) \tag{16-13}$$

Se notará que, *cuando se expresan en unidades consistentes*, los valores numéricos de p_c y E_1 son los mismos. Como el propósito del cálculo a menudo es encontrar el tamaño del motor de impulsión, E_1 se expresa normalmente en unidades de $\text{W} \cdot \text{s/m}^3$ o equivalentes (tabla 16-1). Para herramientas melladas, E_1 se incrementa en 30%.

3. El *factor de remoción de material* K_1 es el recíproco de la energía específica de corte

$$K_1 = \frac{1}{E_1} \quad \left(\frac{\text{m}^3}{\text{W} \cdot \text{s}}\right) \tag{16-14}$$

Tabla 16-1 Requerimientos aproximados de la energía específica para el corte* [multiplique por 1.3 para herramientas sin filo. Espesor de la viruta sin deformar: 1 mm (0.040 pulg)].

	Dureza		Energía específica E_1	
Material	**HB**	**HRC**	**W · s/mm³**	**hp · min/in³**
Aceros (todos)	85-200		2.1	0.8
		35-40	2.4	0.9
		40-50	2.9	1.1
		50-55	3.2	1.4
		55-58	6.0	2.2
Aceros inoxidables	135-275		2.3	0.8
		30-45	2.5	0.9
Hierros fundidos (todos)	110-190		1.3	0.5
	190-320		2.4	0.9
Titanio	250-275		2.1	0.8
Superaleaciones (Ni y Co)	200-360		4.5	1.6
Aleaciones de aluminio	30-150 (500 kg)		0.5	0.2
Aleaciones de magnesio	40-90 (500 kg)		0.3	0.1
Cobre		80 HRB	1.8	0.7
Aleaciones de cobre		10-80 HRB	1.2	0.5
		80-100 HRB	1.8	0.7
Aleaciones de zinc			0.3	0.1

* Extrapolados de datos en *Machining Data Handbook*, 3a. ed., Machinability Data Center, Metcut Research Associates, Cincinnati, Ohio, 1980.

Es conveniente porque proporciona una idea de la cantidad de material que se puede eliminar en un tiempo unitario con un impulso de potencia unitaria.

Las anteriores constantes del material no se pueden usar inmediatamente para realizar cálculos porque no son realmente constantes, sino que también dependen de parámetros del proceso como el espesor de la viruta sin deformar, el ángulo de ataque y la velocidad de corte. El espesor de la viruta sin deformar es el factor más poderoso porque la necesidad total de energía en realidad es una suma de por lo menos dos componentes:

1. La energía empleada en la zona primaria de corte es proporcional al espesor de la viruta sin deformar, pero también lo es la cantidad de material removido. Esto haría a p_c, E_1 y K_1 verdaderas constantes del material.

2. Sin embargo, se requiere energía adicional para proporcionar las fuerzas de fricción en el flanco y de arado; como esta energía es virtualmente independiente del espesor de la viruta sin deformar, es responsable de la mayor parte de la energía total cuando h es pequeña. Así, la energía requerida para remover un volumen unitario de material aumenta con la disminución del espesor de la viruta sin deformar. Por lo tanto, las constantes del material como E_1 se deben determinar para una h acordada como, por ejemplo, $h_{ref} = 1$ mm, y entonces la *energía de corte específica ajustada* E para cualquier otra h se encuentra por medio de una ley empírica de las potencias

$$E = E_1 \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^{-a} = E_1 h^{-a} \qquad \textbf{(16-15)}$$

donde a varía de 0.2 a 0.4 y se puede tomar como 0.3 para la mayoría de los materiales. Se debe notar que por debajo de un espesor de 0.1 mm de la viruta sin deformar, el requerimiento de energía se incrementa aún más agudamente. Esto es significativo en el maquinado de puntos múltiples como en el taladrado y el fresado, y todavía más en el maquinado por abrasión.

Entonces, la potencia a desarrollar por la máquina herramienta se puede estimar si se conocen la tasa de remoción del material V_t y la eficiencia de la máquina herramienta η (que es comúnmente alrededor de 0.7 a 0.8):

$$\text{Potencia (W)} = \frac{EV_t}{\eta} \quad \left(\frac{\text{W} \cdot \text{s}}{\text{mm}^3} \frac{\text{mm}^3}{s} \right) \qquad \textbf{(16-16a)}$$

o, en unidades convencionales

$$\text{Potencia (hp)} = \frac{EV_t}{\eta} \quad \left(\frac{\text{hp} \cdot \text{min}}{\text{pulg}^3} \frac{\text{pulg}^3}{\text{min}} \right) \qquad \textbf{(16-16b)}$$

La fuerza de corte P_c que deben resistir el portaherramienta y la máquina herramienta se calcula recordando que la potencia dividida entre la velocidad da la fuerza. Si la velocidad de corte v está en m/s:

$$P_c = \frac{\text{potencia (W)}}{v} \quad \text{(N)} \tag{16-17a}$$

o, si la velocidad de corte v está en unidades de ft/min:

$$P_c = \frac{33\,000 \text{ potencia (hp)}}{v} \quad \text{(lbf)} \tag{16-17b}$$

Alternativamente, la fuerza se puede determinar a partir de la ecuación (16-12). Para una primera aproximación, la fuerza de empuje P_t puede considerarse como la mitad de P_c al cortar con herramientas con ángulo de ataque positivo pequeño o cero; aumentando cada vez más el ángulo de ataque positivo, la fuerza de empuje disminuye y, en el extremo, la herramienta es atraída hacia la pieza de trabajo.

Ejemplo 16-4

Como se analizó en el ejemplo 16-1, una barra de acero 4340 de HB 270 se corta a una velocidad de 0.6 m/s. El espesor de la viruta sin deformar es 0.3 mm y su ancho de 1.5 mm. Calcule la potencia y la fuerza de corte necesaria.

De la tabla 16-1, $E_1 = 2.4$ W · s/mm^3. De ahí que la energía de corte específica ajustada sea, de la ecuación (16-15), $E = 2.4(0.3)^{-0.3} = 3.44$ W · s/mm^3. La tasa de remoción de material es simplemente la sección transversal de la viruta multiplicada por la velocidad de corte: $V_t = 0.3(1.5)(600) = 270$ mm^3/s. La potencia, de la ecuación (16-16*a*): 3.44(270)/0.7 = 1 328 W o, para herramientas melladas, 1 328(1.3) = 1 727 W (= 2.32 hp). La fuerza de corte, de la ecuación (16-17*a*), 1 727/0.6 = 2 878 N (= 647 lbf).

16-1-6 Temperaturas

La energía que se emplea en el maquinado se concentra en una zona muy pequeña. Sólo una pequeña fracción de ella se almacena en la pieza de trabajo y en la viruta en forma de un incremento en la densidad de dislocaciones, y la vasta mayoría de la energía se convierte en calor.

Como la zona de corte se mueve constantemente hacia la pieza de trabajo, hay poco calentamiento delante de la herramienta y, al menos a altas velocidades de corte, la mayor parte del calor (más de 80%) lo transporta la viruta. Sin embargo, la herramienta está en contacto continuo con la viruta y, en ausencia de una capa efectiva de aislamiento de calor, la cara de ataque de la herramienta se calienta. La fricción en la cara de ataque (o la deformación en la zona de corte secundaria) también es una fuente sustancial de calentamiento. Los cálculos detallados muestran que la temperatura máxima se desarrolla en la cara de ataque, a una cierta distancia de la nariz de la herramienta, pero antes que la viruta se levante (Fig. 16-11*a*). Como se esperaría, tanto la temperatura máxima ($T_{máx}$) como la promedio en la interfase (T_{int}) se elevan con el incremento de la velocidad de corte (Fig. 16-11*b*). La temperatura más alta que se puede alcanzar es el punto de fusión del material; por esta razón, las aleaciones cuyo punto de fusión es

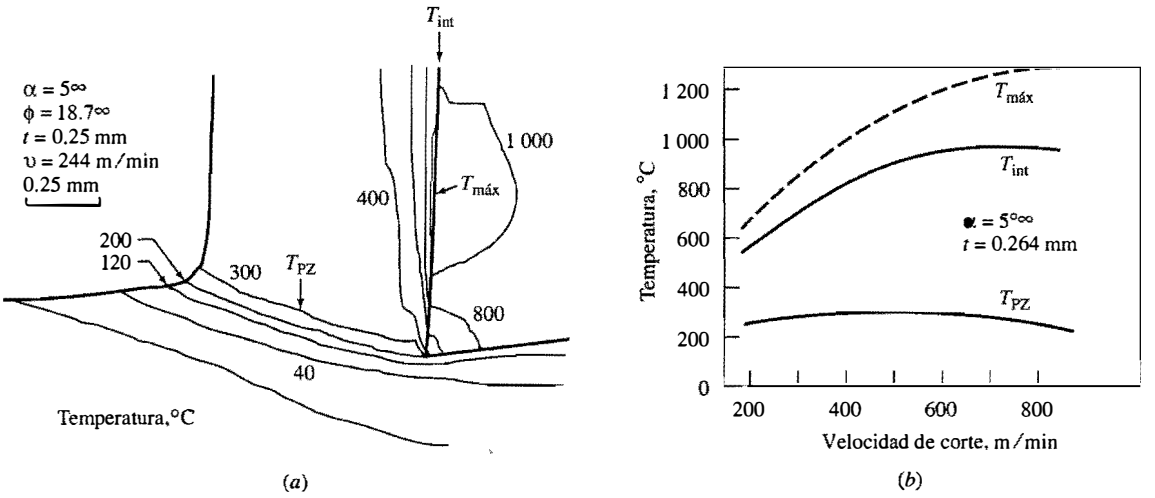


Figura 16-11 *(a)* Distribución calculada de la temperatura en la viruta y la herramienta, y *(b)* variación de la temperatura con la velocidad de corte cuando se corta acero AISI 1016 con una herramienta de carburo. [*Según A.O. Tay, M.G. Stevenson, G. DeVahl Davies y P.L.B. Oxley, Int. J. Mach. Tool Des. Res.,* ***16****: 335-349(1976). Reimpresa con permiso de Pergamon Press, Oxford.*]

menor que la temperatura de ablandamiento de la herramienta (como las de Al y Mg) se pueden, en principio, cortar a cualquier velocidad, especialmente con herramientas de carburo.

Una estimación burda de las temperaturas se obtiene por medio del análisis dimensional, suponiendo que toda la energía E [ecuación (16-15)] se convierte en calor.[3] Entonces, la temperatura media de la cara de la herramienta T_T es

$$T_T = E\left(\frac{\upsilon h}{k\rho c}\right)^{1/2} \qquad \textbf{(16-18)}$$

donde k es la conductividad térmica, ρ la densidad, y c el calor específico (contenido de calor por unidad de volumen) del material de la pieza de trabajo. Así, se deben esperar temperaturas mayores al cortar materiales más resistentes (E mayor) a velocidades más altas, especialmente si el material de la pieza de trabajo es un conductor térmico pobre, de baja densidad, y de bajo calor específico. Los materiales como el titanio y las superaleaciones son difíciles de maquinar, al contrario del aluminio y del magnesio. Aunque la mayoría del calor se transporta en la viruta, algo se difunde en la pieza de trabajo; el cambio dimensional resultante se debe compensar, y la acumulación de calor en la herramienta es un factor significativo que limita la velocidad de corte.

[3] M.C. Shaw, *Metal Cutting Principles*, 3a. ed., Oxford University Press, 1984.

Ejemplo 16-5

Una idea del efecto de las propiedades del material sobre las velocidades de corte permisibles puede obtenerse de la ecuación (16-18), si se mantienen constantes el espesor de la viruta sin deformar y el incremento de la temperatura para una herramienta dada (digamos HSS). Considere, por ejemplo, la superaleación con base de níquel IN-100 de TS = 1 000 MPa y el acero 4140 tratado térmicamente hasta TS = 1 000 MPa (las durezas son más o menos iguales y de alrededor de 300 HB).

	IN-100	4140	Fuente
E_1 (W · s/mm³)	4.5	2.4	Tabla 16–1
k, a 500°C (W/m · K)	17	37	*Metals Handbook*, 9a. ed.
ρ (g/cm³)	7.75	7.85	vol. 1, pp. 148, 149
c a 500°C (J/kg · K)	480	520	vol. 3, p. 243

Sustituyendo da

$$\Delta T = \text{const.} = 4.5\left[\frac{v_{\text{súper}}}{(17)(7.75)(480)}\right]^{1/2} = 2.4\left[\frac{v_{\text{acero}}}{(37)(7.85)(520)}\right]^{1/2}$$

$$v_{\text{acero}} = \frac{3058439}{364262} v_{\text{súper}} = 8.4 v_{\text{súper}}$$

De la figura 16-45, $v_{\text{acero}} = 0.45$ m/s; de la figura 16-46, $v_{\text{súper}} = 0.06$ m/s; la razón es 0.45/0.06 = 0.75, en buen acuerdo con nuestro cálculo.

16-1-7 Fluidos de corte

Algunas operaciones de corte se realizan en *seco*, es decir, sin la aplicación de un *fluido de corte* o, como algunas veces se llama, un *refrigerante*.

Acciones de los fluidos de corte El fluido básicamente cumple tres funciones principales:

1. *Lubricación.* El acceso del fluido a la cara de ataque es difícil, especialmente a velocidades elevadas de corte. Sin embargo, el fluido entra a la zona de deslizamiento, y un poco se puede filtrar desde los lados de la viruta. Los efectos atribuibles a la lubricación frecuentemente pueden observarse, especialmente cuando el contacto con la herramienta de corte es intermitente. En el corte a baja velocidad con fricción deslizante, la fricción en la cara de ataque se reduce, por lo tanto, el ángulo de corte se incrementa, la viruta se hace más delgada, se curva más agudamente y el consumo de la potencia baja. A velocidades donde se forma una acumulación en el borde en ausencia de un lubricante, el inicio de la acumulación se desplaza a velocidades más altas. A velocidades mayores, donde se desarrolla una zona de adhesión, la longitud de ésta se reduce. En todas las velocidades, el acceso del lubricante a la cara del flanco es posible

Tabla 16-2 Fluidos para maquinado usados comúnmente*

Proceso	Herram.	Acero (BHN < 275)	Acero (BHN > 275)	Acero inox. Aleación de níquel	Hierro fundido	Aleación de aluminio	Aleación de magnesio	Aleación de cobre
Torneado	HSS	O1, E1, C1	O2, E2, C2	O2, E2, C2	E1, C1	E1, C1, Sp	O1, Sp	E1, C1, Sp
	Carburo	D, E1, C1	D, E1, C1	D, E1, C1	D, E1, C1	D, E1, C1	O1, Sp	E1, C1
Fresado, Taladrado	HSS	O1, E1, C1	O2, E2, C2	O2, E2, C2	E1, C1	D, O1, Sp	O1, Sp	E1, C1, Sp
	Carburo	D, E1, C1	O1, E1, C1	O2, E1, C1	D, E1, C1	D, O1, Sp	O1, Sp	E1, C1
Torneado de forma	HSS	O2, E2, C2	O2, E2, C2	O2, E2, C2	E1, C1	E1, C1, Sp	O1, Sp	E1, C1, Sp
	Carburo	D, E1, C1	E2, C2	O2, E2, C2	D, E1, C1	D, E1, C1	O1, Sp	E1, C1
Generación de engranes	HSS	O2, E2, C2	O2, E2, C2	O2, O3	E1, C1	O1, Sp	D, O1, Sp	O1, Sp
Machueleado	HSS	O1, E2, C2	O2, E2, C2	O2, O3	E1, C1	D, O1, Sp	D, O1, Sp	O1, Sp
Escariado	HSS	O2, E2, C2	O2, E2, C2	O2, E2, C2	E2, C2	E1, C1, sp	D, O1, Sp	E1, C1, Sp
	Carburo	O1, E1, C1	O1, E1, C1	O1, E1, C1	D, E1, C1	D, E1, C1	D, O1, Sp	E1, C1, Sp
Esmerilado		O1, E1, C1	O2, E1, C1	O2, E2, C2	E1, C1	O1, Sp	O1, Sp	O1, Sp

*De J.A. Schey, *Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication and Wear*, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1983. Código: D–Seco. O1–Aceite mineral o sintético. O2–Aceite compuesto. O3–Aceite compuesto para trabajo pesado. El–Emulsión de aceite mineral. E2–Emulsión para trabajo pesado (compuesta). C1–Fluido químico o sintético. C2–Fluido químico para trabajo pesado (compuesto) o fluido sintético. Sp–Fluido especialmente formulado, con aditivos marginales y/o E.P.

y se reduce la fricción. El efecto combinado es que, en general, el acabado superficial también mejora.

2. *Enfriamiento.* Como el cortante está altamente concentrado y la zona de corte se mueve extremadamente rápido, las temperaturas en la zona de corte no se afectan. Sin embargo, un fluido de corte reduce la temperatura de la viruta a medida que deja la zona secundaria de corte, y enfría la pieza de trabajo. También puede reducir la temperatura volumétrica de la herramienta. Aunque las relaciones no son en manera alguna sencillas, a menudo se encuentra que un fluido de corte disminuye suficientemente las temperaturas para permitir el corte a velocidades mayores. No obstante, en la mayoría de los casos es esencial que el fluido se aplique a la zona de corte. En los cortes interrumpidos, como en el fresado, la herramienta se somete a fluctuaciones rápidas de la temperatura. Un refrigerante sólo es útil si inunda toda la zona de corte; de otra forma, somete a la herramienta a fluctuaciones extremas de temperatura.

3. *Remoción de la viruta.* Los fluidos empleados en el corte cumplen una función adicional y algunas veces extremadamente importante: retiran las virutas de la zona de corte y evitan que la herramienta se tape o se atasque. Luego, las virutas se trasladan a través de bandas transportadoras o mediante vacío.

Fluidos de corte Al seleccionar los fluidos de corte, se aplican muchas de las consideraciones relacionadas con los fluidos para trabajo de metales (Secc. 8-2-4). Los fluidos de corte se clasifican en dos categorías principales.

1. Los *aceites empleados en el corte* consisten en aceites minerales con aditivos apropiados; se usan mayormente a velocidades bajas y con herramientas de acero de alta velocidad (HSS).

2. Los *fluidos con base de agua* (*acuosos*) pueden ser *emulsiones* (aceites dispersos en agua con la ayuda de sustancias tensoactivas), *fluidos semisintéticos* (también llamados semiquímicos o emulsiones químicas, en las que se emplean grandes cantidades de agentes tensoactivos para reducir el tamaño de las partículas del aceite hasta el punto donde el fluido se vuelve translúcido o transparente), o *fluidos sintéticos* (también llamados fluidos químicos, que no contienen aceite, sólo agentes humectantes solubles en agua, inhibidores de la corrosión y sales).

Debido al contacto íntimo herramienta-pieza de trabajo, las altas temperaturas, y el riesgo de desgaste, muchos fluidos de corte contienen agentes marginales y EP. En la tabla 16-2 se listan algunos fluidos comunes.

Aplicación de los fluidos de corte El método de aplicación de los fluidos de corte es tan importante como su selección.

1. *Aplicación manual.* Comúnmente se practica la aplicación de un fluido por medio de una aceitera de presión o en forma de una pasta (para operaciones a baja velocidad), aunque realmente no es aceptable aun en situaciones de trabajo de taller. En ausencia de enfriamiento, las velocidades de corte son limitadas, y es difícil mantener limpias las máquinas y la planta.

2. *Inundación.* La mayoría de las máquinas herramienta están equipadas con un sistema recirculante que incorpora filtros. El fluido se aplica con una rapidez de hasta 15 L/min para cada filo de corte accionado simultáneamente. Por conveniencia, la herramienta normalmente se inunda desde el lado de la viruta (Fig. 16-12*a*), aunque un mejor enfriamiento se asegura mediante la aplicación hacia la hendidura de alivio (Fig. 16-12*b*), especialmente cuando el fluido se abastece con una presión de 300 kPa (40 psi) o más. Los sistemas de alta presión aplican presiones de 5 a 35 MPa (0.8-5 ksi) y, al chocar a entre 350 y 500 km/h, ayudan a remover las virutas, pero todo el espacio de trabajo se debe encerrar. Puede ser necesaria una segunda boquilla para despejar las virutas en algunas operaciones (Fig. 16-12*c*). La velocidad del flujo en el taladrado es usualmente de 5 L por milímetro de diámetro de la broca. Sin embargo, el acceso del fluido a los filos de corte está limitado y la remoción de la viruta es difícil.

3. *Herramientas alimentadas con refrigerante.* Hay disponibles taladros y otras herramientas con agujeros a través de su cuerpo, de manera que un fluido presurizado se pueda bombear a los filos de corte, asegurando el acceso del fluido y facilitando la remoción de la viruta. Para insertos, las boquillas de refrigerante se pueden construir directamente en los portaherramientas, y algunos insertos tienen agujeros por medio de los que el refrigerante se suministra al lado inferior de la viruta.

4. *Atomización de refrigerante.* Las gotitas de fluido suspendidas en el aire proporcionan un enfriamiento efectivo por medio de la evaporación del fluido, aunque puede ser necesario el enfriamiento separado mediante la inundación de la pieza de trabajo. Se deben tomar medidas para limitar el refrigerante suspendido en el aire, por ejemplo, por medio de inhibidores.

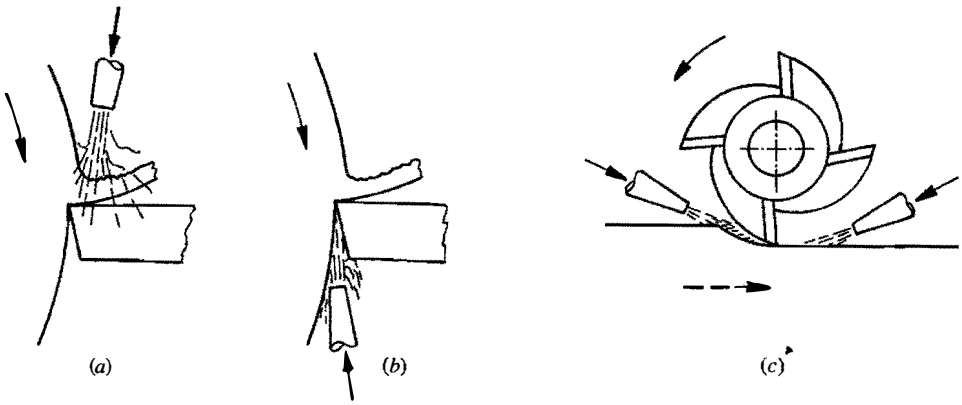


Figura 16-12 Los fluidos de corte normalmente se aplican (*a*) a la viruta, aunque (*b*) se obtiene mejor enfriamiento colocándolos en la cara del flanco. En el fresado, (*c*) un chorro adicional retira la viruta. (*De J.A. Schey: Tribology in Metalworking, ASM International, 1983, p. 633. Con permiso.*)

5. *Tratamiento de lubricantes y virutas.* Los principios del cuidado del lubricante dados en la sección 8-2-4 también se aplican aquí. Los sistemas de recirculación pueden ser pequeños para máquinas herramientas individuales o instalaciones integradas muy grandes para una planta completa. En cualquier caso, la calidad del lubricante se debe monitorear cuidadosamente, así como mantener una cantidad adecuada de aceite o de agua. Como el desecho es cada vez más difícil y costoso, se seleccionan fluidos que se reciclan más fácilmente. En algunos procesos, como en el fresado y en la formación de engranes con cortadores de carburo, el maquinado en seco también está en crecimiento. La filtración separa las virutas y los finos del lubricante/refrigerante, pero las virutas casi son inútiles si están mezcladas y aceitosas. Las virutas mantenidas cuidadosamente segregadas y desaceitadas en un centrífugo pueden regresarse para su reciclado.

16-1-8 Vida de las herramientas

En los procesos de deformación (Caps. 9 y 10), la vida de las herramientas se mide en miles de piezas o en semanas u horas de operación, y la preocupación sobre el desgaste a menudo es opacada por las consideraciones de la presión en la matriz o la fluencia del material. En contraste, el desgaste de la herramienta es la inquietud dominante en el corte de metal. Esto no es sorprendente, ya que la herramienta de masa relativamente pequeña se somete a presiones y temperaturas altas y con frecuencia también a cargas de impacto. Es común que la vida de las herramientas sea del orden de decenas de minutos, y sólo duran horas en líneas para la producción en masa. Por lo tanto, la economía del proceso es controlada en gran medida por la *vida de la herramienta.*

Desgaste de la herramienta Como se podría esperar, el *desgaste de la herramienta* puede tomar varias formas (Fig. 16-13), y todos los mecanismos de desgaste que se analizaron en la sección 4-9-2 desempeñan una función.

1. *Desgaste del flanco.* La fricción intensa en la cara de alivio de la herramienta sobre la superficie recién formada de la pieza de trabajo resulta en la formación de un campo de desgaste. La rapidez del desgaste se caracteriza al interrumpir el corte y medir el ancho promedio del campo de desgaste *VB* (Fig. 16-13*a*). Después de un desgaste rápido durante los primeros segundos, éste se asienta hasta una tasa de desgaste de estado estable, sólo para acelerar de nuevo hacia el final de la vida de la herramienta (Fig. 16-13*b*). El desgaste del flanco se debe comúnmente a mecanismos tanto abrasivos como adhesivos, y es indeseable porque el control dimensional se pierde, el acabado superficial se deteriora y la generación de calor aumenta. No obstante, éste es el modo normal de desgaste.

2. *Desgaste de muesca.* A menudo una muesca o surco de profundidad *VN* se forma a la altura de la línea de corte, donde la herramienta roza contra el hombro de la pieza de trabajo (Fig. 16-13*a*). Es frecuente que la abrasión por capas superficiales se acelere a través de la oxidación u otras reacciones químicas. En el límite, el desgaste de muesca puede conducir a la falla total de la herramienta.

3. *Desgaste de cráter.* Las altas temperaturas generadas en la cara de ataque (Fig. 16-11*a*) se combinan con altos esfuerzos de cortante para crear un cráter a una cierta distancia del filo de la herramienta. El desgaste se cuantifica midiendo la profundidad *KT* o el área de la sección transversal del cráter perpendicular al borde de corte. El desgaste de cráter progresa linealmente bajo la influencia de la abrasión, de la adhesión seguida por el arrastre de material de la herramienta, de la difusión, del ablandamiento térmico y de la deformación plástica. El desgaste de cráter por sí mismo no es dañino; en efecto, se puede desarrollar una acumulación estable en el filo, y entonces la herramienta actúa como si tuviera un ángulo de ataque positivo mayor (Fig. 16-14*a*). Sin embargo, el desgaste de cráter conduce a la falla catastrófica del filo; por ello, el desgaste de cráter generalmente se evita.

4. *Redondeo del filo.* El filo de corte principal se redondea debido a la abrasión. Entonces, el corte procede con un ángulo de ataque cada vez más negativo hacia la raíz del corte (Fig. 16-14*b*). Cuando el espesor de la viruta sin deformar es pequeño, la acción del corte puede parar y toda la energía se emplea en la deformación plástica o elástica de la pieza de trabajo. A altas velocidades de corte (temperaturas elevadas) y altas presiones de la herramienta, el filo de ésta puede deformarse plásticamente; la nariz de las herramientas de HSS se puede perder completamente. Es factible minimizar los problemas con el redondeado del filo, al menos cuando se emplean herramientas duras, esmerilando con un ángulo de ataque doble (también llamada campo T, Fig. 16-14*c*), de manera que el corte procede con una acumulación estable en el borde. Como las fuerzas de corte son mayores, la máquina herramienta debe ser muy rígida.[4]

5. *Despostillado del filo.* Esto se provoca con el rompimiento periódico de la acumulación en el filo, o cuando se usa una herramienta frágil en cortes interrumpidos. El acabado superficial sufre y la herramienta finalmente se puede romper.

---

[4] T. Hoshi, en *Cutting Tool Materials*, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1981, pp. 413-426.

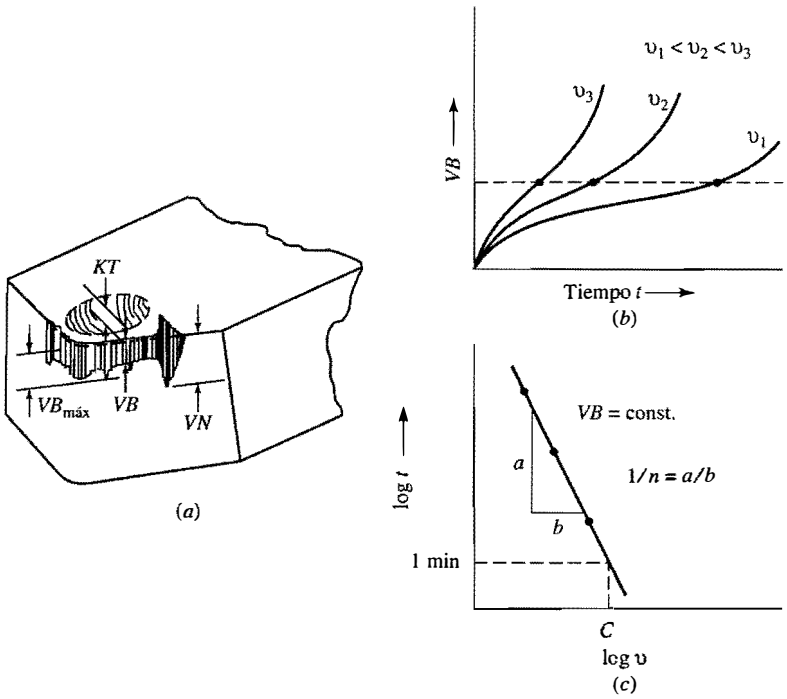


Figura 16-13 El desgaste en el flanco y de cráter (*a*) se puede caracterizar por las dimensiones mostradas. (*b*) De la progresión del desgaste del flanco (*c*) se pueden extraer las constantes *C* y *n* de la vida de la herramienta.

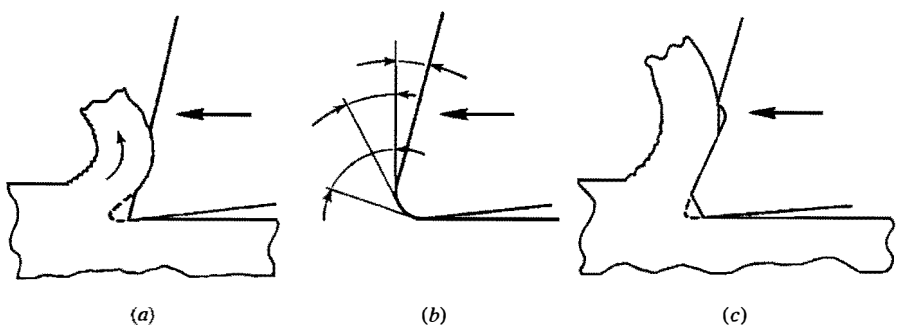


Figura 16-14 La forma del filo de la herramienta tiene efectos significativos: (a) los rompedores de viruta del tipo de acanaladura promueven la acumulación en el filo, (*b*) el redondeado del filo de la herramienta por el desgaste resulta en ángulos de ataque cada vez más negativos hacia la cara del flanco; (*c*) un ángulo de ataque pequeño, negativo, esmerilado en la nariz fomenta la formación de una acumulación estable.

6. *Agrietamiento del filo.* La carga mecánica cíclica conduce a grietas paralelas al filo, en tanto que la fatiga térmica causa que las grietas se formen perpendiculares al filo de corte de las herramientas frágiles (*grietas de peine*).

7. *Falla catastrófica.* Las herramientas de materiales más frágiles están sujetas a fallas repentinas (fractura). Éste es un problema de todos los materiales frágiles, especialmente cerámicos, en cortes interrumpidos. Los procesos mejorados de manufactura, el ángulo de ataque cero o negativa y la selección de las condiciones de maquinado adecuadas ayudan a evitar la falla.

Los fluidos de corte se fabrican para extender la vida de la herramienta, aunque bajo ciertas condiciones (reacciones químicas, o esfuerzo térmico en cortes interrumpidos) pueden acortarla.

Criterios de vida de la herramienta La vida de la herramienta afecta la elección de herramientas, de las condiciones del proceso, de la economía de la operación y de la posibilidad de automatización y control por computadora. Desgraciadamente, no es posible dar una definición simple de la vida de la herramienta: ésta se debe especificar con la adecuada consideración a los objetivos del proceso. Así, en las operaciones de terminado la calidad superficial y la precisión dimensional son las más importantes; en el desbaste, se puede tolerar un deterioro mayor de la calidad superficial y de la precisión dimensional, a cambio de una alta tasa de remoción del metal; un límite absoluto se alcanza cuando las fuerzas de corte se incrementan hasta valores suficientemente altos para causar la fractura de la herramienta.

Todas estas consideraciones se traducen en algunos valores fácilmente medibles. Muy frecuentemente, el desgaste del flanco VB o $VB_{máx}$ (Fig. 16-13*a*) se especifica como el final de la vida útil de la herramienta:

Herramientas HSS, desbastado	$VB_{máx} = 1.5$ mm
Acabado	$VB = 0.75$ mm
Herramientas de carburo	$VB = 0.4$ mm (o $VB_{máx} = 0.7$ mm)
Herramientas de cerámico	$VB_{máx} = 0.6$ mm

Otros criterios incluyen un desgaste específico de cráter, pérdida total del filo o de la nariz de la herramienta, o desgaste total de volumen (flanco y cráter).

La vida de la herramienta se considera como el tiempo (en minutos) que le toma alcanzar el criterio específico de desgaste bajo determinadas condiciones del proceso (velocidad, avance, profundidad del corte), aunque para la producción en masa en líneas de transferencia es necesaria que la vida de las herramientas sea de horas. Para herramientas como taladros y machuelos, una medida más práctica es el número de barrenos taladrados o roscados bajo condiciones específicas.

Predicción de la vida de la herramienta Aunque varios mecanismos de desgaste entran en juego, el desgaste gradual se produce por mecanismos dependientes de la temperatura (incluso el desgaste abrasivo se acelera debido a la temperatura, ya que la resistencia mecánica y la resistencia a la abrasión de la herramienta bajan a altas tempe-

raturas). Ya se vio que las temperaturas se ven afectadas en gran medida por la velocidad de corte [ecuación (16-18)], y se sabe que el desgaste gradual es una función de la distancia de fricción, la cual, para una velocidad de corte dada, es proporcional al tiempo. Se debe esperar que, para un criterio de vida de la herramienta dado, como el desgaste del flanco, ese lapso decrezca como una función de la velocidad. Taylor[5] fue el primero en observar que la relación sigue una ley de potencias

$$v t^n = C \tag{16-19}$$

donde v es la velocidad de corte (m/min o ft/min), t la vida de la herramienta (min) y C la velocidad de corte para una vida de la herramienta de un minuto. Hablando estrictamente, la ecuación se debe escribir como

$$v t^n = C t_{\text{ref}}^n \tag{16-19'}$$

donde $t_{\text{ref}} = 1$ min.

Por consiguiente, existe una relación lineal en que la vida de la herramienta se grafica contra la velocidad en una escala log-log (Fig. 16-13*c*). Como el corte de metal es un sistema complejo, las constantes también dependen de diferentes variables. No obstante, C es básicamente una constante para un material dado de la pieza de trabajo, en tanto que el *exponente de Taylor n* [no confundirse con el exponente del endurecimiento por deformación de la ecuación (8-4)] es característico del material de la herramienta. Su valor está por lo general entre 0.08 y 0.1 para HSS. entre 0.25 y 0.4 para carburos cementados, va de 0.4 a 0.6 para carburos recubiertos y de 0.5 a 0.7 para herramientas cerámicas. Sin embargo, note que en el maquinado de alta velocidad la vida de la herramienta puede ser mucho más larga que la predicha por la ecuación de Taylor; como las temperaturas altas estabilizan la zona de corte secundaria, el material adherido protege a la herramienta del desgaste abrasivo y difusional. Sólo cuando la velocidad aumenta adicionalmente desaparecerá la capa de protección, seguida de un rápido incremento en el desgaste. Un recubrimiento de la herramienta que evite la difusión, representa una protección para velocidades mayores.

Una mejor idea de la importancia del exponente de Taylor se obtiene al reacomodar la fórmula para expresar la vida de la herramienta:

$$t = \frac{K}{v^{1/n}} \tag{16-20}$$

Se notará que para $n = 0.1$, la vida de la herramienta decrece extremadamente rápido con la décima potencia de la velocidad.

La generación de calor se ve afectada por la entrada total de calor (o entrada de energía), la cual aumenta con el espesor de la viruta sin deformar h y con el ancho de la viruta (o profundidad del corte) w. La fórmula de Taylor se puede ampliar para tomar en cuenta estos factores:

---

[5] F.W. Taylor, *Trans. ASME*, **28**: 31-279, 1907.

$$t = \frac{K}{v^{1/n_1} f^{1/n_2} w^{1/n_3}} \tag{16-21}$$

donde, en general, $n_1 < n_2 < n_3$. Estos exponentes no son completamente independientes uno del otro, y también influyen en ellos la geometría de la herramienta y el proceso. Los valores usuales para HSS son $n_1 = 0.1$, $n_2 = 0.18$, $n_3 = 0.45$. En consecuencia, para una tasa mayor de remoción del material (para el maquinado de alto desempeño), se prefiere elevar primero la profundidad del corte, luego el avance y, sólo al final, la velocidad. Por supuesto, cuando la vida de la herramienta está limitada por la falla catastrófica de la herramienta, la ecuación de Taylor es inútil y debe reemplazarse por un criterio de vida estadístico. Incluso cuando se emplea la ecuación de Taylor, la distribución estadística de la vida de las herramientas debe tomarse en cuenta, especialmente si la ecuación se emplea para programar cambios de la herramienta bajo control automático sin atención (computadora).

Ejemplo 16-6

Calcule el efecto de incrementar al doble la velocidad sobre la vida de la herramienta al maquinar con herramientas HSS, carburo, carburo recubierto y cerámicas.

Denote la velocidad inicial como v_1 y la velocidad al doble como v_2. Entonces, de la ecuación (16-19)

$$v_1 t_1^n = v_2 t_2^n \quad \text{y} \quad (t_2 / t_1) = (v_1 / v_2)^{1/n} = (1/2)^{1/n}$$

	n	t_2/t_1	t_1/t_2
HSS	0.1	0.001	1 024
WC	0.3	0.1	10
Carburo recubierto	0.4	0.177	6
Cerámica	0.5	0.25	4

El cambio es catastrófico para el HSS.

16-1-9 Calidad de la superficie

El maquinado tiene como objetivo crear una pieza de una geometría dada, con dimensiones y tolerancias dimensionales específicas. Para permitir la función adecuada de la pieza, también se especifica el acabado superficial (Secc. 3-5). Más allá de estas consideraciones geométricas, es importante que la superficie producida esté libre de defectos como grietas, que no tenga esfuerzos residuales dañinos y que no se someta a cambios metalúrgicos indeseables. Éstos son aspectos particularmente importantes cuando la pieza opera en un ambiente hostil, cuando se somete a carga por fatiga o cuando su falla podría tener consecuencias catastróficas. Con el crecimiento de tales aplicaciones críti-

cas, particularmente en la industria aeroespacial, el término *acabado superficial* ha adquirido un significado complejo.

Rugosidad superficial La superficie formada en el corte ortogonal (Fig. 16-1*a*) u *oblicuo* (Fig. 16-9*a*) simple es, idealmente, perfectamente lisa (la rugosidad es cero). Cuando una herramienta con radio R se mueve mediante el avance f entre cortes sucesivos (Fig. 16-10), la *rugosidad transversal ideal* se calcula tomando en cuenta la geometría (Fig. 16-15). La altura de pico a valle es

$$R_{máx} = \frac{f^2}{8R} \tag{16-22a}$$

El promedio aritmético para una rugosidad triangular es $R_a = R_{máx}/4$, de ahí que

$$R_a \approx \frac{f^2}{32R} \tag{16-22b}$$

La rugosidad longitudinal aún será cero. Se pueden desarrollar relaciones similares para otros procesos.

Superpuestas sobre la rugosidad ideal, hay características introducidas por el proceso mismo de formación de la viruta. Esto resulta en una rugosidad medible en dirección longitudinal, y en una modificación del perfil superficial (de ahí los valores de la rugosidad) en dirección transversal. Se pueden observar varias características:

1. Al cortar a velocidades muy bajas y típicamente también con toda formación discontinua de viruta, la superficie forma ondas (Fig. 16-5*a*) y se pueden generar grietas transversales a la dirección del corte.

2. Al cortar con una acumulación inestable, fragmentos muy endurecidos por deformación se sueldan a la superficie, cubriendo entre 5 y 10% de ella (Fig. 16-5*c*).

3. Cuando se forma una viruta continua sin acumulación en el borde, la configuración superficial es muy cercana a la ideal, aunque el desgaste localizado o el desposti-

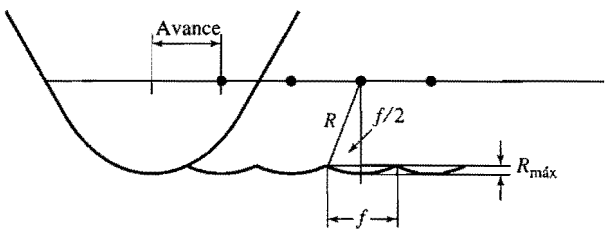


Figura 16-15 Un valor ideal de la rugosidad se puede calcular partiendo de la geometría definida por el radio de la nariz.

llado del filo de la herramienta proporciona un incremento de la rugosidad en dirección transversal (Fig. 16-5*b* y *d*).

4. El castañeo introduce una variación periódica de la geometría superficial, la cual es fácilmente visible como una ondulación en una huella registrada longitudinalmente (Fig. 3-19).

5. El acabado superficial cambia en el curso del corte y, en general, se deteriora con la progresión del desgaste. En efecto, la vida de la herramienta se especifica algunas veces como el tiempo en el cual se produce un acabado superficial aceptable.

Ejemplo 16-7

Una barra de acero sin maquinar (HB 200) se va a terminar por torneado a $R_a = 1.6$ μm con una herramienta de carburo. Sugiera las condiciones apropiadas de corte.

Se verá (Fig. 16-45 y tabla 16-5) que una alimentación adecuada sería $f = 0.38/2 = 0.19 = 0.2$ mm. De la ecuación (16-22*b*), $R_a = f^2/32(R_a) = 0.2^2/(32)(0.0016) = 0.78$ mm. Éste es el radio de nariz para una rugosidad ideal; para tomar en cuenta una rugosidad debida a la formación de la viruta, se usará una herramienta con un radio de la nariz mínimo de 1 mm.

Integridad superficial El término *integridad superficial* se introduce para indicar la ausencia de características indeseables en la superficie y en la región subsuperficial de la pieza de trabajo.

1. El endurecimiento por deformación de una capa superficial es una consecuencia natural de la formación de la viruta (Fig. 16-3). También se puede generar un esfuerzo residual que, la mayor parte de las veces, es de compresión y, en consecuencia, benéfico.

2. Las grietas formadas en el corte a baja velocidad son dañinas, como las que algunas veces se encuentran al cortar con una acumulación inestable en el filo.

3. El corte a altas velocidades de aceros tratables térmicamente puede resultar en calentamiento por arriba de la temperatura de transformación. A medida que la herramienta sale de la zona calentada, la masa fría de la pieza de trabajo templa la superficie a una rapidez suficientemente alta para que se forme martensita. Esas superficies transformadas son resistentes a agentes comunes de ataque químico y se les refiere, por lo tanto, como capas blancas. Como la martensita no revenida es muy dura y frágil, a menudo se forman grietas, si no durante el maquinado, entonces en el servicio. El peligro es más severo cuando se maquinan aceros templados y revenidos. El problema se agrava cuando el desgaste excesivo de la herramienta proporciona fuerzas grandes de fricción en el flanco. También está presente en el maquinado a alta velocidad con herramientas cerámicas, en que el ángulo de ataque negativo resulta en fuerzas normales grandes.

4. Las condiciones desfavorables de corte conducen a grandes esfuerzos residuales de tensión en la superficie.

Algunos aspectos de la integridad superficial pueden evaluarse sólo mediante ensayos destructivos bajo el microscopio, particularmente el MEB. Con base en esas pruebas, se especifican las condiciones de corte que aseguran una buena integridad superficial. Para las aplicaciones más críticas, se emplean técnicas de ensayos no destructivos (NDT), incluyendo análisis de rayos x para esfuerzos residuales.

16-2 MATERIAL DE TRABAJO

El análisis del proceso de corte de metal en la sección 16-1 aclaró que la respuesta de los metales debe depender del proceso en sí. Así, la maquinabilidad es una propiedad del sistema y no es posible una clasificación general de los materiales. No obstante, se acostumbra hablar de *maquinabilidad* como una propiedad del material, y en el sentido más general un material es altamente maquinable cuando se fabrican partes satisfactorias con él a bajo costo, con mínima dificultad.

16-2-1 Maquinabilidad

Una definición más cercana de la maquinabilidad requiere juicios cuantitativos. Hay diversas posibilidades.

1. A menudo se menciona un *índice de maquinabilidad* que es una clasificación promedio dada en comparación con un material de referencia: para aceros, un acero Bessemer B1112 de maquinado libre, muy similar al actual AISI 1212; para aleaciones con base de cobre, un latón al plomo de maquinado libre, y para aleaciones de aluminio, el aluminio 7075-T6. Se basa en la velocidad de corte al tornear para una vida de la herramienta de 60 min. El sistema puede ser engañoso, pues la clasificación es diferente para procesos distintos.

2. Una medida más cuantitativa es la *vida de la herramienta* hasta la falla total por despostillado o agrietamiento bajo condiciones específicas. Las especificaciones se basan en la velocidad de corte para una vida de la herramienta dada en minutos o segundos, o como el volumen del material removido para un criterio dado de vida de la herramienta.

3. Otra medida es el *desgaste de la herramienta.* Éste se puede relacionar con el desgaste gradual de la cara del flanco o con el desarrollo del cráter. Se da como el cambio en la dimensión de la pieza maquinada debido al desgaste por tiempo unitario para una velocidad de corte y alimentación determinadas, o como el tiempo necesario para desarrollar un desgaste estándar del campo del flanco. En otros casos se especifica la profundidad del cráter.

4. Otra medida cuantitativa es el *acabado superficial* que se produce a velocidades y alimentaciones de corte estandarizadas.

5. Otras clasificaciones se basan en la fuerza de corte, en la potencia, la temperatura o en la formación de la viruta.

Como la maquinabilidad es una propiedad del sistema, todas las partes de éste deben definirse bien si se van a obtener datos reproducibles y relevantes. Los principios de esas pruebas se definen en la norma ISO Standard 3685-1993, "Prueba de la vida de la herramienta con herramientas de torneado de un solo punto". La evaluación se basa en el desgaste de la herramienta. El desgaste se presenta como una función del tiempo cuando se prueba a una sola velocidad, y como curvas desgaste de la herramienta-tiempo (o constantes de Taylor) cuando se prueba a varias velocidades. La evaluación completa es tardada y costosa. Algunas pruebas abreviadas también están disponibles, aunque su validez suele ser limitada.

16-2-2 Materiales maquinables

Como la maquinabilidad tiene muchas facetas, está influida por una variedad de propiedades del material. Buena maquinabilidad puede significar uno o más de los siguientes aspectos: corte con energía mínima, desgaste mínimo de la herramienta, buen acabado superficial. Esto significa que:

1. Un material de baja ductilidad es deseable, de manera que la separación de la viruta ocurra después de un corte mínimo y se rompa fácilmente. Esto es exactamente lo opuesto a lo que se busca en la deformación plástica (Secc. 8-2-6); así, ahora las propiedades deseables incluyen un exponente bajo del endurecimiento por deformación (n), mínima resistencia para la formación de vacíos, y por lo tanto una baja reducción del área (q) y una baja tenacidad a la fractura.

2. Para minimizar la energía de corte, la resistencia al corte o —cuya medición es más practicable— la resistencia (TS) y la dureza del material deben ser bajas.

3. Una unión metalúrgica fuerte entre la herramienta y la pieza de trabajo, normalmente expresada como adhesión (Secc. 4-9-2), es indeseable cuando también promueve difusión y debilitamiento del material de la herramienta por agotamiento de los elementos de aleación. Sin embargo, cuando ocurre la difusión, la adhesión alta ayuda a estabilizar la zona secundaria de corte.

4. Los compuestos muy duros (como algunos óxidos, todos los carburos, muchos compuestos intermetálicos y elementos como el silicio) embebidos en el material de la pieza de trabajo actúan como herramientas de corte por sí mismos y aceleran el desgaste de la herramienta. Son particularmente dañinos cuando están en forma de laminillas con bordes agudos.

5. Las partículas suaves de segunda fase o que se suavizan a las altas temperaturas alcanzadas en la zona de corte son benéficas porque promueven el cortante localizado y contribuyen al rompimiento de la viruta, haciendo al material de libre maquinado. Debido a su baja resistencia al cortante, esas inclusiones también reducen la energía empleada en la zona secundaria de corte, y algunas incluso actúan como lubricantes internos que se embarran en la cara de ataque. Así, la fuerza y la energía de corte también disminuyen.

6. La alta conductividad térmica es útil al mantener bajas las temperaturas de corte (Secc. 16-1-6).

7. Un bajo punto de fusión del material de la pieza de trabajo significa que las temperaturas de corte también permanecerán bajas, menores que la temperatura a la cual la herramienta se suaviza o reacciona con la pieza de trabajo.

Las propiedades anteriores se deben examinar sobre un rango de temperaturas. Una temperatura mayor disminuye la resistencia al corte del material, haciendo posible el maquinado de algunos materiales muy difíciles. En efecto, en casos especiales la tasa de remoción del metal se puede aumentar en gran medida a través del calentamiento localizado de la pieza de trabajo, sólo un poco delante de la zona de corte. Para prevenir la disipación del calor, la tasa de calentamiento debe ser alta, comúnmente proporcionada por el calentamiento por inducción o con la ayuda de un arco de plasma o un láser. Sin embargo, las altas temperaturas tienen los efectos colaterales indeseables de adhesión aumentada y difusión acelerada, y la vida de la herramienta puede disminuir drásticamente. Si éste es el caso, se hace todo lo posible para mantener la zona de trabajo fría con grandes cantidades de fluido de corte.

Ciertos requisitos rara vez se satisfacen de forma simultánea. Algunos de los materiales más dúctiles favorecidos para deformación plástica son difíciles de maquinar debido a su ductilidad. Aún más difíciles son los materiales dúctiles pero que también presentan alta resistencia. Los materiales de dos fases son a menudo deseables porque la ductilidad se ve afectada por la presencia de partículas planas o, en general, partículas agudas de segunda fase, especialmente si también son frágiles y de baja resistencia (Secc. 6-3-2). En muchos casos es económico llevar el material hacia una condición más maquinable por medio del control metalúrgico (normalmente con un tratamiento térmico), y tratarlo térmicamente de nuevo después del maquinado para impartir las propiedades de servicio requeridas.

16-2-3 Materiales ferrosos

El rango completo de maquinabilidad se encuentra en los materiales ferrosos.

Aceros al carbono El término *acero al carbono* se aplica a una gran variedad de materiales, variando del hierro de muy bajo carbono al acero hipereutectoide. Estos aceros están disponibles comercialmente en tres formas diferentes (Fig. 16-16):

1. En la condición completamente recocida; la resistencia aumenta en tanto que la ductilidad disminuye con el incremento de las cantidades de carburo presentes en la forma perlítica laminar.

2. Tratados térmicamente para llevar al carburo a una forma esferoidal; un acero esferoidal tiene baja resistencia y alta conductividad (considere la Fig. 6-15, *3a versus 2c*).

3. Trabajados en frío (por lo general estirados en frío); la resistencia es mayor y la ductilidad disminuye, en tanto que el acabado superficial y las tolerancias se mejoran.

Con esta base, se elige fácilmente el tratamiento óptimo que asegura la mejor maquinabilidad para un contenido de carbono dado (Fig. 16-16). A niveles bajos de carbo-

no (en general por debajo de 0.2% C), el material recocido es demasiado dúctil, y el material trabajado en frío con su baja ductilidad ofrece la mejor maquinabilidad. A niveles intermedios de carbono (normalmente hasta 0.45% C), la resistencia del material trabajado en frío daría lugar a fuerzas excesivas de corte; se prefiere la perlita laminar con su menor ductilidad y resistencia moderada. A niveles de carbono aún mayores, las grandes cantidades de carburo presentes en la perlita laminar actúan como diminutas herramientas de corte y causan un desgaste abrasivo prematuro de la herramienta.

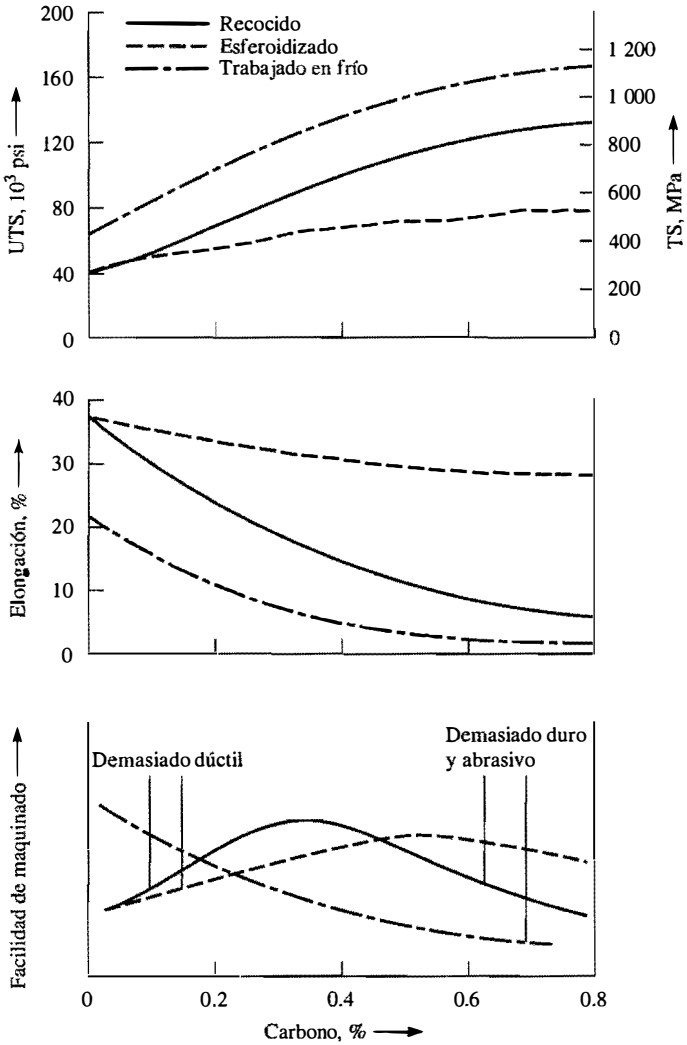


Figura 16-16 Los aceros al carbono, igual que muchos otros materiales, son más maquinables cuando se llevan a una condición que proporcione resistencia mínima combinada con ductilidad mínima.

Así, la condición esferoide con sus carburos globulares relativamente inofensivos y baja resistencia es preferible aunque la ductilidad sea mayor.

Aceros de maquinado libre Vastas cantidades de aceros al carbono se maquinan, y los esfuerzos dirigidos a mejorar su maquinabilidad han conducido al desarrollo de grados de maquinado libre. Contienen un elemento insoluble y suave, principalmente plomo (aceros al plomo) o azufre elevado (aceros resulfurados), que forma inclusiones de MnS de forma globular controlada. Desde el punto de vista del servicio, consecuencias indeseables son la ductilidad (véase la Fig. 6-16) y la resistencia a la fatiga reducidas, y la resistencia a la tensión ligeramente disminuida. El desgaste de las herramientas de corte se puede reducir sin afectar las propiedades mecánicas del acero al usar calcio como agente de desoxidación; cuando esos aceros se cortan se forma un óxido complejo de baja resistencia al cortante en la cara de ataque.

Aceros aleados La dureza mayor de los aceros aleados incrementa el desgaste de la herramienta, especialmente si están presentes carburos en grandes cantidades. Para el control dimensional, estos aceros a menudo se maquinan en la condición completamente tratada térmicamente (templada y revenida) (*corte duro*); entonces los parámetros de corte se eligen para asegurar la integridad superficial. Para máxima productividad, se considera una gran profundidad de corte en el desbastado, y se emplean altas velocidades combinadas con una profundidad de corte y alimentación pequeñas por diente en el terminado, por lo general con herramientas de carburo revestido o de PCBN. También se producen mayores cantidades de aceros de metalurgia de polvos. La maquinabilidad se reduce porque la porosidad crea condiciones discontinuas de corte, temperaturas mayores y más desgaste. Las partes con más de 90% de densidad son más cercanas a los materiales forjados.

Aceros inoxidables La resistencia elevada y la baja conductividad térmica de los aceros inoxidables (tabla 4-1) resulta en temperaturas mayores de corte. La alta tasa de endurecimiento por deformación de los aceros austenísticos (ANSI serie 300, tabla 8-2) los hace más difíciles de maquinar. Los fluidos cortantes deben contener compuestos EP. Si es necesario, se pueden impartir propiedades de maquinado libre al alear.

Hierros fundidos La presencia de cementita primaria hace a los hierros fundidos blancos en muy difíciles de maquinar, y las zonas blancas en los hierros fundidos grafíticos son responsables de gran parte del desgaste y fractura de la herramienta. La maquinabilidad de los hierros fundidos grafíticos es una función de la forma y distribución del grafito y de la microestructura de la matriz.

1. Los hierros grises básicamente son de maquinado libre, ya que las láminas de grafito rompen la viruta. Sin embargo, la superficie maquinada es rugosa porque las partículas de grafito se rompen. Al refinar el tamaño de las partículas de grafito se mejora el acabado sin afectar las propiedades de maquinado libre. La vida de la herramienta disminuye con el incremento de la proporción de la perlita en la matriz, y es menor para la perlita más fina. Los mismos factores también contribuyen al aumento de la dureza, de ahí que la maquinabilidad decrezca al elevar la dureza. Los hierros grises a menudo se cortan en seco, pues las virutas finas tapan los filtros.

2. El hierro fundido con grafito compacto es un poco más difícil de maquinar.

3. El hierro fundido nodular es más dúctil y resistente pero, sorprendentemente, puede dar una mayor vida de la herramienta.

16-2-4 Materiales no ferrosos

Para continuar con la convención que se adoptó en las secciones 7-3 y 8-3, los materiales no ferrosos se analizan de acuerdo con el orden de su temperatura de fusión.

Materiales de bajo punto de fusión Sólo las aleaciones de zinc se maquinan en cantidades significativas. Su baja resistencia y ductilidad limitada los hacen altamente maquinables.

Aleaciones de magnesio La baja ductilidad imparte propiedades de maquinado libre, convirtiendo al magnesio en un material altamente maquinable. Las virutas finamente distribuidas se incendian espontáneamente, por lo tanto, el corte de acabado con espesores de las virutas menores de 25 μm siempre se hace con un fluido de corte con base de aceite. Las aleaciones Mg-Al forman una acumulación en el borde y se deben cortar con PCD o con aceite.

Aleaciones de aluminio El aluminio puro y sus aleaciones dúctiles se maquinan mejor en la condición de trabajados en frío, ya que su alta ductilidad los hace "rugosos" en la condición recocida: las fuerzas de corte son mayores que lo esperado debido a su dureza, y la alta adhesión conduce a un pobre acabado superficial. Las aleaciones endurecidas por precipitación se pueden maquinar fácilmente en la condición completamente tratada térmicamente (tratado por solución y envejecido); en la que su ductilidad es baja pero su resistencia no es excesivamente alta. La alta conductividad térmica y el bajo punto de fusión permiten altas velocidades de maquinado, aun con herramientas HSS, a condición de que se aplique un fluido de corte, el cual contiene aditivos de lubricación marginal, en abundancia. Son posibles velocidades muy altas (70 m/s) con carburos y, especialmente, PCD; el límite se fija por las capacidades de la máquina herramienta: el SiC no se puede usar debido a la solubilidad del Si en Al. Se pueden impartir propiedades de maquinado libre al añadir plomo, bismuto o estaño. Las fundiciones que contienen silicio elemental (aleaciones hipereutécticas de Al-Si) causan un desgaste rápido de la herramienta y se deben cortar con herramientas de PCBN o PCD.

Berilio El berilio se maquina fácilmente en seco, pero las partículas finas son tóxicas.

Aleaciones con base de cobre El cobre puro, como el aluminio, se maquina mejor en la condición de trabajado en frío. Esto también se aplica a las aleaciones de una sola fase que, no obstante, a menudo se pueden cortar con menos energía que el cobre puro. La disposición de la viruta es difícil. En contraste, los latones $\alpha + \beta$ se maquinan muy bien. Los aditivos para maquinado libre, normalmente plomo, hacen a todos los latones más maquinables, y el latón al plomo $\alpha + \beta$ sirve como referencia en la escala de maquinabilidad (Secc. 16-2-1). Los cobres de maquinado libre contienen plomo, azufre o

telurio; la viruta todavía puede ser continua, pero la fuerza de corte se reduce en gran medida y el acabado superficial se mejora. El plomo se reemplaza en aplicaciones donde es posible el contacto con alimentos.

Aleaciones y superaleaciones con base de níquel Para menor ductilidad, sería deseable cortar estas aleaciones en la condición de trabajadas en frío o completamente tratadas térmicamente. Sin embargo, su alta adhesión y baja conductividad térmica con frecuencia se combinan con alta resistencia, y esto exige su corte en la condición recocida o sobreenvejecida. El azufre se debe evitar en los fluidos de corte porque forma un eutéctico de bajo punto de fusión con el níquel.

Titanio La alta reactividad y por tanto la elevada adhesión del titanio, combinadas con su baja conductividad térmica, hace la formación de la viruta en discontinua en la mayoría de las velocidades y el maquinado es difícil. Para bajas velocidades las herramientas de HSS se usan con un aceite altamente aditivado o una emulsión. A velocidades mayores (30-60 m/min) se prefieren carburos cementados o cermets. Son mejores las alimentaciones más profundas porque el calor de la fricción se reduce y se transporta más calor en la viruta.

16-3 HERRAMIENTAS DE CORTE

Las características específicas de las herramientas de corte varían según el proceso, pero existen algunas básicas que son comunes a todas.

16-3-1 Materiales de la herramienta

El maquinado se puede considerar, en general, como una competencia para sobrevivir entre la pieza de trabajo y el material de la herramienta. Se ha mejorado la maquinabilidad de los metales, pero los agentes principales en los avances recientes en el maquinado se deben al desarrollo de materiales para herramientas. No sólo permiten la eliminación más rápida del material, sino que también facilitan el progreso en el diseño y en el control de las máquinas herramientas.

Se puede esperar que el material de la herramienta tenga propiedades opuestas a las de la pieza de trabajo:

1. La herramienta debe ser más dura que el componente más duro del material de la pieza de trabajo, no sólo a temperatura ambiente (tabla 16-3), sino también en la temperatura de operación. La alta *dureza en caliente evita* la deformación plástica, asegura que la geometría de la herramienta se mantenga bajo las condiciones extremas causadas por el proceso de formación de la viruta, y también ayuda a resistir el desgaste. Una idea del rango amplio de dureza en caliente se obtiene por medio de la figura 16-17.

2. La tenacidad es necesaria para sobrevivir a choques mecánicos (carga por impacto) en los cortes interrumpidos. El choque ocurre aun en los procesos de formación de viruta continua, cuando la herramienta encuentra una zona dura localizada.

Tabla 16-3 Dureza de materiales típicos para herramientas o de sus costituyentes*

Material o constituyente	Dureza, HV
Acero martensítico	500-1 000
Acero nitrurado	950
Cementita (Fe_3C)	850-1 100
Silicio	1 150
Recubierto duro de cromo	1 200
Granate	1 360
Alúmina	2 100-2 400
WC (aglutinado con Co)	1 800-2 200
WC	2 600
W_2C	2 200
$(Fe, Cr)_7C_3$	1 200-1 600
Mo_2C	1 500
VC	2 500
TiC	3 200
Si_3N_4	1 800
TiN	3 000
SiC	2 400
B_4C	3 700
Nitruro cúbico de boro	5 000
Diamante	8 000

*De varias fuentes; para la mayoría de los materiales, se reporta un rango amplio de valares de la dureza.

3. La resistencia al impacto térmico se requiere cuando ocurren calentamiento y enfriamiento rápidos en cortes interrumpidos. La alta conductividad térmica es preferible porque mantiene las temperaturas bajas en el área de contacto.

4. La baja adhesión al material de la pieza de trabajo ayuda a evitar la soldadura localizada. Paradójicamente, la alta adhesión es deseable cuando se va a estabilizar una zona secundaria de corte; sin embargo, entonces se necesita una *barrera de difusión.*

5. La difusión de los constituyentes de la herramienta en el material de la pieza de trabajo produce desgaste rápido; por ello, la solubilidad de la herramienta en el material de la pieza de trabajo debe ser baja.

La baja dureza y alta adhesión son indeseables porque permiten la distorsión del perfil de la herramienta, el redondeo de su nariz, el desgaste gradual del flanco y, combinados con la difusión, el desgaste de cráter. La tenacidad y la resistencia al impacto térmico inadecuadas conducen la ruptura del borde e incluso a la fractura total. Desafortunadamente, la dureza y la resistencia térmica de los materiales se pueden incre-

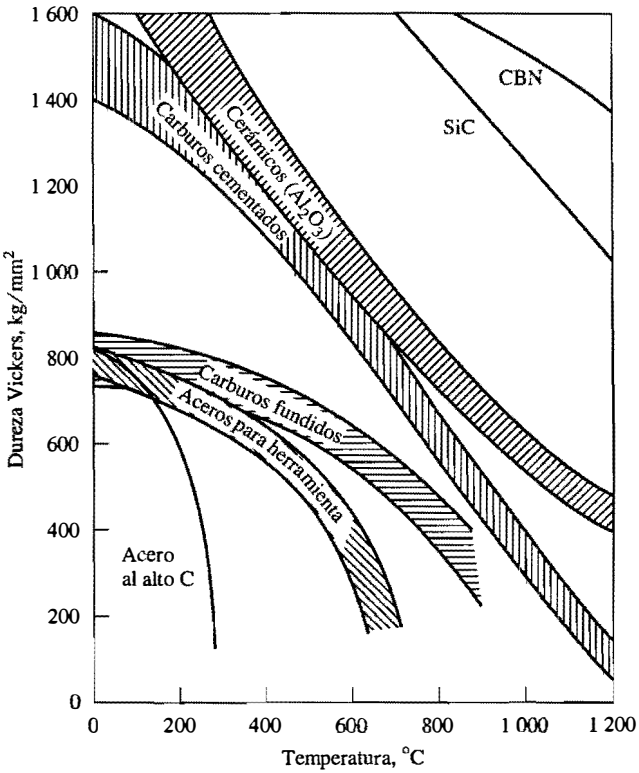


Figura 16-17 Las altas temperaturas que se desarrollan en el corte de materiales duros a altas velocidades las resisten mejor algunos materiales para herramienta. (*De J.A. Schey, Tribology in Metalworking, ASM International, 1983, p. 113. Con permiso.*)

mentar, en general, solamente a costa de la tenacidad; por lo tanto, no existe un material óptimo para herramientas de corte. Los avances recientes a menudo se basan en la combinación de las propiedades deseables de un sustrato y de un recubrimiento. A continuación, se analizan los materiales de herramienta más importantes en orden ascendente de su resistencia a la temperatura.

Aceros al carbono Los aceros al carbono derivan su dureza de la transformación martensítica. La martensita se suaviza (reviene) por arriba de 250°C; así que los aceros al carbono son adecuados solamente para maquinar materiales suaves como madera, y a tasas bajas de producción. Sin embargo, son duros y mantienen un filo agudo, por lo que, las legras cónicas manuales de acero al alto carbono algunas veces se fabrican para el corte de metal.

Acero de alta velocidad (HSS) La mayor parte de los aceros para herramienta está en la categoría de *acero de alta velocidad* (HSS). Los dos grupos principales son los

tipos al molibdeno (M1, M2, etcétera, típicamente con 0.8% C, 4% Cr, 5-8% Mo, 0-6% W y entre 1 y 2% V) y al tungsteno (como T1, con 0.7C-4Cr-18W-1V). Los carburos formados con los elementos aleantes constituyen entre 10 y 20% del volumen, permiten calentamiento y enfriamiento repetidos hasta 550°C sin pérdida de dureza. Temperaturas aún mayores son permisibles al agregar de 5 a 8% de Co, algunas veces acoplado con un contenido elevado de carbono (grados M40 y T15).

Todos estos aceros se pueden laminar o forjar en caliente hasta una dimensión desde la que la herramienta de corte se puede manufacturar fácilmente, en la condición recocida, por medio de técnicas convencionales de maquinado. Antes del esmerilado final, se someten a un tratamiento térmico que imparte gran resistencia y alta dureza (HRC 63 y más) acopladas con una tenacidad razonable. Se puede afilar repetidamente. Son importantes para la industria del corte de metal, especialmente para brocas, legras, escariadores y otras clases de herramientas con forma (Fig. 16-18). Los avances en las técnicas de fundición y vaciado han mejorado su calidad; algunos grados se fabrican al consolidar polvo prealeado atomizado (Secc. 11-6), asegurando una distribución más uniforme de los carburos más finos y permitiendo una concentración mayor del elemento aleante.

Los recubrimientos superficiales tienen una función cada vez mayor. El revenido con vapor (*pavonado*) crea una capa dura y porosa de Fe_3O_4 que aumenta la vida de la

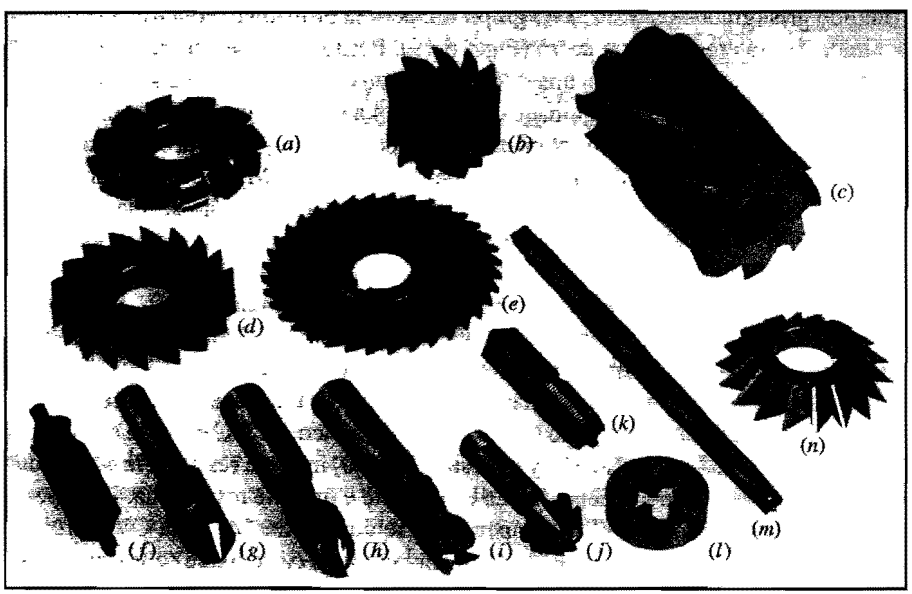


Figura 16-18 Algunas herramientas de acero para alta velocidad (HSS) comúnmente encontradas: (*a*) cortadora de dientes de engranes, (*b*) fresa con extremo de concha, (*c*) fresa plana, (*d*) fresa de extremo, (*e*) fresa de ranura, (*f*) broca para centrado (con avellanador combinado), (*g*) avellanadora, (*h*) fresa con extremo de bola, (*i*) cortador recto, (*j*) cortador angular, (*k*) machuelo, (*l*) tarraja, (*m*) escariador y (*n*) cortador angular.

herramienta. Más efectivos son la nitrurización y, especialmente, el recubrimiento por PVD con TiN, de color dorado, que (Secc. 19-6) reduce la fricción y minimiza la formación de la acumulación en el borde. El recubrimiento de TiC color negro se deposita a alta temperatura mediante CVD (Secc. 19-7), y la herramienta se debe tratar térmicamente de nuevo. Los recubrimientos de carburo de cromo son mejores para cortar Ti y también se usan para Al. Los recubrimientos incrementan de dos a seis veces la vida de la herramienta.

Carburos fundidos Cuando los carburos alcanzan proporciones muy altas, el material de la herramienta ya no es trabajable en caliente y se debe fundir para formarlos. La matriz de los *carburos fundidos* (alrededor de 45%) es por lo general una aleación de cobalto en la cual se embeben carburos de Cr y W, formados con 2 a 3% C. El suavizado es gradual (Fig. 16-17) y son permisibles mayores velocidades de corte, pero la ductilidad y la tenacidad se reducen mucho.

Carburos cementados Los *carburos cementados* producidos por medio de técnicas de metalurgia de polvos (Secc. 11-6) han logrado una posición dominante. Normalmente la matriz es de cobalto, de 3 a 6% para mayor dureza, y de 6 a 15% para alta tenacidad. Los grados de carburo se clasifican de acuerdo con códigos desarrollados en varios países (por ejemplo, el sistema C en Estados Unidos) y por la ISO (ISO 513-91). La fase del carburo se puede hacer completamente de WC para el corte de metales no ferrosos e hierro fundido gris (grados C1 y C2; ISO grupo K), pero la difusión conduciría a la formación rápida de cráteres al cortar acero (Fig. 16-19). Por lo tanto, se agrega de 10 a 40% TiC o TaC (o ambos), que forman una interfase rica en carburo resistente a la difusión, a los grados destinados para el maquinado de acero (C4 a C8; ISO grupo P). El hierro fundido maleable y esferoide presenta el mismo riesgo de difusión y se corta con grados para corte de acero. Los carburos de propósito general (ISO grupo M) contienen cantidades más pequeñas de carburos mezclados. Los carburos cementados sólo se suavizan gradualmente (Fig. 16-17) y funcionan óptimamente a altas temperaturas (más de 600°C).

Carburos revestidos Idealmente, la herramienta debe poseer una superficie muy dura, no reactiva, que también actúe como una barrera de difusión, pero debe tener una base de suficiente tenacidad a la fractura para permitir cortes interrumpidos. Los *carburos revestidos* logran este objetivo combinando las virtudes de una base de WC cementado con las de un recubrimiento delgado (5 μm) de un cerámico. El TiC eleva la resistencia al desgaste, el TiN reduce la fricción y adhesión, el Al_2O_3 imparte resistencia a la oxidación y a la abrasión, el TiAlN tiene dureza en caliente e imparte resistencia. La deposición (Cap. 19) es mediante PVD a temperaturas relativamente bajas; la CVD proporciona mejor enlace al sustrato, pero las altas temperaturas causan que se forme la fase frágil η y esto reduce la resistencia transversal a la ruptura. Por lo general se depositan varias capas una arriba de la otra para cumplir por varias funciones (por ejemplo, una capa de base de TiC, seguida por Al_2O_3 y TiN). Las capas múltiples alternantes de grano fino de dos o más tipos de recubrimiento incrementan la vida de la herramienta a altas velocidades. Una idea de los beneficios de los carburos revestidos se forma a partir de la figura 16-20. Éstos han capturado 80% del mercado y se usan ampliamente en el torneado y fresado de producción de aceros y de hierros fundidos.

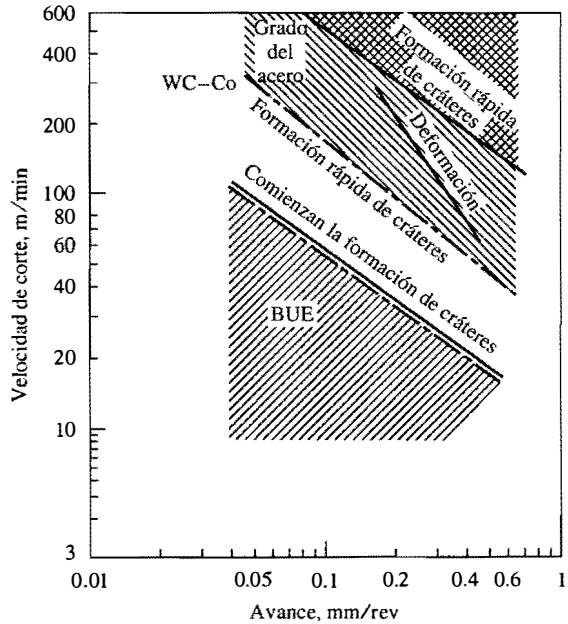


Figura 16-19 El mecanismo dominante de desgaste es una función de la velocidad de corte y del avance en el corte de acero 0.4% C de HV 200. [*Según E.M. Trent, Inst. Prod. Eng. J.*, **38**: *105-130 (1959). Con permiso de la Institution of Production Engineers, London.*]

Cermets Los carburos cementados son una subclase de *cermets*, cerámicos aglutinados en una fase metálica (Secc. 11-6). Para el corte del acero y del acero inoxidable, el TiC aglutinado con níquel y molibdeno ha ganado aceptación. Una mejor conductividad térmica y mayores velocidades de corte caracterizan a los grados mezclados de TiC-TiN, y a menudo se emplean para el acabado a alta velocidad y para el maquinado de partes de forma casi neta.

Herramientas cerámicas Los *cerámicos* como el Al_2O_3 se utilizan no únicamente como recubrimientos; se pueden fabricar a través del sinterizado o de prensado en caliente insertos sólidos para herramientas. Como se autosinterizan (con la ayuda de un auxiliar de sinterizado, pero sin un aglutinante metálico), son adecuados para velocidades muy altas, aunque sólo con cargas ligeras y continuas. Sin embargo, se han hecho grandes mejoras en la confiabilidad de estas herramientas, y su intervalo de aplicación está creciendo. Las herramientas de Al_2O_3 reforzadas con 25 y 40% de bigotes de SiC, y las hechas con nitruro de silicio (Si_3N_4) y cerámicos Si-Al-O-N (sialón), son más tenaces y resistentes al desgaste, y se pueden emplear para cortes interrumpidos. Se usan extensamente en el corte de superaleaciones, hierro fundido gris, y el sialón también para acero.

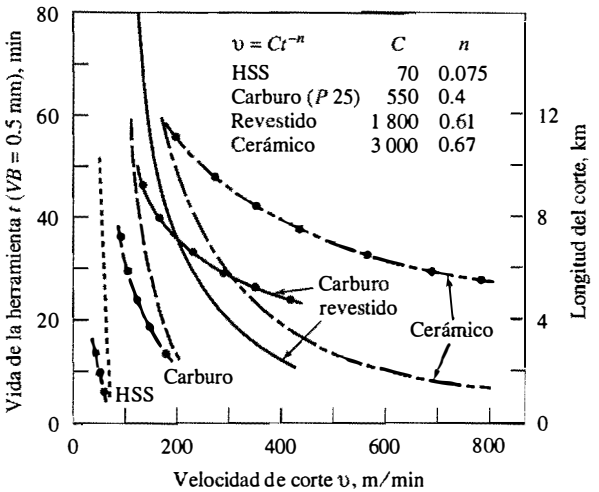


Figura 16-20 La vida de la herramienta se incrementa y la longitud de la viruta que se puede cortar aumenta en gran medida usando herramienta de carburo revestido o cerámicas para cortar acero. [*R. Abel y V. Gomell, Ind. Anz.*, **102**: *27-30 (1980). Con permiso de Verlag W. Giradet, Essen, Germany.*]

Nitruro de boro cúbico policristalino (PCBN) Hecho por medio de técnicas de alta temperatura y alta presión similares a las que se usan para fabricar diamantes sintéticos, el *nitruro de boro cúbico* (CBN) tiene una dureza sólo superada por el diamante (tabla 16-3). Su gran ventaja es que no sufre desgaste difusivo en el corte de materiales ferrosos. Se puede sinterizar formando una capa de 0.5 mm de espesor sobre una base de carburo cementado, o se pueden hacer insertos con o sin un aglutinante cerámico (por ejemplo, TiN para resistencia térmica). Los insertos con un contenido alto de CBN (> 70%) son duros y tienen alta conductividad térmica, por lo que son adecuados para cortar hierro fundido y superaleaciones. Los contenidos mayores de aglutinante elevan la tenacidad y reducen la transferencia de calor, una ventaja en el torneado duro del acero tratado térmicamente en que, si se conduce apropiadamente, el calor se disipa en la viruta. Pueden reemplazar al esmerilado, produciendo un acabado superficial con una rugosidad R_a = 0.4 μm o mejor. Regularmente no se utiliza refrigerante, en especial en cortes interrumpidos en que el impacto térmico reduciría la vida de la herramienta. Tienen cada vez más aplicaciones en partes de forma casi neta; ya que la profundidad del corte es pequeña, la alimentación debe incrementarse, ya que las virutas muy delgadas no se llevan calor suficiente y no se rompen en segmentos suficientemente cortos.

Diamante policristalino (PCD) El material más duro, el *diamante*, se ha usado por mucho tiempo en forma de monocristales naturales para el acabado de aluminio y de

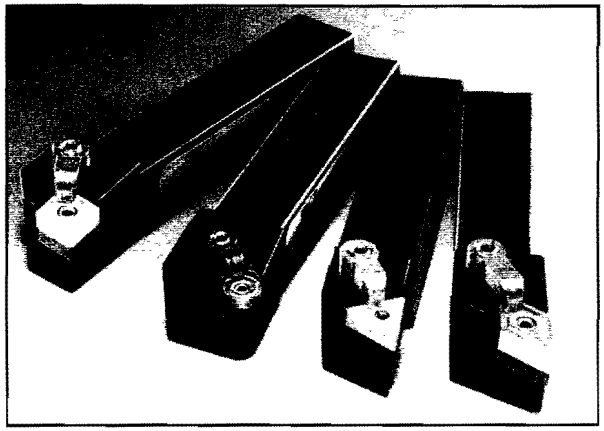


Figura 16-21 Las herramientas de torneado tienen insertos de carburo revestido sujetos a los portaherramientas. (*Cortesía de Kennametal, Latrobe, Pennsylvania.*)

otros materiales no ferrosos a alta velocidad. El diamante natural sufre de falla temprana impredecible, y los monocristales manufacturados proporcionan un desempeño más confiable. Las puntas policristalinas de herramientas se encuentran disponibles como insertos autosinterizados o como capas de 0.5 mm de espesor sinterizadas en una base de carburo. El diamante también se aplica mediante CVD como un recubrimiento con grosor < 50 μm para brocas. El diamante sobrepasa a los otros materiales en piezas de trabajo altamente abrasivas, como aleaciones hipereutécticas Al-Si. No obstante, a altas temperaturas cambia a grafito, el cual se difunde en hierro; por lo tanto, no es adecuado para el corte de acero.

16-3-2 Construcción de herramientas

Los aceros de alta velocidad tienen una tenacidad suficiente para fabricar herramientas *monolíticas* (de una sola pieza) (Fig. 16-18). Se pueden fabricar herramientas sólidas con carburos cementados y con cermets, pero el riesgo de fractura total es grande y el costo puede ser alto. Por lo tanto, su aplicación más amplia es en la forma de *insertos* para herramienta, que están soldados o sujetos (Fig. 16-21) a un cuerpo tenaz de acero. Las cortadoras especialmente construidas (*cortadoras posicionables*, Fig. 16-22) permiten mover el inserto para compensar el desgaste, y de esta manera se usan durante periodos prolongados. Las herramientas cerámicas siempre se fabrican como insertos.

El acero de alta velocidad y muchas herramientas de carburo cementado se afilan varias veces en el taller. Algunas herramientas de carburo y la mayor parte de las cerámicas son del tipo desechable y se fabrican para tener varios filos de corte disponibles (Figs. 16-8*c* y 16-21).

Como se analizó en la sección 16-1-1, un ángulo de ataque positivo grande acorta la zona de corte y reduce el consumo de energía. Esto también debilita a la herramienta;



Figura 16-22 Esta fresadora plana ajustable tiene insertos de carburo para desbaste, e insertos planos (reemplazados por insertos falsos durante el desbaste) para el acabado. El espaciado desigual de los insertos minimiza el castañeo. (*Cortesía de Ingersoll Cutting Tool Company, Rockford, Illinois.*)

por lo que grandes ángulos de ataque eran permisibles sólo para cortar materiales de baja resistencia. Sin embargo, la tenacidad de los materiales de herramienta se mejora continuamente, y se fabrican más cortadoras de torneado y fresado con un ángulo positivo de ataque. Los materiales para herramienta más frágiles aún se producen con un ángulo de ataque positivo pequeño, cero, o incluso negativo. Entonces, un inserto de corte con tres esquinas puede tener seis filos de corte utilizables (como en la Fig. 16-21). Los filos de los materiales frágiles para herramienta se achaflanan para incrementar su resistencia; de esta manera se desarrolla un ángulo negativo aun en una herramienta con ángulo positivo de ataque (como en la Fig. 16-14*c*). Los insertos con ataque positivo en portaherramientas con ataque negativo combinan las ventajas de ambos. Al cortar con un ángulo negativo de ataque, la fuerza que empuja la herramienta hacia fuera de la pieza de trabajo es grande y se generan vibraciones fácilmente; por lo tanto, se necesita una máquina herramienta extremadamente rígida.

Con la proliferación de materiales para herramienta y de recubrimientos, la selección de la herramienta óptima se vuelve más difícil, y los fabricantes ofrecen catálogos electrónicos que a menudo incorporan algunos elementos de un sistema experto.

16-3-3 Portaherramientas y aditamentos

Las herramientas se montan en la máquina herramienta en *portaherramientas*. Para las herramientas rotatorias, por lo general se tiene un vástago ahusado que cabe en un agujero de acoplamiento. Un vástago con ángulo pequeño (por ejemplo, el denominado

cono Morse con conicidad 1/20) es autobloqueante (la fricción mantiene al cono en su lugar) y es difícil de retirar; en consecuencia, la mayoría de los portaherramientas diseñados para el cambio rápido y automático de la herramienta tienen una transición menos aguda (como 7/24). Una desventaja es que en el maquinado a alta velocidad, la fuerza centrífuga abre el asiento, y el agarre en el portaherramienta se afloja. Se han desarrollado varios diseños para proporcionar rigidez, concentricidad, colocación axial exacta y sujeción segura de la herramienta combinada con facilidad de expulsión. Los denominados sujetadores HKS, en forma de copa, son cada vez más aceptados para velocidades mayores. Los *portaherramientas integrales* se fabrican de una pieza y son más rígidos, pero menos flexibles en la aplicación que los *portaherramientas modulares*, en los que únicamente se cambian los *cartuchos* de la herramienta.

El maquinado exacto no sólo requiere que la herramienta sino también que la pieza de trabajo se ubiquen exacta y rígidamente. En algunas máquinas herramienta (particularmente los tornos) la construcción de la máquina proporciona esto, pero en otros casos la pieza se debe mantener, con abrazaderas mecánicas o hidráulicas, contra puntos de ubicación en los *aditamentos*. Es preciso tener cuidado de no distorsionar las piezas delgadas. Los aditamentos dedicados son efectivos para la producción en masa; los aditamentos de propósito general, reconfigurables, son más adecuados para la producción de lotes medios a pequeños; y los aditamentos modulares están en un punto medio en términos de flexibilidad y facilidad de instalación. Para facilitar el movimiento de estación a estación, las partes se deben mantener en *plataformas*, losas metálicas de precisión con agujeros o ranuras que encajan en pernos o cejillas en el espacio de trabajo de la máquina herramienta.

16-4 CLASIFICACIÓN

Existen innumerables formas de eliminar material por medio de la formación de viruta, y hay varias maneras de clasificar los procesos. Una forma útil es por el número de bordes de corte (Fig. 16-23); dentro de ella se pueden emplear dos aproximaciones básicamente diferentes: *formado* y *generación.*

16-4-1 Formado

Una forma se realiza cuando la herramienta de corte posee el contorno terminado de la pieza de trabajo. Todo lo que se necesita, además del movimiento relativo que se requiere para producir la viruta (el *movimiento primario*), es alimentar (*introducir*) la herramienta a la profundidad deseada.

Resulta indiferente cómo se genera el movimiento primario. La pieza de trabajo se puede girar contra una herramienta estacionaria (*torneado*, Fig. 16-24*a*), ambas se mueven una respecto a la otra en un movimiento lineal (*cepillado*, Fig. 16-24*b*), la herramienta se gira contra una pieza de trabajo estacionaria (*fresado* y *taladrado*, Fig. 16-24*c*) o contra una rotatoria (como en el esmerilado cilíndrico). La exactitud del perfil superficial depende principalmente de la herramienta de formado.

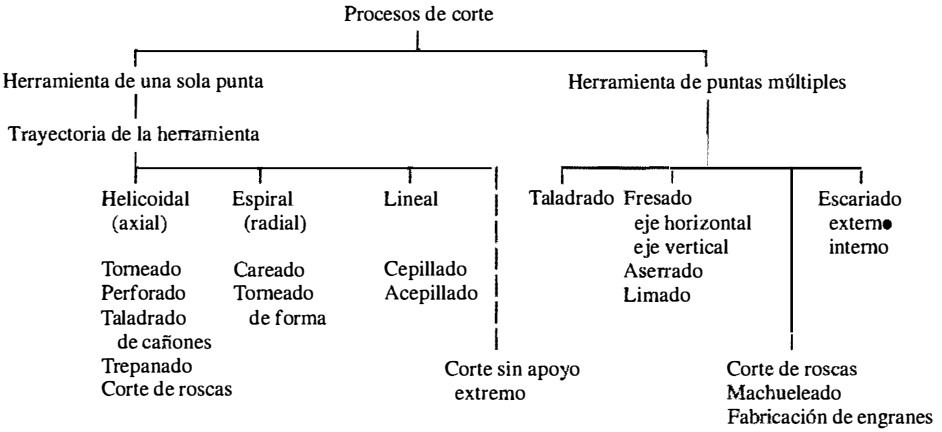


Figura 16-23 Clasificación de los procesos de formado de viruta. (*Adaptada de J.A. Schey, en ASM Handbook, vol. 20, Materials and Design, ASM International, 1997, p. 695. Se publica con autorización.*)

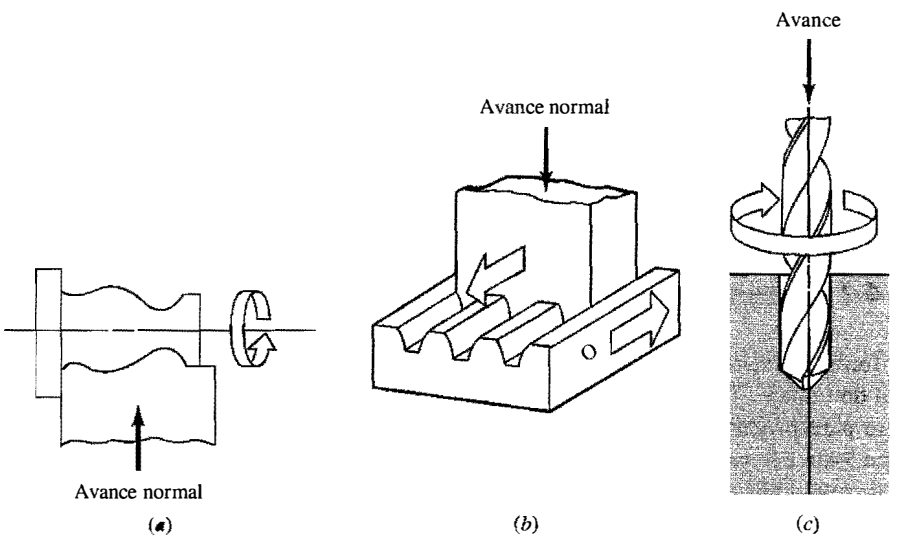


Figura 16-24 La herramienta de corte se fabrica con el perfil de la pieza en los procesos de formado toles como (a) torneado de forma, (b) perfilado o cepillado, y (c) taladrado.

16-4-2 Generación

Una superficie se puede *generar* combinando varios movimientos que no solamente concretan el proceso de la formación de viruta (movimiento primario), sino que también mueven el punto de accionamiento a lo largo de la superficie (descrito como el *movimiento de avance f*, Fig. 16-10). De nuevo, la pieza de trabajo puede girar respecto a su eje, como en el torneado; la herramienta se fija para cortar hasta una cierta profundidad y recibe un movimiento de avance longitudinal continuo. Cuando el eje de la pieza de trabajo y la dirección de avance son paralelos, se genera un cilindro (Fig. 16-10*b* y 16-25*a*); cuando están en ángulo, aparece un cono (Fig. 16-25*b*). Si, además de los movimientos primario y de avance, la distancia de la herramienta de corte desde el eje de la pieza de trabajo varía de manera programada, por ejemplo, por medio de levas, un dispositivo de copiado o control numérico, se puede generar una gran variedad de formas.

Cuando la herramienta (o la pieza de trabajo) es alimentada de manera perpendicular al movimiento lineal primario (cepillado), se genera una superficie plana (Fig. 16-10*a* y 16-25*c*). Si a la pieza de trabajo se le diera un movimiento de avance girándola

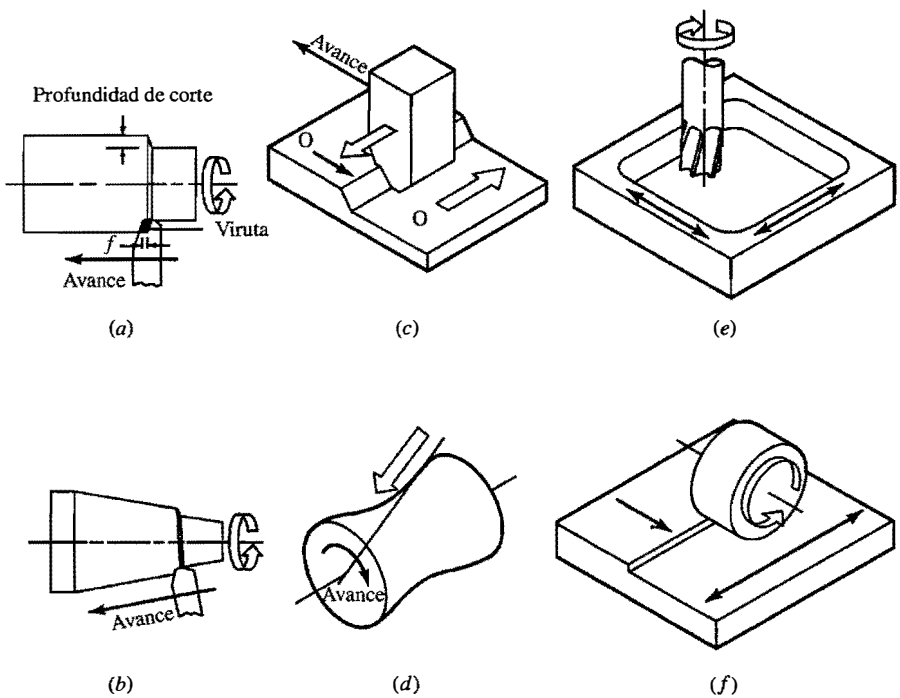


Figura 16-25 El movimiento programado de la herramienta (avance) es necesario en la generación de una forma: (a) torneando un cilindro y (*b*) un cono; (*c*) cepillado de una pieza plana y (*d*) de un hiperboloide; (e) fresando una cavidad, y (*f*) esmerilado de una pieza plana (los movimientos principales están marcados con flechas huecas, los movimientos de avance con flechas sólidas).

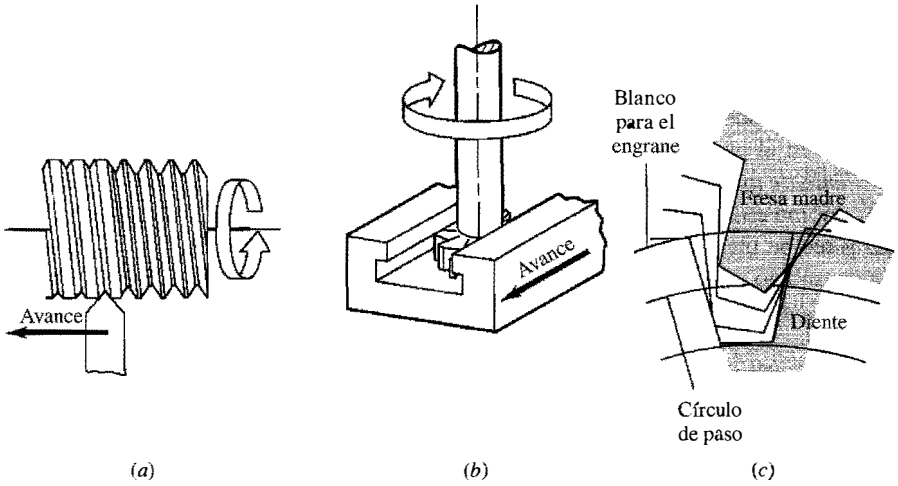


Figura 16-26 El formado y la generación se pueden combinar: (a) corte de roscas, (b) fresado de una ranura en T y (c) generación de un engrane.

respecto a su eje paralelo al movimiento de la herramienta, se podría maquinar un cilindro. El eje de la pieza de trabajo se podría fijar a un ángulo y entonces se generaría un hiperboloide de revolución (Fig. 16-25*d*). En principio, cualquier superficie que se describa por una generatriz recta se puede reproducir por medio de esta técnica. Una herramienta de simetría axial puede girar mientras la pieza de trabajo se alimenta, lo que conduce al *fresado* (Fig. 16-25*e*) o al esmerilado (Fig. 16-25*f*).

Frecuentemente, el *formado y la generación combinados* ofrecen ventajas. De esta manera, una rosca se puede cortar con una herramienta perfilada alimentada axialmente a la rapidez apropiada (Fig. 16-26*a*). Es posible fresar una ranura o una cola de milano en una pieza de trabajo (Fig. 16-26*b*). Un engrane se puede cortar con una fresa madre que genera gradualmente el perfil del diente del engrane (Fig. 16-26*c*), mientras que tanto la fresa como la pieza de trabajo giran.

16-5 MAQUINADO DE UN SOLO PUNTO

Partiendo del análisis previo, es obvio que una de las herramientas más versátiles es una *herramienta de corte de punto único* que se mueve de manera programada.

16-5-1 Herramienta

La herramienta no sólo debe acomodar el movimiento primario (como lo haría una herramienta ortogonal, Fig. 16-1), sino también debe permitir avance y el desecho de la

viruta. En consecuencia, el borde de corte casi siempre es inclinado (corte oblicuo, Fig. 16-9), y la viruta se enrolla en una hélice en vez de una espiral. La herramienta se alivia tanto en dirección de avance como en la superficie que toca la superficie recién formada (Fig. 16-10*b*), y de esta manera tiene superficies mayor y menor del flanco (Fig. 16-27). Las intersecciones de ellas con la cara de ataque de la herramienta constituyen los *filos de corte mayor y menor*, respectivamente. La nariz se redondea con un radio adecuado (típicamente, 1 mm).

El ángulo de ataque, importante en todos sentidos, en realidad se debe medir en un plano perpendicular al filo de corte mayor pero, por conveniencia, todos los ángulos se miden en un sistema de coordenadas que coincide con los ejes mayores de la punta de la herramienta (Fig. 16-27). Aunque este sistema parece sencillo, crea varios problemas; sin embargo, se resuelven mediante el ISO 3002 (cantidades básicas en corte y esmerilado). En cualquier caso, se debe reconocer que los ángulos de la herramienta solamente tienen significado en relación con la pieza de trabajo, después de la instalación en la máquina herramienta.

En la tabla 16-4 se dan algunas recomendaciones sobre los ángulos de las herramientas de corte, que representan un compromiso al proporcionar una fuerza de corte mínima con una resistencia máxima de la herramienta.

La herramienta de punto único se puede reemplazar con una *herramienta rotativa*, que es un disco mantenido en un ángulo apropiado. El disco puede forzarse a girar o bien puede girar como resultado de su contacto con la pieza de trabajo; de esta manera se usan todas las partes de la circunferencia.

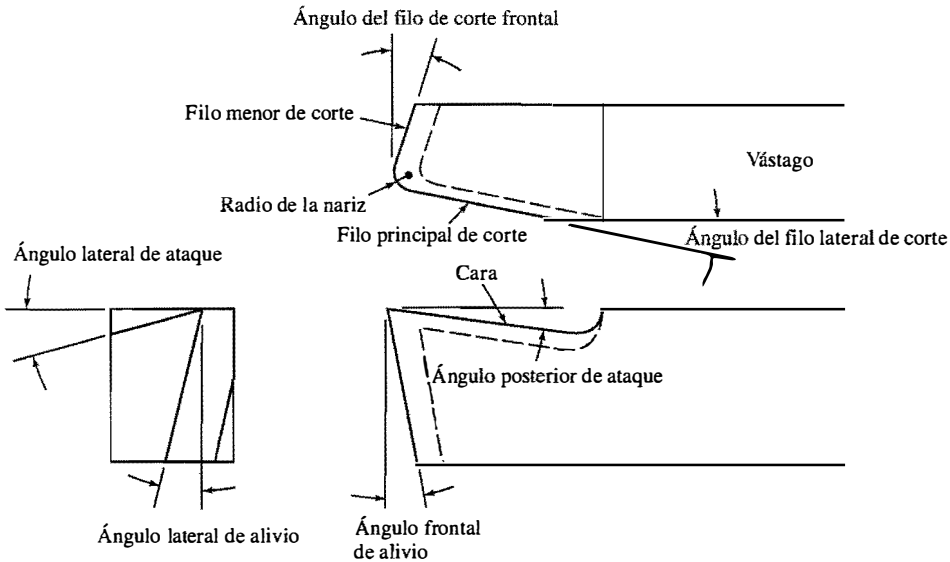


Figura 16-27 Nomenclatura utilizada para describir la geometría de las herramientas de corte de un punto (compare con la Fig. 16-21).

Tabla 16-4 Ángulas típicas para herramientas de carte de punta única*

Pieza de trabajo		Material de la herramienta					
		Acero de alta velocidad		WC con soldadura fuerte		WC desechable	
Material	BHN	Inclinación posterior	Inclinación lateral	Inclinación posterior	Inclinación lateral	Inclinación posterior	Inclinación lateral
Aceros	< 225	10	12	0	6	–5	–5
	hasta 325	8	10	0	6	–5	–5
	hasta 425	0	10	0	6	–5	–5
	> 425	0	10	–5	–5	–5	–5
Inoxidable							
Ferrítico		5	8	0	6	0	5
Austenítico		0	10	0	6	5	5
Martensítico		0	10	0	6	–5	–5
Hierro fundido	< 300	5	10	0	6	–5	–5
	> 300	5	15	–5	–5	–5	–5
Aleación de Zn	80-100	10	10	5	5	0	5
Aleación de Al, Mg		20	15	3	15	0	5
Aleación de Cu		5	10	0	8	0	5
Superaleación		10	5	6	0	5	5
Aleación de Ti		5	5	6	–5	–5	5
Termoplásticos		0	20-30	0	0	0	20-30
Termofijos		0	20-30	15	0	15	5

NOTA: los ángulos de alivio frontal y lateral comúnmente son de 5°, pero valores mayores son usuales para plásticos. El ángulo del filo es comúnmente de 15°, auque es menor para metales no ferrosos y plásticos con herramientas HSS.
*Extraídos de *Machining Data Handbook*, 3a. ed., Machinability Data Center, Metcut Research Associates, Cincinnati, Ohio, 1980.

16-5-2 Torneado

La máquina herramienta que se utiliza más ampliamente es el *torno mecánico* (*torno paralelo*, Fig. 16-28), que proporciona un movimiento rotatorio primario mientras a la herramienta se le imparten movimientos apropiados de avance.

La pieza de trabajo debe sujetarse firmemente, con frecuencia en un *mandril* (Fig. 16-29*a*). Los mandriles de tres quijadas con ajuste simultáneo de éstas son autocentrables. Otros tienen dos, tres o cuatro quijadas independientemente ajustables para sujetar piezas de trabajo que no sean redondas. Las barras también se pueden sujetar en *boquillas*, las cuales consisten en un buje dividido empujado o jalado contra una superficie cónica (Fig. 16-29*b*). Las piezas de trabajo de forma poco manejable a menudo se sujetan mediante pernos en un *plato de torno* (Fig. 16-29*c*).

El *cabezal* contiene el mecanismo de impulso, que normalmente incorpora engranes de cambio y/o un mecanismo de velocidad variable. Las piezas de trabajo largas están soportadas en un extremo con un *centro* sostenido en el *contrapunto*. La herra-

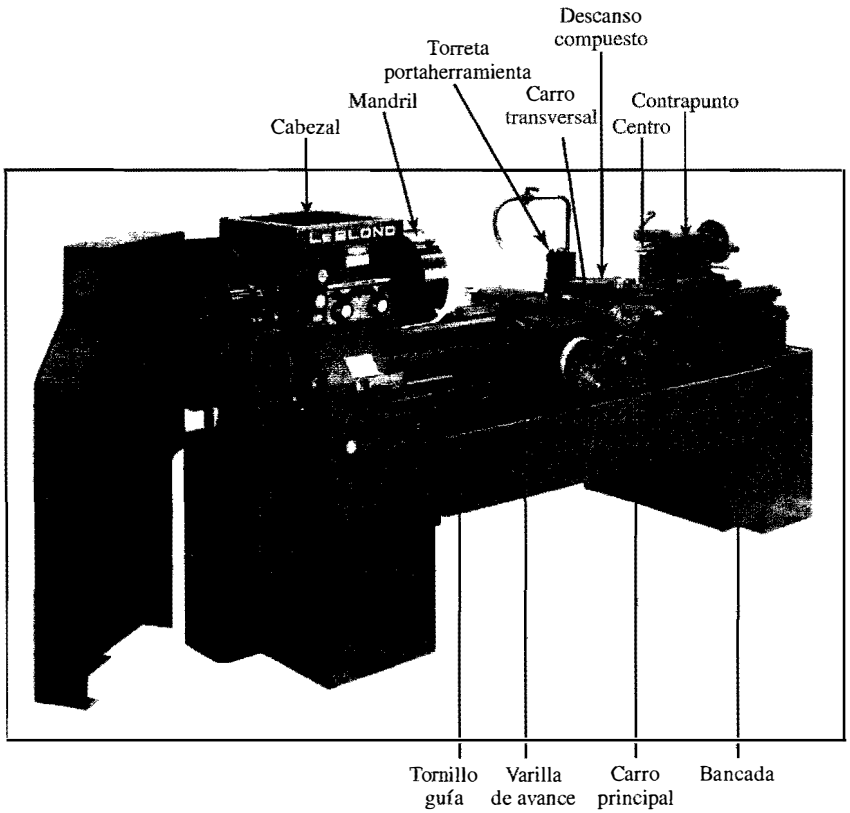


Figura 16-28 Un torno mecánico característico. Capacidad: 380 mm (15 pulg) de diámetro de volteo; 1 370 mm (54 pulg) de longitud. (*Cortesía de LeBlond Inc., Cincinnati, Ohio.*)

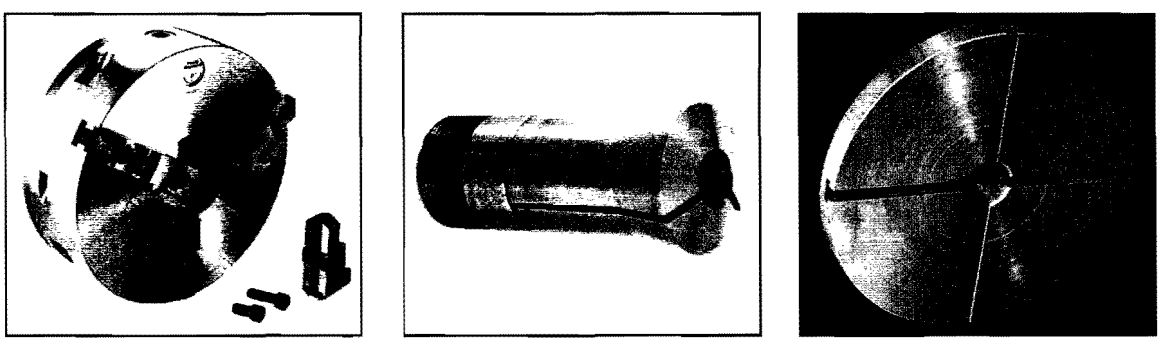


Figura 16-29 Las piezas de trabajo se pueden sujetar en un (*a*) mandril, (*b*) boquilla o (*c*) plato de sujeción. [(*a*) y (*b*) *cortesía de DoALL Co.*]

mienta se sujeta en una *torreta* que permite colocarla en un ángulo (horizontal y vertical). La torreta se monta en un *carro transversal* que proporciona el movimiento radial de la herramienta. El carro transversal se guía mediante un *carro principal* (longitudinal), el que a su vez recibe soporte de las *guías* maquinadas en la *cama* que asegura rigidez y libertad de las vibraciones. Una parte sobresaliente, el *mandil* del carro principal, lo acciona la *varilla de avance* para proporcionar un movimiento continuo, o un *tornillo guía* para el corte de roscas. Las piezas de trabajo muy largas se aseguran contra la deflexión excesiva por medio de dos uñas de una luneta fija sujeta por pernos a la cama del torno; la luneta viajera se sujeta al carro principal.

Algunas veces la torreta se apoya en un *soporte compuesto de la herramienta* que incorpora un carro que se puede fijar a cualquier ángulo; así, se pueden formar superficies cónicas alimentando la herramienta a mano. Es posible girar una *torreta de cuatro vías* respecto a un eje vertical y permitir el cambio rápido de las herramientas en posiciones prefijas, acelerando de esta manera las operaciones sucesivas.

16-5-3 Perforado

Cuando la superficie interna de una pieza hueca se tornea, a la operación se le llama *perforado* (Fig. 16-30*a*). Para longitudes cortas, la herramienta se monta en una barra

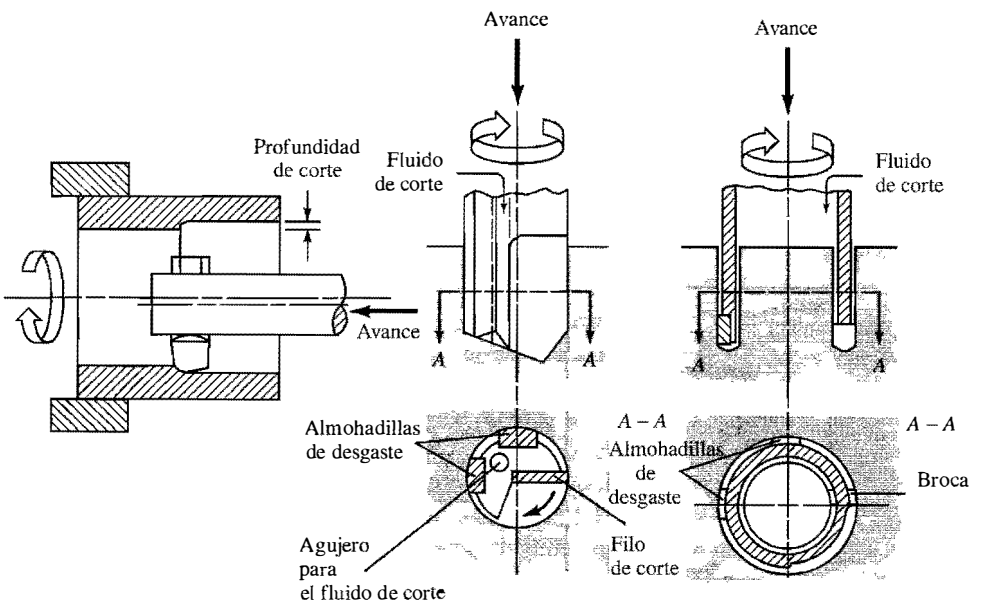


Figura 16-30 Maquinado de agujeros con herramienta de una sola punta: (*a*) apertura (mejora el acabado superficial) por perforado, (*b*) taladrado de cañones y (*c*) trepanado.

en cantilever en la torreta. Una barra larga es propensa a la vibración excesiva, por lo que es preferible tener la pieza de trabajo asegurada a la cama del torno mientras se impulsa una *barra de perforación*, sujeta por quijadas en un extremo y soportada en el contrapunto en el otro. Existe un número de soluciones patentadas que tienen como objetivo reducir o amortiguar las vibraciones. La más simple es un *amortiguador de tapón* (una masa pesada en el agujero del extremo libre de la barra de perforación). El corte simultáneo con dos o tres insertos de perforación ecualiza las fuerzas y reduce la vibración. Una máquina de propósito especial que realiza una operación similar, pero con barras de perforación más firmemente guiadas, es la *taladradora horizontal.*

Las piezas de trabajo pesadas y con diámetros grandes que se necesitan maquinar tanto en la superficie interior como en la exterior se soportan mejor en un torno colocado en posición vertical; llamado *torneado vertical y molino de perforación* o *máquina de taladrado vertical*, un torno como ése puede trabajar en varias superficies de una pieza de trabajo, sujeta al plato giratorio con eje vertical de la máquina (Fig. 16-31). (Alternativamente, la herramienta gira y la parte queda estacionaria.) Husillos adicionales activos (impulsados) permiten operaciones secundarias en una configuración.

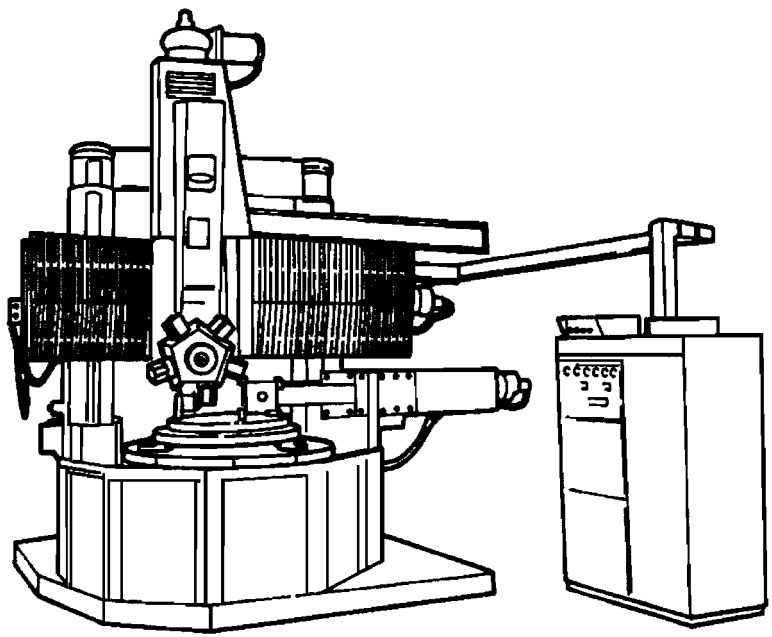


Figura 16-31 Las grandes piezas de trabajo a menudo se maquinan en máquinas verticales de perforación. La ilustración es de un torno revólver vertical CNC. (*De The Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4a. ed., vol. 1, p. 15.54. Con permiso de la Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan.*)

16-5-4 Perforación de cañones y trepanado

Los agujeros se pueden producir en piezas de trabajo sólidas por medio de técnicas de maquinado de un punto parecidas al perforado. En la perforación de cañones las fuerzas de corte se equilibran mediante almohadillas guía colocadas a ángulos de 90° y 180° del filo de corte (Fig. 16-30*b*). Para iniciar un agujero, una guía de acero endurecido (*buje de perforación*) se mantiene contra la cara de la pieza de trabajo. Una vez hecho esto, la herramienta se guía a sí misma; las almohadillas guía bruñen la superficie de corte. El refrigerante alimentado a través de la herramienta mantiene la temperatura baja y desaloja las virutas. Se puede usar incluso para agujeros menores de 3 mm de diámetro. La herramienta normalmente se mantiene estacionaria, mientras que la pieza de trabajo, sujeta en un mandril y estabilizada por lunetas, gira. En una variante, el refrigerante se aplica al exterior del tubo de la herramienta y fluye de regreso, junto con las virutas, por el hueco del tubo.

Los agujeros mayores (diámetro de 20 mm y mayores) se pueden hacer mediante *trepanación*: la broca de la herramienta de corte se sujeta en la cara extrema de un tubo, y el agujero se maquina eliminando un anillo mientras se deja un núcleo central (Fig. 16-30*c*). De nuevo, existen diversas herramientas mejoradas patentadas.

Ambas técnicas son adecuadas para hacer agujeros relativamente profundos, con una razón de profundidad-diámetro de cinco o mayor. El fluido cortante alimentado bajo presión lubrica y ayuda al retiro de las virutas, y es vital para el éxito.

16-5-5 Careado

En el *careado* se produce un plano perpendicular al eje del torno al mover la herramienta de un punto en el carro, de manera que el movimiento de avance sea hacia el centro del torno (Fig. 16-32*a*). El *tronzado* realiza la misma tarea, pero ahora se generan dos superficies simultáneas (Fig. 16-32*b*). La velocidad de corte disminuye a medida que la herramienta se mueve hacia el centro, a menos que aumente la velocidad rotacional de manera programada, usando un mecanismo de velocidad variable.

16-5-6 Formado

Este método para producir formas rotacionales complejas (Fig. 16-24*a*) es rápido y eficiente, pero las fuerzas de corte son altas y la pieza de trabajo podría sufrir una deflexión excesiva. En las piezas de trabajo en cantilever la longitud de la *herramienta de formado* usualmente se mantiene a 2.5 veces el diámetro de la pieza de trabajo. Para longitudes mayores, la pieza de trabajo está soportada por un descanso posterior o soporte de rodillo o, si es posible, en un centro.

16-5-7 Torno automático

La operación manual de un torno requiere de una habilidad considerable. Las aptitudes de un operador muy hábil se desaprovechan en la producción repetitiva; por lo tanto,

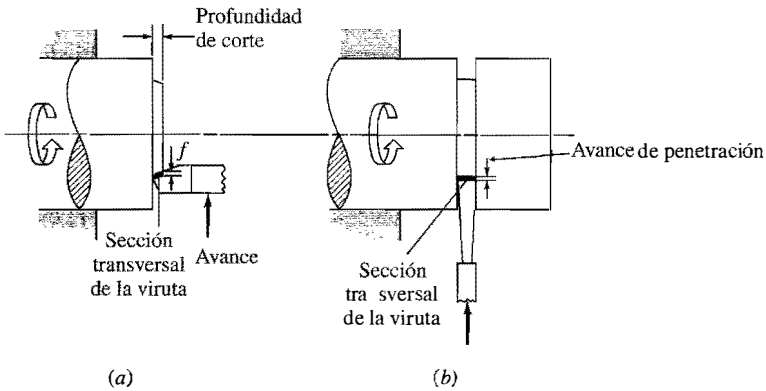


Figura 16-32 Las caras planas extremas se pueden generar por (*a*) careado y (*b*) tronzado.

desde hace tiempo se han hecho varios esfuerzos para la automatización. Desgraciadamente, la terminología es un poco confusa. En el contexto que aquí se usa, un *torno automático* es similar a uno mecánico, pero todos los movimientos del carro principal que se requieren para generar la superficie de la pieza de trabajo se obtienen por medios mecánicos.

El movimiento radial de la herramienta se deriva de una *leva de borra* o de una *plantilla de trazo*, o al accionar impulsores separados por NC. Alternativamente, los movimientos se pueden derivar de un modelo de la pieza de trabajo usando una *configuración de copiado.*

A todas estas máquinas se les suministra el material a mano, en forma semiautomática, o en forma completamente automática.

16-5-8 Torno revólver

Cuando la superficie se genera o forma con movimientos relativamente sencillos pero requiere una secuencia de operaciones (como torneado, careado, perforado y taladrado) para su terminación, la cantidad requerida de herramientas se puede manejar reemplazando el contrapunto de un torno *por una torreta*. Equipado con un dispositivo de sujeción rápida, en esta máquina se pueden colocar varias (por lo general seis) herramientas en posición muy rápidamente. Todas las herramientas se alimentan en la dirección axial, moviendo el revólver en un carro (*torno del tipo de corredera*) o, para trabajo más pesado, en una silla, la cual se mueve por sí misma sobre las guías (*torno del tipo silla*). El movimiento de avance axial finaliza cuando se alcanza un tope prefijo. Se pueden montar herramientas adicionales en el carro transversal de un torno revólver; y también en una torre portaherramienta posterior. El número de operaciones posibles y la variedad de combinaciones es muy grande, porque se pueden montar varias herramientas en cualquier estación para cortes múltiples, o realizar cortes simultáneos en varias estacio-

nes (*corte combinado*). Una vez que la máquina se instala, se requiere relativamente poca habilidad para operarla.

El *torno CNC* (Fig. 16-33) ofrece gran flexibilidad de operación porque todos los movimientos se programan a través de software. Equipado con un cambiador de herramientas y enlazado a dispositivos de movimiento de materiales (cargadores automáticos), se convierte en el centro de una celda de manufactura flexible. Para evitar la necesidad a otra máquina, los tornos de funciones múltiples (a menudo llamados *centros de torneado*) se disponen con uno o varios revólveres, con herramientas impulsadas que realizan un fresado o taladrado transversal en una pieza de trabajo estacionaria. Cuando una pieza necesita corte desde ambos extremos, se debe liberar, tornear y volver a colocar en el mandril, resultando en una posible excentricidad; se obtiene una mejor exactitud con una *máquina de doble husillo*, en que la transferencia al segundo husillo (que reemplaza al contrapunto) se lleva a cabo dentro de la máquina.

16-5-9 Máquinas automáticas para la fabricación de tornillos

Como el nombre lo sugiere, estas máquinas se desarrollaron originalmente para fabricar tornillos a una alta rapidez de producción. El cabeceado en frío seguido del lamina-



Figura 16-33 Torno CNC con un impulso de 22 kW para tornear piezas de trabajo de 370 mm de diámetro y 860 mm de longitud o barras de 100 mm de diámetro, con herramientas sujetas en su torreta de 12 posiciones controlada por servomotores. La imagen transparente muestra el funcionamiento interno. El bastidor rígido de hierro fundido está relleno con agregado suelto para amortiguar la vibración. La programación intuitiva permite el ingreso de datos por el operador. (*Cortesía de Hass Automation, Oxnard, California.*)

do de roscas casi ha eliminado este mercado, pero se han desarrollado máquinas para producir en masa formas más complejas.

Máquinas automáticas de un solo husillo Las *máquinas automáticas de un solo husillo* se dividen en dos grupos básicos:

Máquinas automáticas para tornillos de husillo único. Se basan en el principio del torno revólver, pero la acción del operador se reemplaza con levas conformadas apropiadamente o por control CNC, que pone varias herramientas en acción a tiempos prefijos. El material (una barra estirada en frío con tolerancias estrechas) se posiciona hacia delante, con dedos de avance operados por levas, a una distancia igual a la longitud de una pieza de trabajo, al final de cada ciclo de maquinado.

Las *máquinas automáticas suizas* son radicalmente diferentes ya que todas las herramientas operan en el mismo plano, extremadamente cerca del manguito guía mediante el cual la barra que gira es alimentada continuamente en modo programado. Las herramientas individuales se mueven radialmente hacia adentro, montadas en carros que ponen en acción a la herramienta apropiada. Como la pieza de trabajo no sobresale, se pueden producir partes de cualquier longitud con exactitudes y tolerancias sin igual (hasta 2.5 μm). Las máquinas más recientes se controlan numéricamente (Fig. 16-34).

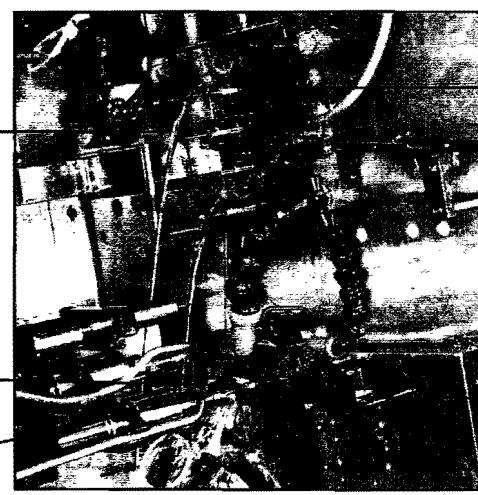


Figura 16-34 En una máquina moderna de tipo Suizo, la barra se alimenta axialmente, mientras que una herramienta sujeta al carro portaherramienta radial y efectúa el maquinado de la superficie. Una herramienta final impulsada realiza el trabajo en el extremo libre. Después del tronzado, la pieza es sujeta por el husillo de captación, de manera que una herramienta de contraoperación pueda terminar el otro extremo. (*Cortesía de Tornos Technologies U.S. Corporation, Brookfield, Connecticut.*)

Aunque es factible instalar varias herramientas para cortar al mismo tiempo, el tiempo total de maquinado en las máquinas automáticas de un husillo es la suma de las operaciones individuales o simultáneas necesarias para terminar la pieza.

Máquinas automáticas de husillos múltiples La productividad puede aumentar sustancialmente si todas las operaciones se realizan simultáneamente. En las *máquinas automáticas de husillos múltiples* (Fig. 16-35), el cabezal del torno se reemplaza por un *portador de husillos* en el que de cuatro a ocho husillos impulsados avanzan y giran un número igual de barras. El revólver se reemplaza por un carro portaherramienta, en que se monta un número apropiado de portaherramientas (algunas veces accionados separadamente). Las herramientas adicionales se activan radialmente, por medio de carros transversales; el número de éstos a menudo es menor que el de los husillos, porque puede faltar espacio para ellos. El carro portaherramientas se mueve axialmente hacia

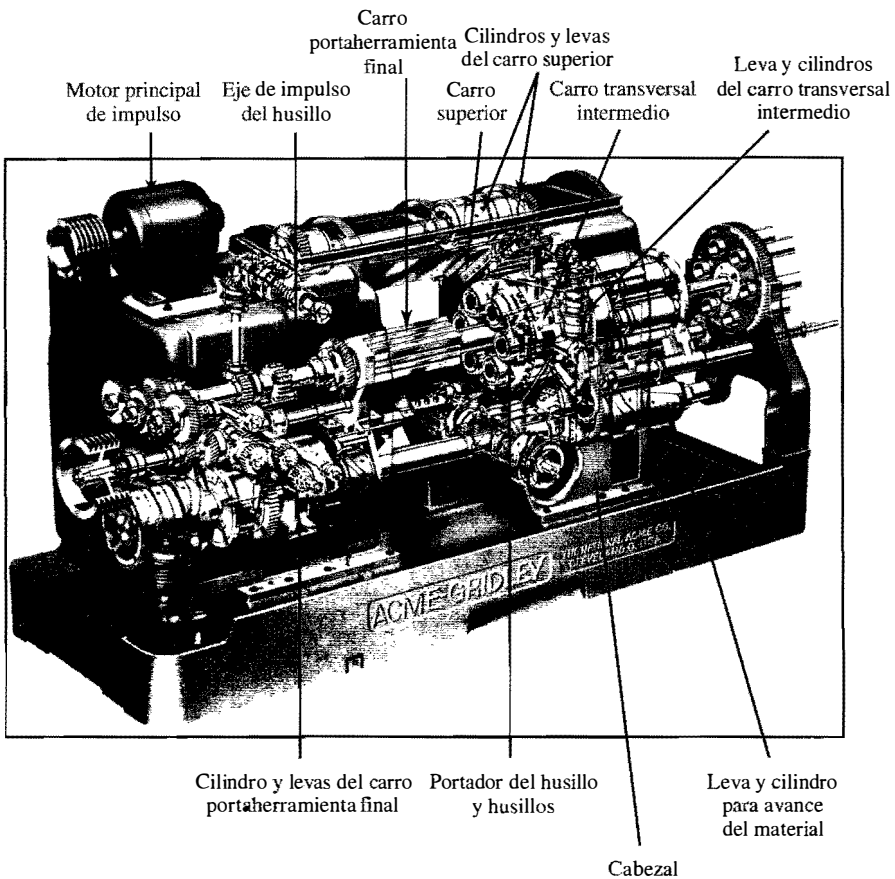


Figura 16-35 Máquina automática de barras con seis husillos, sin herramientas. Con cada secuencia del cabezal se fabrica una pieza completa. (*Cortesía de National Acme, Cleveland, Ohio.*)

delante y los carros transversales que se mueven radialmente hacia dentro, bajo el control de una leva, completan su tarea asignada, se retiran, y el portador de husillos traslada las barras hasta la posición siguiente. Así, en cada accionamiento de las herramientas, se termina una pieza.

Las máquinas automáticas para la fabricación de tornillos producen primordialmente piezas con simetría axial (incluyendo piezas roscadas), pero aditamentos especiales permiten operaciones auxiliares como fresado o taladrado transversal, mientras que la rotación de un husillo se detiene. Las piezas de trabajo de forma irregular se manejan en las denominadas *mandriladoras*. En los *centros de torneado de husillos múltiples* CNC, todo el movimiento está bajo control computarizado. Las *máquinas rotatorias de transferencia* representan un enfoque radicalmente diferente: un revólver giratorio de posicionamiento sujeta las piezas que se trabajan con cabezales de maquinado desde el exterior.

16-5-10 Cepillado y acepillado

Como se indica en la figura 16-25*c*, una superficie se puede generar con un movimiento primario lineal. En el proceso de *cepillado*, el movimiento primario se imparte a la herramienta y el movimiento de avance a la pieza de trabajo (como en la Fig. 16-10*a*). La herramienta se mueve hacia atrás y hacia adelante con una corredera sobresaliente, cuya deflexión limita la longitud de la carrera. En el proceso de *acepillado* se obtiene una carrera más larga (de prácticamente una longitud ilimitada) manteniendo la pieza de trabajo en una mesa larga, horizontal y recíproca, mientras se sujeta la herramienta a una columna o arco robustos, o con un carril transversal con un tornillo guía que genera el movimiento de avance. Estos procesos se han sustituido en gran medida por el fresado, el escariado o el esmerilado por banda. Para bajas cantidades de producción, todavía se emplea el *ranurado* (relacionado con el cepillado) para hacer cuñeros internos.

16-6 MAQUINADO DE PUNTOS MÚLTIPLES

En el maquinado de puntos múltiples por lo menos dos filos de corte de la misma herramienta se accionan simultáneamente en cualquier momento.

16-6-1 Taladrado

Los agujeros son los rasgos de maquinado que se encuentran con mayor frecuencia. En la sección 16-5-4 se analizaron dos métodos para hacer agujeros profundos, basados en técnicas de un solo filo. Sin embargo, una gran parte de los agujeros se crea por medio de la herramienta familiar de dos filos, la *broca helicoidal* (Fig. 16-36), y la vida de esta herramienta con frecuencia tiene un efecto significante en el costo total.

La broca helicoidal tiene varias ventajas: dos filos de corte son más eficientes; las fuerzas de corte están equilibradas; las *ranuras* helicoidales permiten el acceso del

fluido de corte y ayudan a desechar la viruta; *márgenes* pequeños dejados en la superficie cilíndrica son una guía.

No obstante, la broca helicoidal también tiene sus problemas:

1. Los dos filos de corte no deben unirse en una punta que, debido a su pequeña masa, se calentaría rápidamente y perdería su resistencia. Normalmente se deja un *filo de cincel* y, debido al ángulo de ataque altamente negativo, no ocurre una verdadera acción de corte en el centro del agujero. El material se desplaza plásticamente por medio de un proceso que se parece al perforado de un cuerpo semiinfinito (Fig. 9-14*a*), que subsecuentemente se elimina por los filos de corte. La fuerza necesaria para esta indentación rotatoria es responsable de gran parte de la fuerza total de empuje (alimentación) en el taladrado. Si es necesario, un agujero piloto, con un diámetro igual al del filo del cincel de la broca mayor, reducirá en gran medida la fuerza de avance que se requiere. El desgaste del filo del cincel incrementa aún más la fuerza de empuje. Por lo tanto, se han desarrollado muchas variantes de las puntas de las brocas (puntas adelgazadas para reducir el filo de cincel; puntas helicoidales que cortan en todos los filos; puntas con cuatro y seis caras, etcétera) para mejorar la concentricidad, precisar menor fuerza de empuje y desgaste reducido. Algunas brocas tienen surcos de rompimiento de virutas en las ranuras.

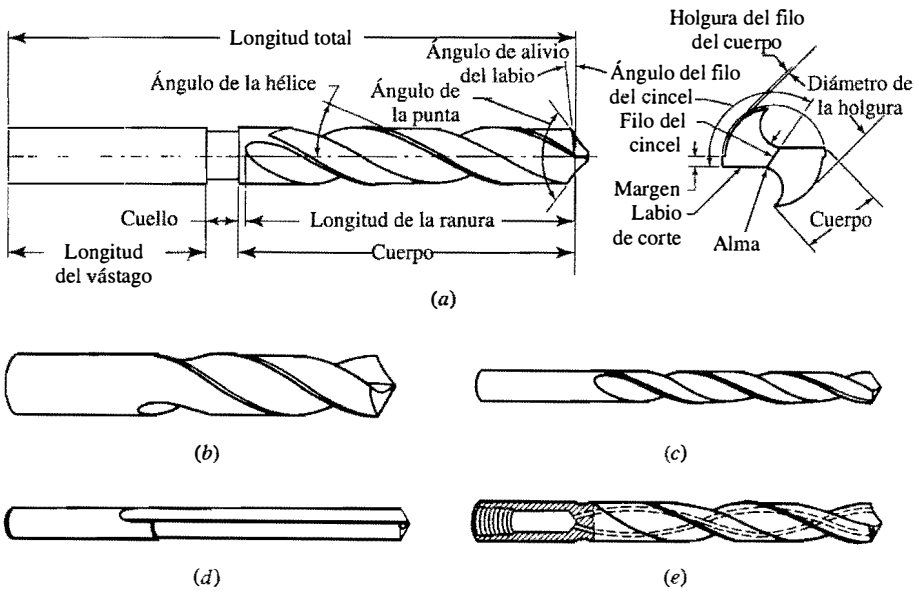


Figura 16-36 Las brocas helicoidales están disponibles en una gran variedad de formas, incluyendo: (*a*) broca de taller, (*b*) broca para máquina automática de tornillos, (*c*) broca de hélice baja, (*d*) broca de ranura recta y (*e*) broca de vástago recto con agujero para aceite. (*De Metals Handbook, 8a. ed., vol. 3, ASM International, 1967, p. 78. Se publica con autorización.*)

2. Cuando se inicia un agujero, el filo de cincel tiende a moverse erráticamente. La broca se debe mantener fija por un *buje de broca*, creando una indentación con un *punzón centrador*, o usando una *broca con avellanador*.

3. El ángulo de la hélice determina el ángulo de ataque en la periferia de la broca; el ángulo de ataque decrece a lo largo del filo hacia el centro. Las *brocas de hélice pronunciada* (*espiral rápida*) con ranuras amplias ayudan en la remoción de la viruta, y su superficie de soporte aumentada proporciona una mejor guía. Cuando se taladra lámina delgada o materiales como latones de maquinado libre, es preferible un ángulo reducido de la hélice o incluso una *broca de ranura recta* (con cero ángulo de la hélice, Fig. 16-36*d*).

4. Un problema básico es el enfriamiento y la remoción de la viruta. Ambos se ayudan de agujeros internos de enfriamiento a través de los que se alimenta fluido bajo presión (Fig. 16-36*e*). El taladrado por percusión también ayuda a la remoción de viruta.

5. El acabado superficial del agujero no es tan bueno como el de uno perforado y la broca comienza a derivar a profundidades mayores. No obstante, la calidad es adecuada para una multitud de propósitos, en diámetros que varían de 0.05 a 75 mm, a razones de profundidad–diámetro de hasta 5 (aunque a menudo se taladran agujeros más profundos).

6. Se eleva significativamente la vida de la broca con brocas de HSS revestidas (particularmente, revestidas con TiN). La resistencia al desgaste aumenta y se obtiene una vida mayor de la herramienta con insertos de carburo y con brocas sólidas de carburo (monolíticas); para estas últimas, la rigidez es crítica; las brocas de tres ranuras son

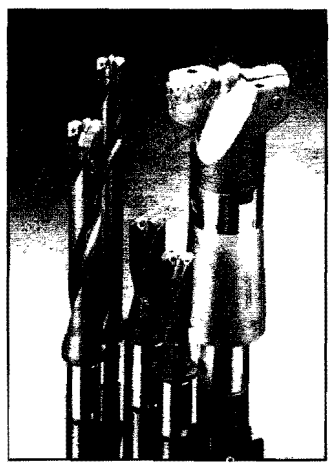


Figura 16-37 Brocas de insertos ajustables para un diámetro de 16 a 170 mm. (*Cortesía de Kennametal, Latrobe, Pennsylvania.*)

mejores en este respecto. Los agujeros de diámetros mayores se pueden cortar con brocas especialmente construidas, equipadas con varios insertos ajustables (Fig. 16-37).

Las *brocas de pala* con varias configuraciones son adecuadas para taladrar agujeros de todos diámetros y, cuando están hechas de carburo, también para materiales duros. Las brocas de pala monolíticas de carburo y de vástago recto tienen una sección transversal mayor que las brocas helicoidales de mismo diámetro, y se prefieren para agujeros pequeños (de 0.013 mm y mayores). Cortan más lentamente y no reciben guía de las ranuras; de ahí que no sean adecuadas para agujeros profundos.

Equipo para taladrar El *taladro de columnas* más sencillo tiene un husillo giratorio individual que avanza axialmente, a una rapidez fija o bajo una fuerza de constante, en una pieza de trabajo sostenida rígidamente en una mesa (Fig. 16-38). Un *taladro de brazo radial* tiene un brazo oscilante que da mayor libertad. Cuando deben producir

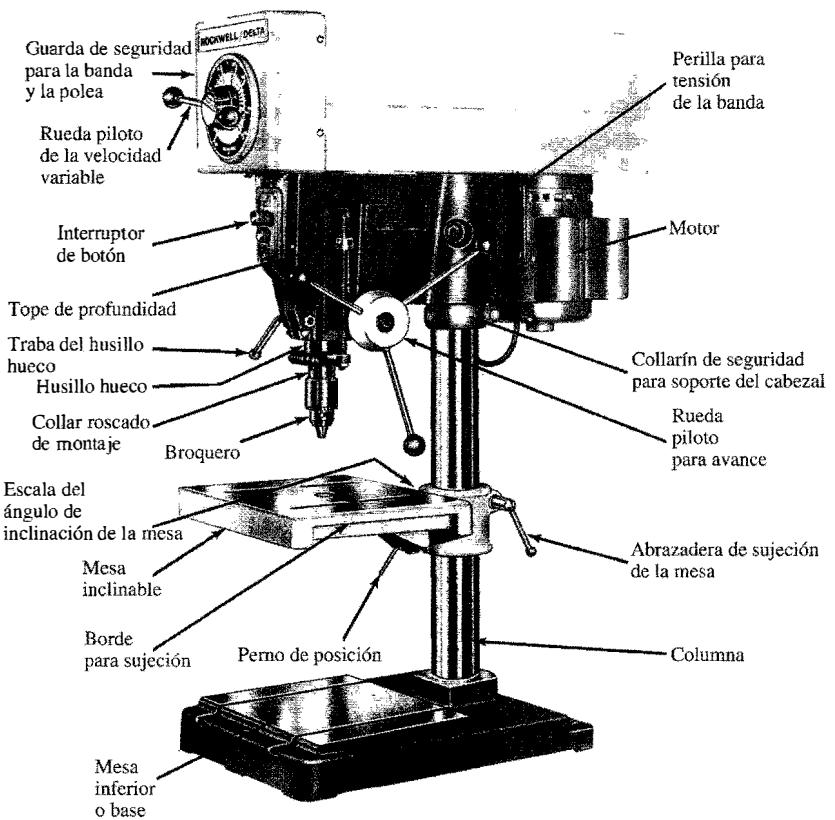


Figura 16-38 Componentes de un taladro de columna de 380 mm (15 pulg) de capacidad (centro del taladro a la columna). (*Cortesía de Delta International Machinery Corp., Pittsburg, Pennsylvania.*)

varios agujeros en un gran número de piezas de trabajo, el taladrado simultáneo con un *cabezal de taladrado de husillos múltiples* asegura mejor precisión de la localización relativa del agujero. Se logra una exactitud excepcional en la localización de los agujeros en la *perforadora con plantilla*, que es en realidad un taladro equipado con una mesa con movimiento de alta precisión en dos direcciones. Con frecuencia se emplea el control numérico.

Las brocas se pueden montar en el contrapunto de un torno para maquinar agujeros de buena concentricidad; las brocas son herramientas importantes para todas las máquinas automáticas.

La calidad de los agujeros taladrados se mejora en gran medida con el *escariado*, que se podría clasificar como una operación de fresado (en la Fig. 16-18*m* se muestra un escariador). Los asientos para los tornillos avellanados se preparan mediante el *abocardado*, que esencialmente es una operación de fresado terminal en el modo de empuje (en la Fig. 16-18*g* se muestra un avellanador).

16-6-2 Fresado

El fresado es uno de los procesos de corte más versátiles, y es indispensable para la manufactura de partes de simetría no rotacional. Existen innumerables variedades de geometrías de fresas, pero básicamente todas se pueden clasificar de acuerdo con la orientación de la herramienta (o, mejor, con la orientación de los filos de corte y del eje de rotación) respecto a la pieza de trabajo, aunque el uso cotidiano puede ser confuso.

Fresadoras horizontales Estas máquinas tienen el eje de la fresa paralelo a la superficie de la pieza de trabajo y en las fuzadoras tradicionales el eje de la cortadora es horizontal, con ambos extremos de la fresa apoyados.

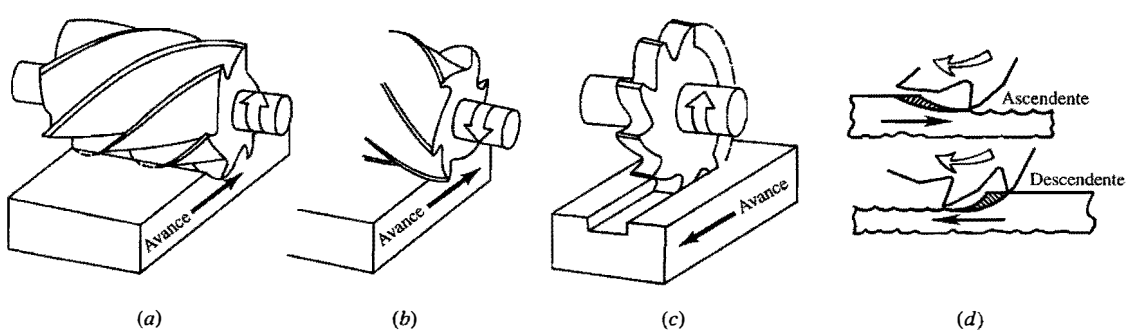


Figura 16-39 En el fresado de eje horizontal el eje de la fresa es paralelo a la superficie de la pieza de trabajo, ya sea que el fresado sea (a) ascendente o (*b*) descendente, lo que resulta en (*d*) diferentes espesores de la viruta sin deformar. Una fresa más angosta (c) realiza ranurado. [(*d*) *Según M.C. Shaw, Metal Cutting Principles, Oxford University Press, 1984. Se publica con autorización.*]

1. En el *fresado simple* o *recto* (Fig. 16-39*a*) los filos de corte definen la superficie de un cilindro y pueden ser rectos (paralelos al eje del cilindro) o helicoidales (véase la Fig. 16-18*c*). La fresa es suficientemente amplia para cubrir todo el ancho de la superficie de la pieza de trabajo. El movimiento primario es la rotación de la fresa mientras que el avance se imparte a la pieza de trabajo. Ambos movimientos, el primario y el de avance, son continuos. Las virutas son más gruesas en la superficie de la pieza de trabajo y disminuyen hacia la base del corte. En el *fresado descendente* (Fig. 16-39*b*), el movimiento de avance se da en dirección de la rotación de la fresa; así, el corte comienza en la superficie con un espesor de la viruta sin deformar bien definido (Fig. 16-39*d*), y la calidad superficial es buena. Sin embargo, la fuerza inicial es alta y la máquina debe tener una construcción robusta y estar equipada con impulsores libres de juego. En el *fresado convencional* o *ascendente* (Fig. 16-39*a* y *b*), el diente actúa desde una profundidad mínima, la superficie se puede rayar y ser más ondulada, pero las fuerzas iniciales son menores. Así, éste fue el método preferido antes de la llegada de máquinas herramienta más rígidas. Note que el espesor de la viruta varía de máximo a cero, de esta forma la potencia necesaria es 50% mayor que la calculada por medio de la ecuación (16-16). El espesor medio de la viruta es por lo general de alrededor de 0.1 mm.

2. Cuando una fresa cilíndrica es más angosta que la pieza de trabajo, los bordes de corte se deben transportar a las caras extremas del cilindro (Fig. 16-39*c*; véase también la Fig. 16-18*d* y *e*). Debido a su acción, estas fresas se llaman *ranuradoras* o *cortadores*. Cuando sólo actúan los dientes laterales, se habla de *cortadores laterales*.

Fresadoras verticales Estas máquinas tienen el eje de la fresa perpendicular a la superficie de la pieza de trabajo (Fig. 16-40). El eje de la fresadora era vertical y aún l●

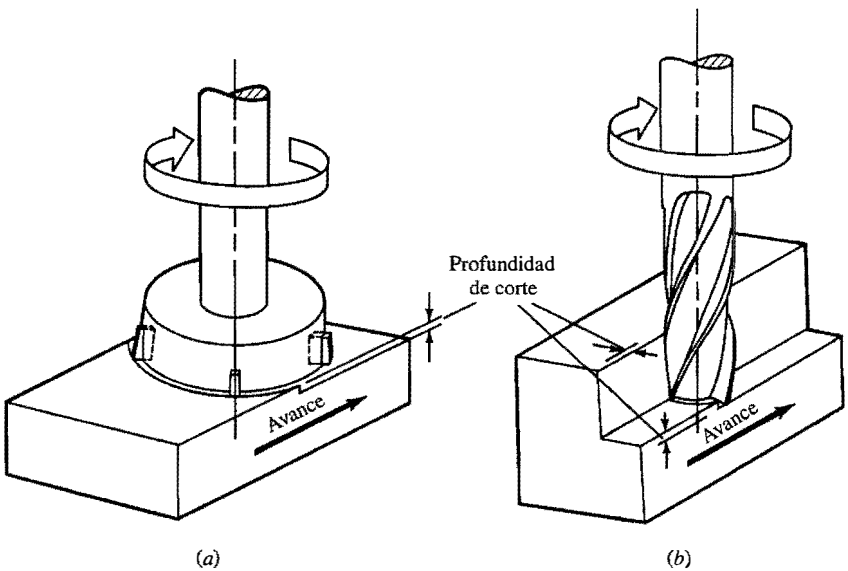


Figura 16-40 En el fresado de eje vertical el eje de la fresa es perpendicular a la superficie de la pieza de trabajo: (*a*) fresado frontal y (*b*) fresado lateral.

es en los *centros de maquinado vertical* CNC. Alternativamente, las máquinas CNC pueden tener un husillo horizontal, y entonces se llaman *centros de maquinado horizontal*; la superficie de la pieza de trabajo es vertical y la remoción de la viruta es más fácil. La cortadora siempre está en cantilever (soportada sólo en un extremo).

1. Cuando los dientes se colocan en la cara de la fresa que es perpendicular al eje (véase la Fig. 16-22), se habla de *fresado frontal* (Fig. 16-40*a*). En muchas formas, esto es similar a maquinar con muchas herramientas de una sola punta que se mueven en círculo. Como el corte siempre empieza con un espesor de viruta definido, en el fresado frontal se usa 40% menos de potencia que en el fresado plano. Una variante que frecuentemente se emplea es el *corte volante*, es decir, el corte con una herramienta de una sola punta fija al extremo de un brazo que sobresale desde el eje perpendicular de fresado.

2. Los bordes de corte transportados sobre la superficie cilíndrica de la cortadora crean un *fresado terminal* (Fig. 16-40*b*; véase también la Fig. 16-18*b*, *h*, *i* y *j*). Las fresadoras terminales se encuentran entre las herramientas más versátiles, ya que se pueden fabricar para seguir cualquier trayectoria en el plano y ser perpendiculares (o en ángulo) a la superficie de la pieza de trabajo. Así, se maquinan cavidades y superficies contorneadas casi de cualquier forma, profundidad y tamaño (Fig. 16-25*e*). Incluso en ocasiones se maquinan completamente superficies enormes como, por ejemplo, al hacer los revestimientos de las alas de aeronaves.

Máquinas fresadoras Los distintos movimientos de avance de una máquina fresadora pueden controlarse a mano, aunque el fresado de formas complejas requiere de una habilidad considerable. Las máquinas de fresado pueden ser mecanizadas o automatizadas hasta varios grados:

1. Las *fresadoras de copiado* usan un modelo de la pieza terminada para transferir el movimiento desde un cabezal de copiado hasta el de la fresadora.

2. Las *máquinas de fresado NC* y *CNC*, que trasladan parte de la habilidad del operador al nivel de la programación (Secc. 2-5-3), se han desarrollado rápidamente. Si se utilizan apropiadamente, aceleran la producción eliminando gran parte del tiempo de puesta a punto y los procedimientos de prueba y error, inevitables con el control manual.

3. Los *centros de maquinado* (Fig. 16-41) son, como se dijo antes, máquinas de fresado CNC, a menudo con capacidad extendida, que realizan no sólo una variedad de operaciones de fresado, sino también taladrado, perforado, roscado interior y posiblemente también de torneado en una sola puesta a punto. Se puede usar más de un cabezal de maquinado; los *centros universales de maquinado* tienen un cabezal horizontal y uno vertical. La mesa *x-y* puede incorporar una mesa rotatoria. Algunos centros de maquinado tienen un diseño modular: los cabezales de las herramientas se pueden cambiar para una producción óptima. Después que se ha preparado una superficie de referencia, algunas veces en una máquina separada, un centro de maquinado trabaja en la pieza de trabajo desde cinco lados. A menudo las máquinas forman el núcleo de las celdas de manufactura flexible (véase Secc. 21-2-4).

Una de las tareas más desafiantes en el fresado es la manufactura de matrices y moldes para el trabajo de metal y para el procesamiento de plásticos. Con frecuencia, la configuración es compleja y los requerimientos del acabado superficial son altos, y las herramientas han crecido hasta tamaños muy grandes (las herramientas para prensado de la carrocería de automóviles pueden medir 5.5 m × 3 m y tener una masa de 65 000 kg). Bajo control manual, la fabricación de herramientas es extremadamente lenta, con una tasa de remoción de metal baja, posibles errores y escaso acabado superficial que precisa un acabado manual extenso. Ahora se usan ampliamente las máquinas de fresado de cuatro o cinco ejes para cortar bloques preendurecidos de acero de herramienta a una rapidez alta y, cada vez más, con pasadas de acabado hechas en la misma puesto a punto. Gran parte del trabajo se realiza con cortadores de nariz de bola; cuando el eje del cortador es perpendicular a la superficie de corte, la velocidad es cero en el centro del cortador. Por lo tanto, en la actualidad las fresadoras permiten inclinar el cabezal entre 15 y 30°, de manera que todo el contacto es con velocidad y avance positivos. La tasa de alimentación en el contorneado 3-D es hasta de 0.2 a 0.5 mm/r a velocidades del husillo de más de 10 000 rpm (20 000 rpm ya no es excepcional e incluso se han alcanzado 60 000 rpm), y la aceleración de los carros se aproxima o incluso excede 1.0 g (10 m/s^2). Sin embargo, las condiciones de corte se deben elegir para permitir que el corte de acabado se realice con una sola herramienta, ya que el cambio de herramientas dejaría una marca visible. En matrices grandes, esto puede requerir una vida de la herramienta de varias horas. Una fresadora terminal o cortador de nariz de bola dejaría marcas en forma de concha que deben eliminarse. En los procesos avanzados, la altura de la

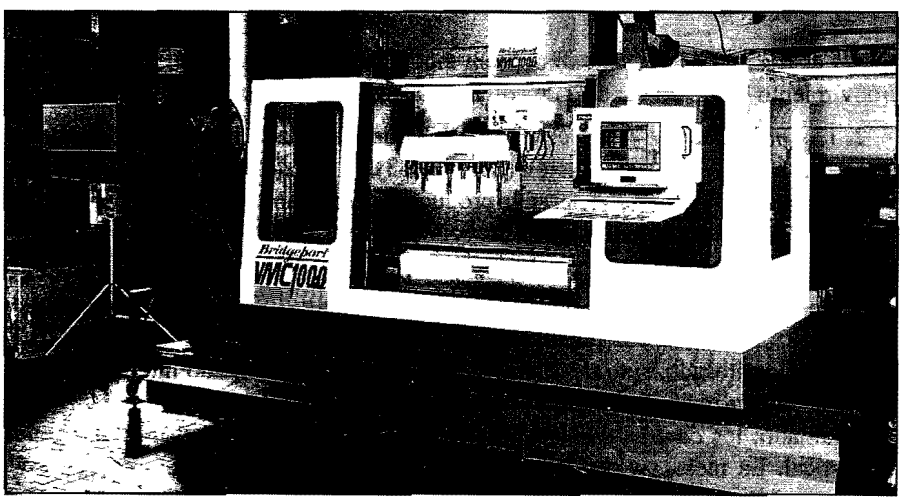


Figura 16-41 Los centros de maquinado son fresadoras con CNC. Un cambiador automático de herramientas carga las herramientas desde un anaquel hacia el husillo vertical. Note el canalón de desecho de viruta a la izquierda. (*Cortesía de Bridgeport Machines Inc., Bridgeport, Connecticut.*)

ondulación es menor de 10 μm, y gradualmente se ha alcanzado el punto donde el acabado manual sólo se requiere para matrices que fabrican partes expuestas (visibles).

En la figura 16-42 se muestra un ejemplo de un molde grande producido en un enorme centro de maquinado.

16-6-3 Aserrado y limado

Una cortadora de ranuras muy angostas se convierte en una *sierra fría*. Los dientes esmerilados con precisión no necesitan penetrar mucho en la dirección radial, y normalmente se producen como insertos de HSS o de punta de carburo colocados a una sierra más grande. Para aplicaciones menos exigentes, la formación exacta de los ángulos de la herramienta se puede relajar, y los dientes se forman doblándolos a su posición. La acción básica de corte de las *sierras circulares* aún está muy relacionada con el fresado.

Cuando los dientes se disponen en una línea recta, se obtiene una *segueta* o, si la hoja de la sierra es flexible y hace en una banda infinita, una *sierra de cinta*. Actual-

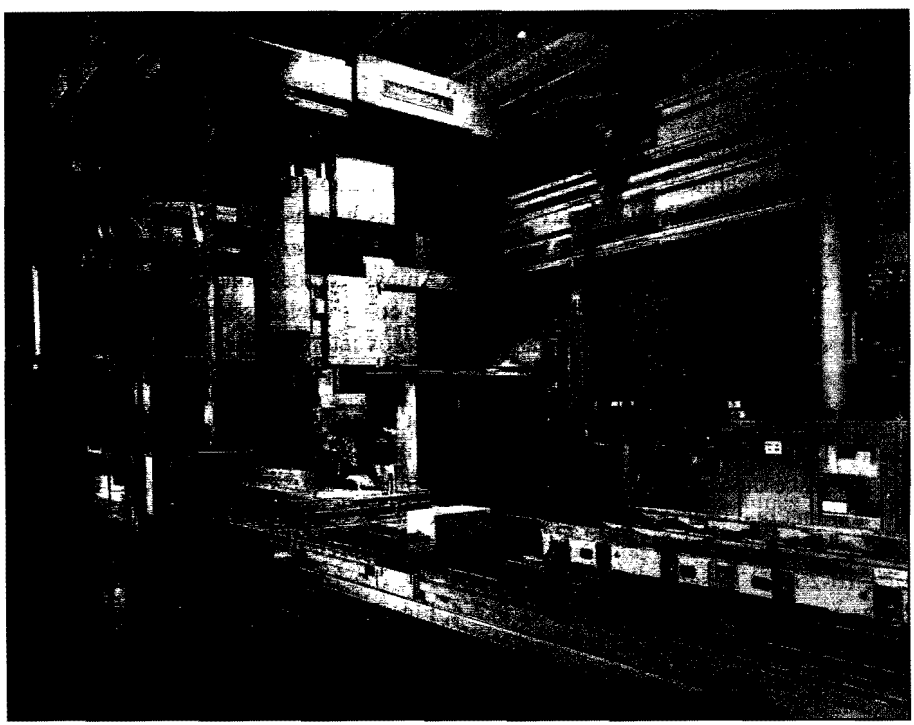


Figura 16-42 El molde para el forro de la plataforma de una camioneta se fresa en un centro de maquinado gigante con ejes múltiples. (*Cortesía de Ingersoll Milling Machine Company, Rockford, Illinois.*)

mente, las máquinas tienen una tasa de avance controlada y algunas se operan programando el software pertinente.

Una fresadora de placa de paso fino configurada en forma plana se convierte en una *lima.* Los bordes individuales de corte se descomponen en una serie de dientes una *lima de corte transversal.*

Todas éstas son herramientas de forma, y el corte progresa con el avance normal positivo o por la presión ejercida en ellas.

16-6-4 Escariado y corte de roscas

Estos procesos difieren de los analizados hasta este punto en que el único movimiento es el movimiento primario de la herramienta. La alimentación se obtiene colocando los dientes progresivamente más profundos dentro de la herramienta; así, cada filo de la herramienta remueve una capa sucesiva del material. La mayor parte del material es removido por los dientes de desbastado, los cuales son seguidos por un número de dientes de acabado diseñados para proporcionar el mejor acabado superficial posible. La forma de la herramienta determina la de la parte (formado puro).

1. El *escariado* procede con un movimiento lineal de la herramienta. Se debe fabricar un escariador separado para cada forma y tamaño; en consecuencia, el escariado es principalmente un método de producción en masa. La pieza de trabajo se sujeta rígidamente y el escariador se guía firmemente. La rigidez de la máquina herramienta es particularmente importante cuando una superficie se escaria con un *escariador plano,* puesto que el escariador se levantaría de la pieza de trabajo por las fuerzas de corte. Un *escariador interno* es jalado a través de las piezas huecas (Fig. 16-43) y es capaz de hacer agujeros con esquinas agudas. Un *escariador externo* trabaja en la superficie exterior de la pieza, la cual se jala o empuja. Ambas técnicas son, hasta un punto, autoguiadas. Los escariadores largos pueden ser de construcción segmentada, lo que también permite alguna flexibilidad usando elementos intercambiables del escariador. La máquina herramienta se parece a una prensa hidráulica de carrera larga.

2. El *corte de roscas* en un agujero es una operación interna que emplea un *machuelo* (Fig. 16-18*k*), el cual se debe remover invirtiendo el giro del husillo, a menos que se utilice un cabezal roscador autorreversible. El roscado de un eje es una operación externa que usan una *tarraja para corte de roscas* (Fig. 16-18*l*). Para ambos, el movimiento primario es helicoidal. Las roscas también se pueden cortar en un torno (Fig. 16-26*a*) o fresar en una máquina CNC de tres ejes. Una alternativa al corte de roscas es el formado de roscas (Secc. 9-7-4, Fig. 9-46). El laminado externo de roscas es, por supuesto, de mucho mayor productividad y muy difundido (Fig. 9-45).

16-6-5 Producción de engranes

Los engranes se encuentran entre los elementos más importantes de las máquinas y su importancia no ha disminuido en años recientes.

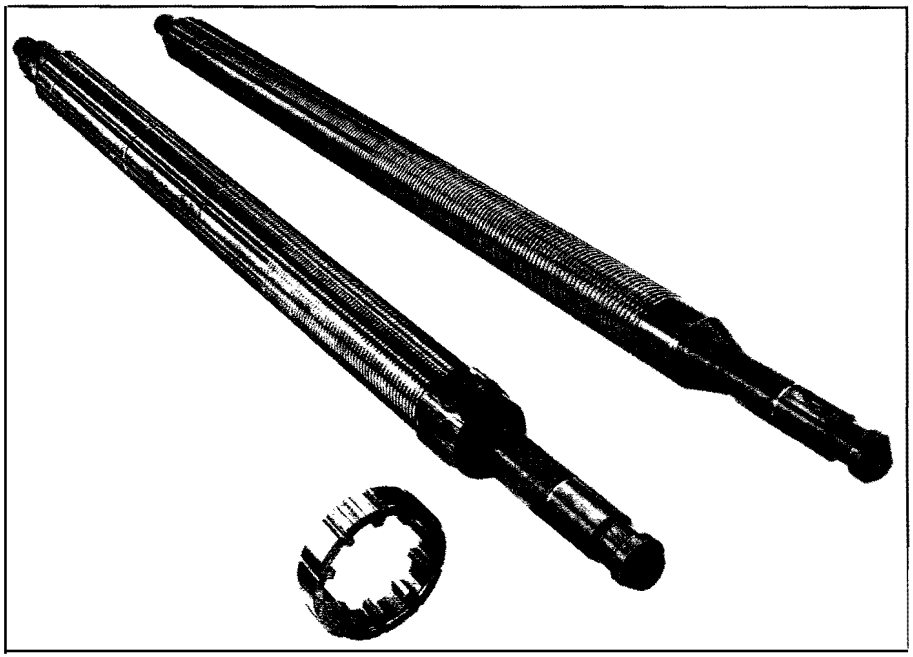


Figura 16-43 Dos escariadores terminan en pasadas sucesivas el perfil interno de anillos del estator de leva para transmisiones automáticas. (*Cortesía de Apex Broaching Systems, Warren, Michigan.*)

Fabricación de engranes Se usan todos los procesos analizados hasta este punto.

1. Muchos engranes empleados en las aplicaciones más críticas todavía se producen por medio de procesos de corte de metal.

a. El *corte de forma* se efectúa con una herramienta que tiene el perfil del espacio entre dos dientes adyacentes. Se utiliza una herramienta de forma operada en un movimiento recíproco (cepillado) (Fig. 16-24*b*) o un cortador formado (Fig. 16-18*a*) instalado en una máquina fresadora horizontal. También se dispone de máquinas especiales para corte de engranes, que trabajan con base en cualquiera de estos principios. Cuando el eje del blanco del engrane se coloca en ángulo al movimiento de la herramienta, se cortan engranes helicoidales.

b. Una multiplicidad de bordes de corte se accionan en la *generación de engranes* (Fig. 16-44). La fresa madre se parece a un engrane sinfín, cuya rosca está interrumpida para formar varios dientes de corte. Al cortar engranes rectos, el eje de la fresa está inclinado respecto al del engrane en un ángulo igual al de la hélice de la fresa. Al cortar engranes helicoidales, el ángulo del engrane se suma al de la hélice de la fresa.

c. El corte de engranes cónicos con dientes rectos o en espiral requiere de una combinación de formado y generado, y se realiza en máquinas de propósito especial

que incorporan mecanismos ingeniosos para desarrollar los movimientos relativos necesarios de la herramienta y del blanco del engrane. Algunas máquinas usan NC o CNC para guiar a la herramienta y al blanco.

d. Los engranes rectos y los helicoidales pueden cortarse mediante el escariado y los blancos se empujan o jalan a través de escariadores externos.

2. A menudo se obtienen costos bajos y dientes de los engranes con mayor resistencia a la fatiga a través de procesos de deformación plástica:

a. Los engranes rectos se producen cortando una barra estirada en frío con la sección transversal apropiada.

b. Los engranes rectos y los helicoidales se pueden extruir en frío (Secc. 9-4-3).

c. Los engranes rectos, los cónicos y, con el uso de herramientas rotatorias más complejas, también engranes cónicos en espiral se pueden forjar en caliente (Secc. 9-3) en formas casi netas.

d. Todas las formas de engrane se pueden laminar. En efecto, la laminación transversal (Secc. 9-7-4) es el método estándar para la producción de tornillos sinfín para reductores de sinfín y corona y de los actuadores lineales, así como para muchos engranes rectos y helicoidales.

3. Los engranes rectos se producen en masa por medio de varias formas de troquelado, incluyendo el troquelado fino (Secc. 11-6).

4. Muchos engranes se fabrican a través de técnicas de metalurgia de polvos, con o sin repercusión y resinterizado (Secc. 11-6).

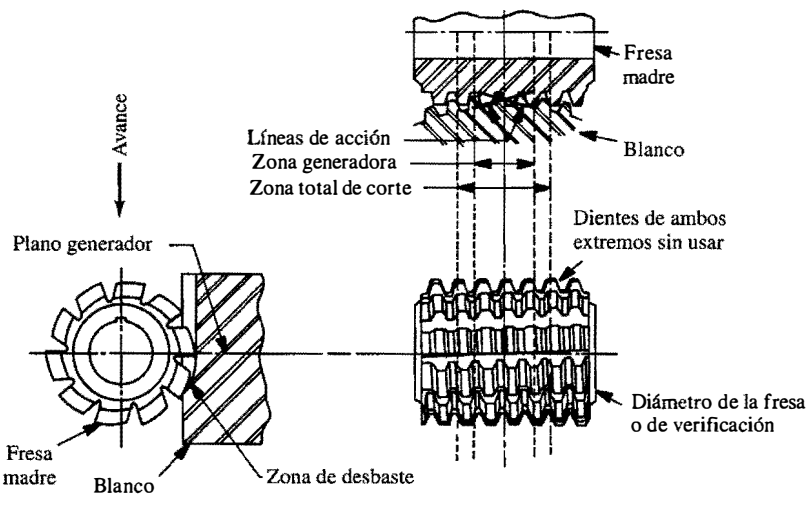


Figura 16-44 El generado de engranes es uno de los muchos procesos empleados en la fabricación de engranes. (*De The Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4a. ed. vol 1, p. 13.48. Con permiso de la Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan.*)

Acabado Los engranes producidos por medio de las técnicas anteriores a menudo son adecuados para su uso inmediato en muchas aplicaciones. Para una operación uniforme y silenciosa a altas velocidades y también para la eliminación de defectos superficiales que reducirían la vida de fatiga, muchos engranes empleados en aplicaciones más críticas se terminan hasta tolerancias estrechas y con un acabado superficial específico.

1. El *rasurado de engranes* está, en alguna forma, relacionado con el escariado. La herramienta de rasurado es un engrane acoplado en el cual se han cortado ranuras circunferenciales para hacer de cada diente un escariador. La herramienta y el engrane se operan en contacto, ligeramente oblicuos, mientras se impone un movimiento axial de oscilación, removiendo de esta forma virutas delgadas. Sólo se elimina un total de 25 a 100 μm. Ésta es aún la técnica que más se utiliza.

2. El laminado en frío (*bruñido*) entre engranes acoplados endurecidos imparte un buen acabado superficial e induce un esfuerzo residual de compresión en la superficie. Éste es un proceso de alta productividad adecuado para la producción en masa.

3. Los engranes endurecidos se terminan por esmerilado de forma, utilizando una rueda terminada con la forma del espacio entre dientes adyacentes, o generando el perfil del diente en máquinas especiales que usan ruedas de lados rectos. Los engranes esmerilados son exactos pero de costo alto.

4. Los engranes endurecidos se pueden lapear contra engranes de lapeado de hierro fundido. En algunos ensambles de engranes, como los engranes hipoides de las transmisiones automotrices, el ensamble se lapea en conjunto aplicando un aceite de lapeado, que contiene un abrasivo muy fino, bajo condiciones controladas.

16-7 ELECCIÓN DE LAS VARIABLES DEL PROCESO

La decisión de maquinar un componente comúnmente es parte de un proceso de ingeniería concurrente más amplio que se extiende a toda la secuencia de manufactura. Una vez que se ha tomado la decisión de maquinar el componente, se planea la secuencia de los pasos de maquinado. Esta planeación tomará en cuenta la maquinabilidad del material de la pieza de trabajo, la forma, la dimensión, las tolerancias dimensionales, el acabado superficial de la pieza terminada, las características del proceso de maquinado que se juzga son adecuadas para el propósito, la disponibilidad de las máquinas herramienta en la planta o con proveedores externos, y los aspectos económicos de la producción. En la forma más sencilla, el resultado de estas deliberaciones influye en la realización de una secuencia de operaciones, como perforado, fresado, taladrado, etcétera.

El corte de metal es algo inusual en el sentido de que en este punto de la planeación se deben tomar algunas decisiones operacionales importantes: aunque el proceso se ha elegido, las velocidades y los avances apropiados para el material de la pieza de trabajo y la herramienta se tienen que elegir. Cuando se van a eliminar volúmenes sustanciales de material, la producción se acelera realizando uno o más *cortes de desbaste* con gran-

des avances y profundidades de corte. Esto también se aplica a las fundiciones y forjas burdas que tienen escamas, zonas burdas o duras, o inclusiones en la superficie. Entonces, el acabado superficial necesario y las tolerancias dimensionales se obtienen haciendo un *corte de acabado* con un avance y profundidad de corte pequeños. Una situación especial se origina con las partes de forma casi neta; puede sólo requerirse un corte, pero se debe lidiar con escamas o zonas duras en la superficie, acrecentando las exigencias para las herramientas.

En un taller pequeño, la elección de los avances y de las velocidades se basa en la experiencia personal del operador; casi siempre, la elección será conservadora. En la producción competitiva, la elección es más crítica porque velocidades y avances bajos resultan en una tasa baja de producción, en tanto que las velocidades y avances excesivos reducen la vida de la herramienta hasta el punto en que el costo del cambio de la herramienta es mayor que el valor del incremento de producción y, más allá de un cierto punto, la rapidez de producción incluso baja debido al tiempo perdido en el cambio de la herramienta. Una elección inicial de velocidades y avances razonables normalmente se basa en la experiencia colectiva, reunida en muchas plantas de producción y laboratorios. Las compilaciones se preparan y actualizan continuamente por varias organizaciones, no sólo dentro de las grandes corporaciones, sino también en organizaciones especializadas como el *Machinability Data Center*, *Metcut Research Associates* (una tarea que en la actualidad continúa haciendo el *Institute of Advanced Manufacturing Science*, Cincinnati, Ohio). La información recolectada se publica en manuales y también está disponible en bancos de datos de computadora.

16-7-1 Velocidades y avances de corte

En la sección 16-1-8 se vio que la vida de la herramienta disminuye rápidamente con el incremento de la temperatura que, a su vez, depende de la energía empleada por unidad de tiempo, y por lo tanto de la velocidad de corte y de la resistencia al corte (o más generalmente, de la dureza) del material de la pieza de trabajo. De ahí que dentro de cualquier grupo de materiales, las velocidades de corte y los avances disminuyen con el aumento de la dureza. Sin embargo, se notan grandes variaciones en las velocidades y avances entre grupos de diferentes materiales, y las recomendaciones generales dadas en el *Machining Data Handbook* (3a. ed.) forman la base de las figuras 16-45 y 16-46. Al emplear estas figuras, se deberá notar lo siguiente:

1. Para algunos materiales no ferrosos, las velocidades cambian poco con la dureza, y entonces en la figura 16-46 la velocidad se indica simplemente por la posición de la identificación de la aleación. Para todos los materiales, los avances dados se aplican para los rangos de dureza indicados por las flechas.

2. Los datos proporcionan un punto inicial conservador para torneado burdo, con una profundidad máxima de corte de 4 mm y una vida típica de la herramienta de 1 a 2 h. Los materiales de las herramientas se identifican genéricamente. El HSS típicamente es M2 o, para los trabajos más pesados, T15; el símbolo WC significa carburos cementados, sin recubrimiento, del grado apropiado para el material de la pieza de trabajo.

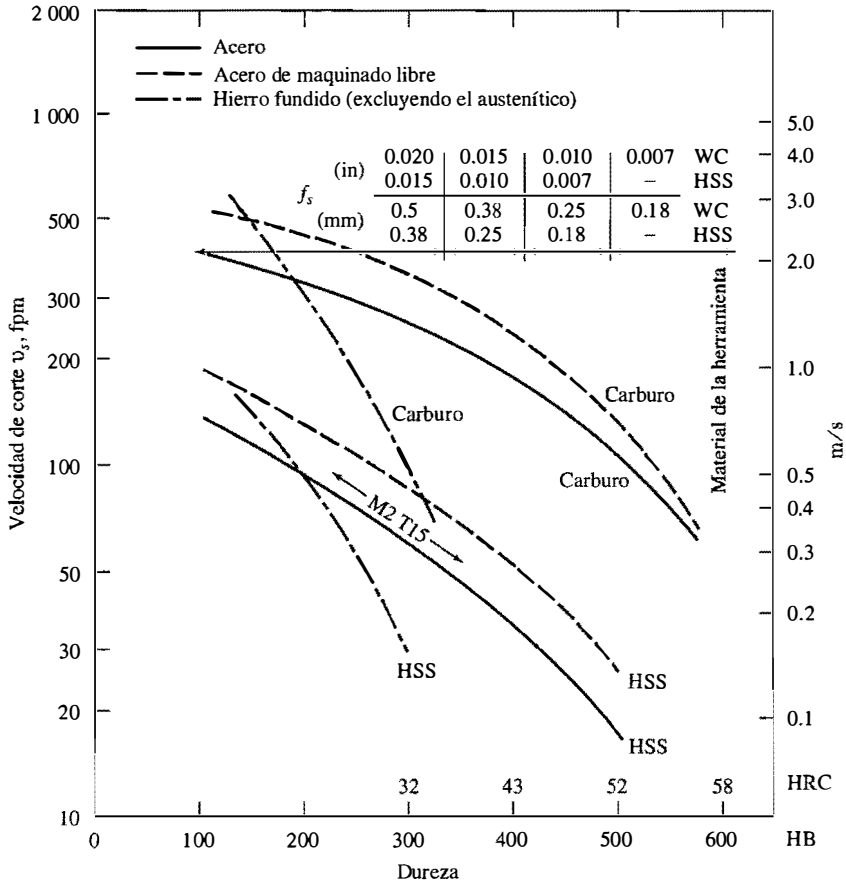


Figura 16-45 Velocidades y avances usuales para el desbaste de materiales ferrosos con una profundidad de corte de 3.8 mm (0.150 pulg). Incremente la velocidad en 20% para insertos desechables de carburo; reduzca la velocidad entre 20 y 30% para aceros inoxidables austeníticos y para aceros para herramienta que contengan más de 1% de carbono.

Las velocidades se pueden elevar en 20% con insertos desechables de carburo. Si se determina que la vida de la herramienta es mucho mayor que 2 h, la operación se puede acelerar. Recordando que los cortes más pesados son más eficientes [ecuación (16-15)], la profundidad de corte, y por consiguiente el avance (que determina el espesor de la viruta sin deformar), se incrementan. Las velocidades de corte mayores generan más calor y se deben usar cuando la vida de la herramienta aún es excesiva.

3. Aunque los datos dados son válidos principalmente para torneado y perforado burdos, también son una guía para la mayor parte de los otros procesos. La velocidad v y la alimentación f para cualquier proceso particular se determinan multiplicando v_s y f_s de la figura 16-45 o 16-46 por los factores Z_v y Z_f, respectivamente (tabla 16-5). Se

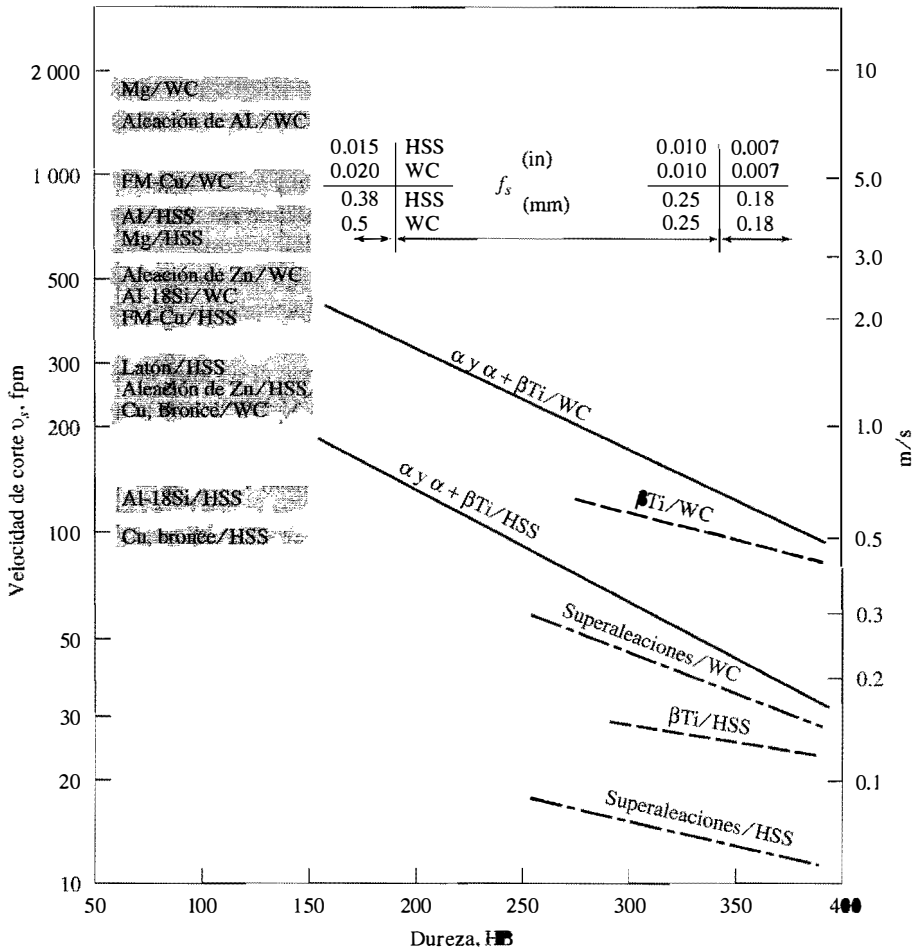


Figura 16-46 Velocidades y avances usuales para el desbaste de materiales no ferrosos con una profundidad de corte de 3.8 mm (0.150 pulg) (FM representa el metal de maquinado libre, WC la herramienta de carburo).

notará que el avance en el conformado y cepillado suele ser muy pesada; los valores menores de avance se deben considerar para los materiales más duros.

4. Se aplican condiciones especiales al taladrado con brocas helicoidales HSS. La velocidad de corte es $v = 0.7\,v_s$ para materiales ferrosos, y $v = 0.5v_s$ para materiales no ferrosos. El avance es por lo general una función del diámetro de la broca D, y es $0.02D$ por revolución para los materiales de maquinado libre, $0.01D$ por revolución para materiales más tenaces o más duros y $0.005D$ por revolución para materiales muy duros (HB > 420). Las brocas revestidas tienen una vida significativamente mayor y pueden permitir aumentos en la velocidad. Los carburos sólidos toleran una velocidad de 2 a 3

veces mayor; el avance más pesado a menudo es mejor que la velocidad mayor. Para agujeros profundos, los avances y las velocidades se deben reducir:

Profundidad del agujero, D	Reducción de la velocidad, %	Reducción del avance, %
3	10	10
4	20	10
5	30	20
6	35	20
8	40	20

5. Para el escariado con herramientas HSS, las velocidades varían de 0.2 m/s (40 ft/min) en material de maquinado libre a 0.025 m/s (5 ft/min) en material duro, en tanto que el espesor de la viruta sin deformar se reduce de 0.12 a 0.05 mm por diente.

6. Los carburos revestidos permiten velocidades mayores, y las recomendaciones del fabricante se consideran para los primeros intentos. En general, la velocidad aumenta en 25% con revestimiento de TiN, de 25 a 50% con revestimiento de TiC y de 50 a 75% con revestimiento de Al_2O_3.

7. Las herramientas cerámicas se prueban al doble de la velocidad recomendada para carburos cementados en los cortes de acabado, y luego se puede incrementar dicha velocidad (hasta 5 veces).

Tabla 16-5 Velocidades y avances en varias operaciones de corte de metal*

Proceso	Z_v	Profundidad de corte, mm	Z_f	Otro
Torneado de desbaste	1	4	1	
Torneado de acabado	1.2-1.3	0.65	0.5	
Herramientas con forma, tronzado	0.7			Avance de penetración $0.1f$-$0.2f$
Cepillado	0.7	4		Avance: HSS, 1.5-0.5 mm WC, 2-1 mm (×2 en Cu, Al y Mg)
Acepillado	0.7	4		
Fresado frontal	1	4	0.8-1†	
Fresado plano	1	4	0.5†	
Fresado lateral y de ranura	0.5-0.7	4	0.5†	
Fresado terminal, periférico	1	1.2	0.5-0.25†	Para cortador de 25 mm de diámetro
Fresado terminal, ranurado	1	1.2	0.2†	
Roscado, machueleado	0.5-0.25			Más lenta para rosca más gruesa

* Extraídos de *Machining Data Handbook*, 3a. ed., Machinability Data Center, Metcut Research Associates, Cincinnati, Ohio, 1980.

† Avance por diente.

NOTA: velocidad $v = v_s Z_v$ y avance $f = f_s Z_f$; tome v_s y f_s de la figura 16-45 o 16-46.

8. Con las herramientas de PCBN, las velocidades alcanzan 2 m/s en hierro fundido al alto Cr, de 10 a 25 m/s en hierro fundido gris y de 2 a 5 m/s en superaleaciones y aceros endurecidos de dureza HRC 50 a 65.

9. Las herramientas de diamante son adecuadas sólo para cortes de acabado de 0.05 a 0.2 mm de profundidad, entre 0.02 y 0.05 mm de avance y velocidades de 4 a 15 m/s (800-2 800 ft/min) para metales ligeros no ferrosos, aunque se han alcanzado velocidades de 70 m/s en la aleación 7075-T6 Al.

Los datos que aquí se proporcionan son suficientemente precisos para propósitos iniciales de planeación. No obstante, las condiciones óptimas dependen de muchos factores, incluyendo de la rigidez de las herramientas, de la pieza de trabajo, del portaherramienta y de la máquina herramienta. Para tasas prácticas de remoción de metal no es raro alcanzar el doble de los valores recomendados y, en máquinas especialmente construidas, el maquinado a muy alta velocidad es posible con herramientas de carburo revestido o de cerámica.

16-7-2 Tiempo y potencia de corte

Una vez que las velocidades y los avances se seleccionaron, se planean los detalles del proceso y se elige el equipo apropiado. Normalmente se siguen los siguientes pasos:

1. Se calcula el volumen V que se va a eliminar. Los manuales contienen numerosas fórmulas, pero los cálculos que parten de consideraciones geométricas sencillas suelen ser igual de rápidos.

2. La rapidez de remoción de la viruta V_t se calcula a partir de la velocidad de corte multiplicada por el área de la sección transversal de la viruta.

3. El tiempo neto de maquinado (de corte) simplemente es

$$t_c = \frac{V}{V_t} \tag{16-23}$$

(En algunas operaciones, como en el torneado, la longitud total de la viruta l se calcula fácilmente y luego $t_c = l/v$.)

4. La energía específica de corte ajustada se toma de la ecuación (16-15), la potencia de la máquina herramienta de la ecuación (16-16) y la fuerza de corte de la ecuación (16-17).

Ejemplo 16-8

La constante C de la ecuación de Taylor, ecuación (16-19), se encuentra multiplicando v_s por 1.75 para HSS, y por 3.5 para WC. Como v_s en las figuras 16-45 y 16-46 se basa en una vida de la herramienta de 1 a 2 h o, en promedio, $t = 90$ min, ¿cuál es valor implícito de n?

De la ecuación (16-19), $v_s(90^n) = C$; para HSS, $v_s(90^n) = 1.75v_s$; $n = 0.125$. Para WC, $v_s(90^n) = 3.5v_s$; $n = 0.28$.

Ejemplo 16-9

El agujero de una fundición de acero, conforme a la norma ASTM A27, 70-36 se va a maquinar usando una herramienta con un inserto desechable de carburo. El diámetro del agujero es de 130 mm, tal y como sale de la fundición; el diámetro terminado es de 138 mm. Sugiera la velocidad de corte y el avance, y calcule la potencia y la fuerza de corte.

De un manual como el MHDE (2a. ed., p. 249), TS = 485 MPa. Esto corresponde a HB = 3(485)/9.8 = 150 kg/mm^2.

Al perforar con $w = (138 - 130)/2 = 4$ mm, la profundidad de corte es equivalente al torneado burdo. De ahí que de la figura 16-45, $v_s = 1.8$ m/s. Para un inserto desechable, incremente en 20%: $v_s = (1.8)(1.2) = 2.16$ m/s. De la tabla 16-5, $Z_v = 1$ y $v = 2.16$ m/s.

De la figura 16-45, $f_s = 0.5$ mm; de la tabla 16-5, $Z_f = 1$, y $f = 0.5$ mm/r.

Para encontrar la potencia necesaria, se debe calcular la tasa de remoción del material V_t. Sección transversal de la viruta $A = fw = (0.5)(4) = 2$ mm^2. $V_t = Av = 2(2\ 160) = 4\ 320$ mm^3/s.

De la tabla 16-1, $E_t = 2.1$ W · s/mm^3. De la ecuación (16-15), $E = E_t h^{-a} = 2.1(0.5)^{-0.3} = 2.59$ W · s/mm^3. Así, de la ecuación (16-16*a*), la potencia, a una eficiencia de 0.7 es 2.59(4 320)/0.7 = 16 kW.

La fuerza de corte, de la ecuación (16-17*a*), $P_c = 15\ 956/2.16 = 7.4$ kN.

Ejemplo 16-10

Se van a taladrar agujeros de 10 mm de diámetro, con una broca helicoidal, en un acero de maquinado libre con HB 180. Determine la velocidad de corte y el avance recomendados.

De la figura 16-45: para HSS, $v_s = 0.75$ m/s. De la tabla 16-5; $v = 0.7v_s = 0.5$ m/s.

Como la circunferencia de la broca es $10\pi = 31.4$ mm, la velocidad angular es 500/31.4 = 16 r/s. El avance es 0.02*D* por revolución o 0.2 mm/r y su rapidez es 0.2(16) = 3.2 mm/s. Como hay dos filos de corte, $f = 0.2/2 = 0.1$ mm/borde.

16-7-3 Elección de la máquina herramienta

La variedad de los equipos comercialmente disponibles es inmensa, en términos tanto de tamaño como de tipo de operación. Además de las máquinas herramientas más comunes, están en operación máquinas de propósito especial, algunas enormes, otras de tamaño diminuto. Así, un torno (hecho por Farrel Co.) para rotores de turbinas de vapor tiene un volteo de 1.9 m y una cama de 14 m de longitud. Hay tornos vertical para piezas de 4 m de diámetro y 3 m de altura con masa de 400 Mg. Una máquina fresadora NC de dos pórticos (producida por Cincinnati Milacron) para esculpir piezas para aeroplanos tiene una mesa de 6 m (240 pulg) de ancho y 82 m (270 ft) de longitud. Puede suceder, por supuesto, que ninguna máquina herramienta con potencia o rigidez suficientes esté disponible; entonces, la velocidad o el avance, o ambos, se deben reducir.

Ejemplo 16-11

Las máquinas herramientas generalmente se construyen con camas y marcos sólidos y se realizan todos los esfuerzos para minimizar las deflexiones. En fechas recientes se propusieron y construyeron máquinas herramientas de construcción radicalmente diferente. Así, en el *hexápodo* el cabezal de maquinado se suspende en seis puntales telescópicos. Tornillos de bola acciona-

dos por un motor se extienden y retraen bajo control computarizado, dando gran libertad para la orientación de la herramienta. Como los puntales se cargan sólo a tensión o compresión, la rigidez es alta. [Fuente: R.B. Aronson, *Manufacturing Engineering*, 1997 (10): 60-67.] También se han propuesto diseños alternos, incluyendo algunos para el maquinado de tres ejes. [Fuente M. Weck y N. Hennes, *Manufacturing Engineering*, 1998 (9): 54-62.]

16-7-4 Control numérico y automatización

Hemos visto que la operación y el control de las máquinas herramientas precisan una habilidad considerable. Esto es particularmente evidente en el fresado de superficies contorneadas tridimensionales; no es sorprendente que el NC primero se haya desarrollado para maquinar componentes contorneados de aeronaves (Secc. 2-5-3). En paralelo con el avance del software, el equipo de computadora y de control progresó rápidamente, y esto se igualó por los avances en materiales para herramientas. Las herramientas mejoradas permitieron la remoción de material con mayor rapidez; con la ayuda de CNC, el tiempo del corte se podríaincrementar y se podrían fijar nuevas metas respecto a las tolerancias. Estos avances también introdujeron cambios en las máquinas herramientas y en su operación.

1. Rigidez. En la sección 4-1-2 se indicó que toda la maquinaria sufre deflexiones plásticas cuando actúan fuerzas en ella. También en el maquinado, la máquina herramienta, la pieza de trabajo, la herramienta, el portaherramienta y los aditamentos forman un sistema dinámico interactivo que se somete a cargas dinámicas y, en respuesta a esto, se pueden desarrollar vibraciones. Como se analizó en la sección 16-1-3, la vibración provoca variaciones en la formación de la viruta, deficiente acabado superficial, elevado desgaste de la herramienta y con el tiempo provoca la fractura de la herramienta. Las vibraciones generadas pueden ser de amplitud muy grande cuando la frecuencia de excitación (por ejemplo, el número de accionamientos de los dientes en el fresado) está cerca de la frecuencia natural dominante del sistema. Con velocidades mayores y una creciente rapidez de producción logradas mediante CNC, la estabilidad de la operación se vuelve crítica. El análisis dinámico de la máquina herramienta es actualmente un paso importante en el diseño del equipo.

2. Control de vibraciones. Se pueden tomar varias medidas. La rigidez aumenta mediante un diseño apropiado y por el uso de materiales con mayor capacidad de amortiguamiento (como polímero-concreto, granito). Las cavidades se rellenan con un material amortiguador de vibraciones, y entonces se colocan aislantes de vibración como almohadillas de caucho, resortes y masas grandes (bloques de inercia) en localizaciones estratégicas. Los absorbentes dinámicos consisten de una masa enlazada con resortes para los componentes vibratorios; afinados a la frecuencia natural de la fuerza de excitación, vibran fuera de fase. Los absorbentes dinámicos controlados activamente usan sensores y actuadores de fuerza en un sistema de lazo cerrado. El sistema puede desafinarse si oscila la velocidad del husillo. Alternativamente, las velocidades del husillo se seleccionan para que estén fuera del rango de vibración mientras se mantiene una salida alta considerando una profundidad máxima de corte.

3. Husillo impulsor. Ésta es una parte crítica de las máquinas herramientas y ha experimentado un desarrollo sustancial. La concentricidad y la deflexión bajo carga (rigidez) se mejoran uniformemente. El impulso es por medio de una caja de velocidades o con bandas pero, para velocidades mayores, se usan mecanismos integrales en que los husillos son extensiones del rotor. Las fuerzas centrífugas son muy grandes a velocidades altas, y se emplean rodamientos hechos con bolas de cerámica de baja masa, o cojinetes hidrostáticos, de aire, o magnéticos.

4. Estabilidad térmica. Con la búsqueda de tolerancias más estrechas, la dilatación térmica de varios elementos de la máquina herramienta se vuelve significativa y se utilizan diversas soluciones para minimizar la dilatación o, si esto no es posible, para compensarla.

5. Movimiento de alimentación. Para emplear CNC, se debe prescindir del volante de las máquinas operadas manualmente y de las levas, de las plantillas de seguimiento y de los embragues de las máquinas automáticas. La mesa de la máquina herramienta cuenta, por ejemplo, con *tornillos guía sin juego*, accionados con *motores de pasos* que mueven la mesa en incrementos pequeños de, digamos, 2.5 μm; el número de ellos depende de la cantidad de pulsos recibidos de la unidad de control CNC. Para un mayor par de torsión, se emplean motores *dc* o *ac*, o la mesa se mueve a través de *actuadores hidráulicos* o, más recientemente, para la máxima velocidad transversal, por *motores lineales*. La aceleración rápida requiere de facilidad de movimiento de las correderas de la herramienta, y se usan ampliamente cojinetes hidrostáticos así como cojinetes lineales de bolas como guías. Los transductores de desplazamiento o codificadores (Secc. 3-4) se instalan para el control del lazo cerrado.

6. Manejo de la viruta. Se debían desarrollar métodos mejorados de *remoción* de grandes cantidades de *virutas*. Parcialmente por esta razón, los centros de maquinado con husillos horizontales, aunque emplean herramientas en cantilever, han encontrado aceptación.

7. Manejo del herramental. Los *cambiadores automáticos de herramientas y los anaqueles* con capacidad de 20 a 60 herramientas tuvieron que instalarse (para FMS, Secc. 21-2-4, se necesitan anaqueles con capacidad hasta para de 200 herramientas). La reducción del tiempo del cambio de la herramienta es particularmente crítica en los centros de maquinado de alta producción. Las herramientas se cargan en la secuencia requerida en la operación, a menos que la máquina esté equipada con un sistema de giro de doble brazo: esto permite la carga de una herramienta de un anaquel en un brazo mientras que la herramienta activa está cortando en otro brazo. Para eliminar el tiempo de puesta a punto, las herramientas se *califican*; es decir, su dimensión se mide previamente y se introduce en el programa CNC. Alternativamente, las herramientas se almacenan en el anaquel en sujetadores individuales especiales que aseguran que siempre estarán sujetas en la misma posición respecto a la máquina herramienta.

8. Programación. Esta tarea se ha simplificado en gran medida. Han surgido dos tendencias generales:

Primero, los lenguajes de programación, a menudo basados en APT, se han simplificado para tareas específicas como el contorneo de dos ejes (ADAPT), y se han agregado postprocesadores para propósitos específicos como taladrado, fresado y trabajo de torno (EXAPT).

Segundo, se ha desarrollado software poderoso que realiza la tarea de programación. Como la descripción de la pieza ya está disponible en CAD, los programas permiten la generación directa de la trayectoria de la herramienta. En la programación convencional, el operador sólo tiene que proporcionar las dimensiones de la pieza y las dimensiones y el material de la herramienta y de la pieza de trabajo; el software ejecuta la programación. Los sistemas avanzados combinan el control de la máquina herramienta con optimización para máxima productividad.

9. Maquinado sin atención. Las operaciones sin atención y con "luces apagadas" (supervisadas sólo por computadoras) son posibles con la introducción del monitoreo automático y del control adaptivo. Se incorporan sondas que verifican la presencia de herramientas, o a una cámara se le "enseña" a reconocer la disposición de la herramienta y a reportar herramientas faltantes o rotas, o a iniciar el cambio de la herramienta. La fuerza de la herramienta se detecta (por ejemplo, por medio de la deflexión del husillo, usando cuatro detectores de posición) y se mide el par de torsión y/o la potencia. Es posible la optimización del proceso; el avance a menudo es la variable controlada dentro de las restricciones fijas por la fuerza máxima, par de torsión y/o potencia. Se utilizan las técnicas para la detección en el proceso del desgaste de la herramienta, de la vibración y de la emisión acústica, y se mide la rugosidad superficial.

10. Medición automática. Ésta es un elemento vital de la automatización. Algunas técnicas son adecuadas para la medición durante el proceso. En otras ocasiones, una estación de medición se prepara dentro de la máquina herramienta o en una estación adyacente, y la información adquirida se retroalimenta a la computadora de control para hacer los ajustes apropiados en el corte de la siguiente pieza.

11. Programación dinámica. Con velocidades y tasas de avance en aumento, los programas que controlan los movimientos de la máquina herramienta también se deben cambiar para acoplarse con el proceso físico del maquinado. Por ejemplo, en el fresado de moldes y matrices, el programa tiene que pronosticar para decelerar el avance al aproximarse a una esquina y acelerar de nuevo cuando la herramienta emerge de ella.

El crecimiento del CNC ha sido rápido; las máquinas herramienta CNC son la fuente de la mayoría de la producción actual de máquinas herramienta, de la que 40% son centros de maquinado y otro 40% son tornos. En el maquinado controlado manualmente se desperdicia mucho tiempo esperando y en el movimiento del material; el corte real ocurre únicamente cerca de 20% del tiempo. Los avances en la integración de las máquinas herramientas CNC con dispositivos de movimiento del material, como robots de propósito especial y cambiadores de plataformas, incrementaron la utilización de las máquinas herramienta al 40% y, en casos especiales, incluso al 70% del tiempo, elevando en gran medida la productividad y reduciendo el número de máquinas requeridas para una cantidad dada de producción.

Ejemplo 16-12 Los avances en las máquinas herramientas se ilustran mediante el trabajo en la *Dearborn Engine and Fuel Tank Plant* de Ford Motor Company. En cooperación con la High Velocity Machine Division of Ingersoll Milling Machine Company y el fabricante de motores lineales Anorad

Corporation, se desarrollaron celdas de producción para el maquinado de alta velocidad de bloques de cilindros de motores de hierro fundido y de las cabezas de aluminio de los cilindros. Éstas reemplazan a las líneas convencionales de transferencia para la producción flexible de cantidades de nivel intermedio (digamos, 200 000/año) con los siguientes resultados:

	Línea de transferencia convencional	Celda de maquinado de alta velocidad
Husillos en la línea de bloque de motor	550	18
Husillos en la línea de la cabeza del cilindro	371	6
Conversión a piezas similares, semanas	40	8
Rapidez de taladrado para hierro fundido, mm/min	150	4 000
para Al, mm/min	330	6 300
Rapidez de fresado para hierro fundido, mm/min	800	9 500
para Al, mm/min	4 000	15 000

[Datos de J.V. Owen, *Manufacturing Engineering*, 1997 (5): 72–82.]

16-7-5 Optimización del proceso de corte

El procedimiento antes descrito para seleccionar avances y velocidades es adecuado para la producción en una escala relativamente pequeña. En un entorno competitivo, la *optimización del proceso* se hace necesaria. Primero, una decisión gerencial se debe tomar respecto al criterio mejor aplicable a la situación. Si el rezago de órdenes es amplia y las obligaciones contractuales requieren entrega rápida, el criterio será *rapidez de producción máxima*. Más comúnmente, el criterio es la *maximización de la ganancia*; esto precisa un modelo muy complejo de todo el sistema de producción. Un análisis menos detallado es suficiente para definir las condiciones de producción para costo mínimo por pieza, y aquí solamente se analizará la optimización de acuerdo con el *criterio de costo mínimo*. Se supondrá que las restricciones como la capacidad de la máquina herramienta, el acabado superficial o la integridad superficial no son dominantes, y que se conocen los factores de costo. Además, se supondrá que las constantes en la ecuación de Taylor son en efecto constantes; en realidad, tienen cierta distribución estadística y algunos análisis toman en cuenta la naturaleza probabilística de los coeficientes.

El costo del material de la pieza de trabajo y el tiempo de carga y descarga (y en consecuencia el costo asociado C_l) son independientes de la velocidad de corte y no entran en esta optimización (Fig. 16-47). El tiempo de corte por pieza es t_c (min) y se cobra a una tasa total R_t ($/min), la que incluye la paga del operador, los gastos indirectos, y el cargo por la máquina herramienta. El precio debe incluir una holgura por los costos de la herramienta. Si una herramienta cuesta C_t, toma un tiempo t_{ch} cambiarla, y corta N_t piezas antes de que se deba cambiar, el costo total por pieza C_{tp} es una fracción $1/N_t$ del costo total

$$C_{tp} = \frac{1}{N_t}\left(t_{ch}R_t + C_t\right) \qquad \textbf{(16-24)}$$

El costo total de la producción dependiente de la velocidad es

$$C_{\text{pr}} = t_c R_t + \frac{1}{N_t}\left(t_{\text{ch}} R_t + C_t\right) \tag{16-25}$$

El tiempo de corte t_c simplemente es la longitud de corte l dividida entre la velocidad de corte v

$$t_c = \frac{l}{v} \tag{16-26}$$

El número de piezas cortadas con una herramienta (N_t) es igual a la vida de la herramienta t dividida entre el tiempo t_c que implica cortar una parte

$$N_t = \frac{t}{t_c} \tag{16-27}$$

Sustituyendo la ecuación (16-26) y la (16-27) en la (16-25) da

$$C_{\text{pr}} = \frac{l}{v} R_t + \frac{t_c}{t}\left(t_{\text{ch}} R_t + C_t\right) \tag{16-28}$$

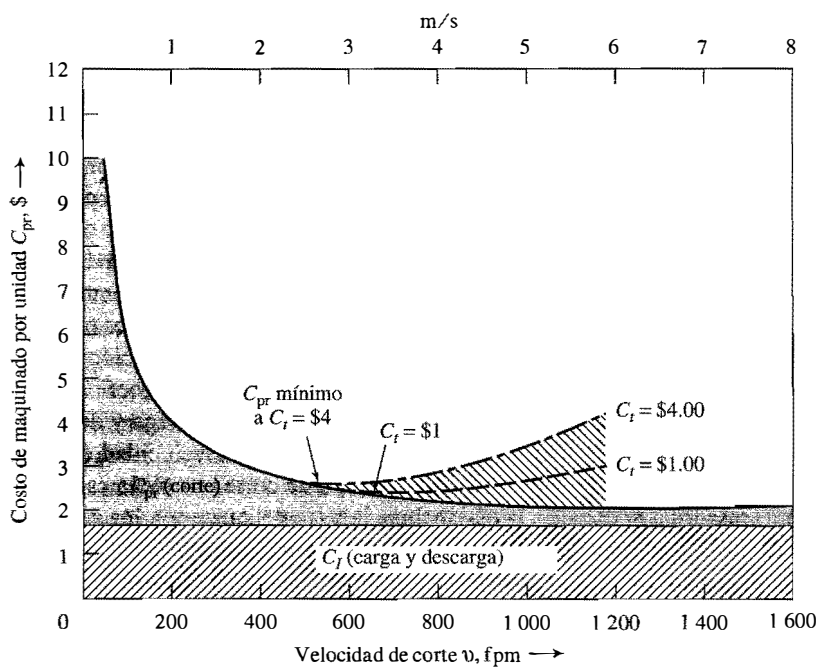


Figura 16-47 La velocidad óptima de corte para la producción de mínimo costo es sensible al precio y a la vida de la herramienta.

De la ecuación de Taylor, ecuación (16-19′), la vida de la herramienta es

$$t = t_{\text{ref}}\left(\frac{C}{v}\right)^{1/n} \tag{16-29}$$

Sustituyendo en la ecuación (16-28) da

$$C_{\text{pr}} = \frac{l}{v}R_t + \frac{l}{t_{\text{ref}}C^{1/n}}(t_{\text{ch}}R_t + C_t)v^{(1-2n)/n} \tag{16-30}$$

El costo de producción C_{pr} es mínimo donde la primera derivada con respecto a v es cero

$$\frac{dC_{\text{pr}}}{dv} = 0 = -\frac{R_t l}{v^2} + \frac{1-n}{n}\frac{l}{t_{\text{ref}}C^{1/n}}(t_{\text{ch}}R_t + C_t)v^{(1-2n)/n} \tag{16-31}$$

Reacomodando, se obtiene la *velocidad de corte para costo mínimo*

$$v_{c\,\text{mín}} = C\left[\frac{n}{1-n}\left(\frac{t_{\text{ref}}R_t}{t_{\text{ch}}R_t + C_t}\right)\right]^n \tag{16-32}$$

Incluso este sencillo modelo demuestra que la velocidad más económica aumenta con el incremento de C y n (como se podría esperar) y también con R_t, es decir, con incrementos en el costo de la mano de obra y del equipo. A la inversa, no se logra mucho al incrementar las velocidades si se desperdicia mucho tiempo t_{ch} en el cambio de la herramienta o, como es evidente en la figura 16-47, si el tiempo no productivo t_l de carga y descarga es una fracción grande del tiempo total. Con demasiada frecuencia, este punto se ha subestimado y el esfuerzo empleado en elevar la rapidez de remoción de metal se podrían emplear en mejorar el movimiento del material y en proveer plantillas posicionadoras y aditamentos de colocación de la pieza de trabajo. La importancia de estos factores se toma en cuenta en la aplicación de la computadora en los procesos de maquinado, como se analizó en la sección 16-7-4.

Ejemplo 16-13

Barras de acero de maquinado libre de diámetro $d_0 = 4$ pulg y longitud $l_0 = 40$ pulg se tornean burdamente con insertos desechables de carburo cementado. Calcule la variación del costo de producción con la velocidad de corte si R_t = \$12.60/h, t = \$4.00/filo, t_l = 8 min y t_{ch} = 10 min.

Primero, encuentre la velocidad de corte. De la figura 16-45, v_s = 500 ft/min con una profundidad de corte de 0.150 pulg y una alimentación de 0.020 pulg/r. De la sección 16-1-8 (predicción de la vida de la herramienta), considere $n = 0.25$ y $C = 3.5v_s$ = 1 750 ft/min.

En seguida calcule el tiempo de corte. El diámetro disminuye por el doble de la profundidad de corte o 2(0.15) = 0.3 pulg. El nuevo diámetro es $d_1 = 4.00 - 0.3 = 3.7$ pulg. El volumen arrancado es

$$V = 40(4^2 - 3.7^2)\pi/4 = 72.6 \text{ pulg}^3$$

Al dividir el volumen entre el área de la sección transversal de la viruta, se obtiene la longitud de corte:

$$l = \frac{72.6}{0.15(0.02)} = 24\ 190 \text{ pulg} = 2\,016 \text{ ft}$$

[Más sencillamente, hay 40/0.02 = 2 000 vueltas, cada una de aproximadamente π (4 + 3.7)/2 = 12.095 pulg = 1 ft de longitud.] Así, el tiempo de corte es

$$t_c = \frac{l}{v} = \frac{2\ 000}{v} \text{ min}$$

El costo neto de corte

$$C_c = t_c R_t = 2\ 000 \frac{12.60}{60v} = \frac{420}{v} \text{ \$}$$

El costo de carga y descarga

$$C_l = t_l R_t = \$1.68$$

A continuación se calcula el costo total de producción por pieza, C_p, de la ecuación (16-28), que se grafica con una línea continua en la figura 16-47. Volviendo a calcular con C_t = \$1.00/filo (línea discontinua en la Fig. 16-47) se muestra la magnitud del incremento de la velocidad que se podría costear si el precio de las herramientas fuera menor. Obviamente, el tiempo de carga t_l sería el objetivo más probable en un esfuerzo de organización de producción.

Sistemas computarizados para optimización El sistema de maquinado tiene un nivel de complejidad inusualmente alto y los problemas se pueden resolver más efectivamente con el poder de la computadora. Son posibles varios niveles de optimización:

1. Las condiciones de maquinado se seleccionan de bases de datos almacenadas de acuerdo con la estrategia de optimización elegida, y se determina la secuencia de carga de la herramienta.

2. Con base en este primer nivel, la secuencia del proceso se optimiza para la forma, el tamaño, las tolerancias y el acabado superficial de la pieza de trabajo específica. Si se involucran varias máquinas, el análisis tiene como objetivo equilibrar las cargas de trabajo y minimizar la inversión.

3. Los sistemas expertos y el modelado del proceso se utilizan para optimizar todo el sistema.

16-8 MAQUINADO ABRASIVO

El término *maquinado abrasivo* normalmente describe procesos en los que el material se elimina mediante una multitud de partículas o granos angulares y abrasivos (también

llamados *gránulos*) que pueden o no estar *aglutinados* para formar una herramienta con forma geométrica definida.

16-8-1 Clasificación

Desde los tiempos más remotos (tabla 1-1), los procesos abrasivos han sido de mucha importancia porque son capaces de producir superficies muy bien controladas y, si se requiere, lisas; si el proceso se conduce apropiadamente, también pueden lograrse tolerancias muy estrechas. Además, la dureza del gránulo abrasivo hace posible maquinar materiales duros, y hasta el desarrollo de procesos de maquinado no tradicionales, el maquinado abrasivo era a menudo el único proceso para la manufactura de piezas en ciertos materiales. Si se realiza apropiadamente, el maquinado abrasivo produce una superficie de alta calidad, con una rugosidad superficial controlada combinada con una distribución de esfuerzos residuales deseable y libre de daño superficial o subsuperficial. Por lo tanto, el maquinado abrasivo con frecuencia es el proceso de acabado para el acero tratado térmicamente y para otros materiales duros. El número de procesos ha crecido (Fig. 16-48), particularmente en los últimos 50 años (tabla 1-1). Algunos principios básicos tienen aplicabilidad general y se explorarán primero con referencia a los metales.

16-8-2 El proceso del maquinado abrasivo

En contraste con los procesos de corte de metal, en el maquinado abrasivo los filos individuales de corte están *distribuidos aleatoriamente* y más o menos *orientados aleatoriamente*, y la *profundidad de contacto* (el espesor de la viruta sin deformar) es pe-

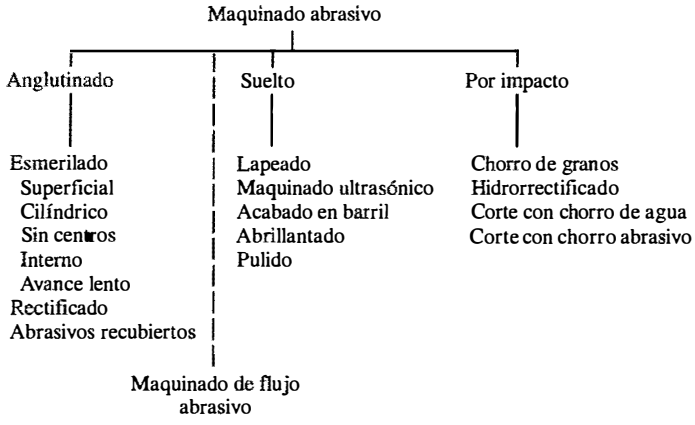
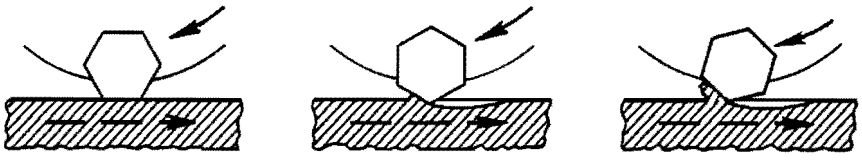


Figura 16-48 Clasificación de los procesos abrasivos. (*Adaptada de J.A. Schey, en ASM Handbook, vol. 20, Materials Selection and Design, ASM International, 1977, p. 695. Se publica con autorización.*)



(*a*) (*b*) (*c*)

Figura 16-49 Dependiendo de la profundidad de acción y del ángulo de ataque, el contacto con un gránulo abrasivo puede resultar en (a) deformación elástica, (*b*) arado o (*c*) formación de viruta.

queña y diferente para todos los granos abrasivos que están simultáneamente en contacto con la pieza de trabajo. Estos factores cambian sustancialmente el carácter del proceso.

El gránulo abrasivo se manufactura para presentar filos agudos; sin embargo, la orientación de los granos individuales es principalmente resultado del azar, y un grano puede encontrar la superficie de la pieza de trabajo algunas veces con un ángulo de ataque positivo, cero, o la mayoría de las veces, negativo. De esta manera, no hay garantía de que el corte ocurrirá en realidad:

1. Con un contacto muy ligero (Fig. 16-49*a*), únicamente tienen lugar la deformación plástica de la pieza de trabajo, del gránulo y, si está presente, del aglutinante. No se elimina material, pero se genera calor sustancial por deformación elástica y fricción.

2. Con una profundidad de contacto mayor, los eventos dependen de las condiciones del proceso. Con ángulos de ataque altamente negativos, el gránulo simplemente ara la superficie de la pieza de trabajo, empujando el material a un lado y delante del gránulo en forma de una proa (Fig. 16-49*b*). Ocasionalmente, la proa se remueve, pero el proceso es ineficiente. La fricción en el gránulo es significativa.

Tabla 16-6 Requerimientos aproximados de la energía específica para el esmerilado superficial*
Profundidad de esmerilado: 1 mm (0.040 pulg)

		Energía específica E_1	
Material	**Dureza, HB**	**W · s/mm³**	**hp · min/in³**
Acero 1020	110	13	4.6
Hierro fundido	215	11	3.9
Aleación de titanio	300	13	4.7
Superaleación	340	14	5.0
Acero para herramienta (T15)	67 HRC	15	5.5
Aluminio	150 (500 kg)	6	2.2

*Extrapolados de datos en *Machining Data Handbook*, 3a. ed., Machinability Data Center, Metcut Research Associates, Cincinnati Ohio, 1980.

3. Únicamente con ángulos de ataque menos negativos, velocidades mayores y con materiales de las piezas de trabajo menos dúctiles, ocurrirá la formación típica de viruta (Fig. 16-49*c*). El ángulo de alivio a menudo es cero e incluso puede ser activo, introduciendo así grandes pérdidas de energía al superar la fricción y la deformación elástica.

4. Gran parte del trabajo se realiza en un espacio pequeño, por lo tanto, las temperaturas aumentan sustancialmente. Cuando los materiales como el acero se maquinan al aire, ocurre la combustión y se ven volar chispas.

Como únicamente una fracción de los contactos gránulo-pieza de trabajo resulta en la remoción real de material, y ya que hay muchas fuentes de fricción, el maquinado abrasivo es ineficiente; la energía necesaria para remover un volumen unitario (tabla 16-6) puede ser más de 10 veces mayor que en el corte.

La mayoría de la energía se convierte en calor, del que sólo una parte se elimina con las virutas; gran parte del calor permanece en la pieza de trabajo con consecuencias indeseables. La decoloración de la superficie se debe a oxidación y el color es indicativo de las temperaturas alcanzadas. La superficie de los aceros tratados térmicamente puede alcanzar temperaturas suficientemente altas para causar una transformación a austenita. Después que el gránulo ha pasado, el enfriamiento repentino origina la transformación de la martensita y grietas asociadas. Un color azul profundo es indicativo de este tipo de "quemado".

El ciclado térmico conduce a esfuerzos residuales de tensión; éstos se superponen sobre los esfuerzos residuales de compresión generados por deformación local debida al arado y al corte con un ángulo de ataque altamente negativo. De ahí que un proceso abrasivo apropiadamente controlado asegure una rugosidad superficial controlada combinada con una alta integridad superficial, en tanto que un proceso mal controlado pueda resultar en un daño superficial sustancial (véase Fig. 16-50*b*).

16-8-3 Abrasivos

Los gránulos abrasivos deben cumplir un número de requisitos a menudo contradictorios.

1. La dureza alta a temperatura ambiente y a temperaturas elevadas ayudan a resistir la abrasión por partículas duras en la pieza de trabajo.

2. La rugosidad controlada o, mejor aún, la facilidad de fractura (*fragilidad*) permite que ésta ocurra bajo la imposición de esfuerzos mecánicos y térmicos. Así, se generan nuevos filos de corte en un gránulo desgastado, pero a costa de una pérdida de material abrasivo.

3. La baja adhesión al material de la pieza de trabajo minimiza la formación de la acumulación sobre el filo, la redeposición de detritos del esmerilado sobre la pieza de trabajo y el dislocamiento de granos de una estructura aglutinada. Al mismo tiempo, la adhesión al aglutinante asegura la resistencia de un abrasivo aglutinado.

4. La estabilidad química aumenta la resistencia al desgaste y la resistencia a la corrosión por el oxígeno y los fluidos de corte.

5. El grano debe tener una forma que presente varios filos de corte agudos. Como la rapidez de avance es baja, el tamaño del grano es varias veces mayor que la profundidad de contacto. El tamaño del gránulo se especifica igual que para los otros materiales particulados (Secc. 11-2-2).

Sólo algunos abrasivos que se encuentran en la naturaleza, principalmente varias formas de SiO_2 y Al_2O_3, tienen aplicación, y únicamente para trabajo de materiales suaves o en procesos de acabado. La mayor parte de los abrasivos industriales se manufacturan (Secc. 12-3-2). La *alúmina* (Al_2O_3) se produce en grados variables de durezas; los grados más duros son frágiles, adecuados para operaciones ligeras de presión y para acabados, en tanto que los grados menos duros y más tenaces (como los abrasivos de alúmina sinterizada y de alúmina-circonia) son adecuados para trabajo pesado de arranque de material. El *carburo de silicio* (SiC) es más duro que la alúmina (tabla 16-3), pero se desgasta rápidamente en el acero al bajo carbono, en el que el carbono del carburo se disuelve. Los gránulos más duros son el CBN y el diamante, y colectivamente se llaman *superabrasivos*. El CBN es preferible para aceros endurecidos, superaleaciones e hierro fundido. El diamante se disuelve en hierro a altas temperaturas, por lo tanto, se usa principalmente para herramientas de carburo cementado, cerámicos y vidrio. Igual que con otros abrasivos, los granos más frágiles se fracturan con caras agudas y cortan más fríos.

16-8-4 Esmerilado

El *esmerilado* es el proceso más empleado de todos los procesos de maquinado abrasivo.

Ruedas de esmeril El abrasivo se aglutina, con un agente apropiado, en una rueda de simetría axial, cuidadosamente balanceada para rotación a altas velocidades. La *rueda de esmeril* es una herramienta compleja hecha en un entorno de manufactura estrictamente controlado.

1. La *resistencia del aglutinante*, gobernada por la cantidad, el tipo y la distribución del agente aglutinante, se elige de manera que el gránulo se sujete firmemente, bien soportado, pero aún se permite que se fracture. En un punto, el desgaste resultaría en fuerzas altas inaceptables sobre el gránulo, calentamiento excesivo y escasa calidad superficial; entonces, el gránulo se debe liberar para permitir que un nuevo gránulo entre en acción. Una consecuencia natural de esto es que un volumen Z_s de la rueda se pierde en un tiempo unitario. Durante dicho tiempo un volumen Z_w se elimina de la pieza de trabajo. Es común expresar la razón de los dos volúmenes como la *razón de esmerilado G*

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} \tag{16-33}$$

Como el gránulo se desgasta más rápidamente cuando se esmerilan materiales más duros, una regla general enuncia que *se debe usar una rueda más suave (aglutinada*

menos fuertemente) *para esmerilar materiales más duros*. Las razones de esmerilado típicamente se encuentran en el orden de decenas en aceros para herramienta, alrededor de 100 a 200 en acero endurecido, pueden alcanzar cientos o miles con CBN o diamante, pero ser menores que la unidad en materiales muy duros.

2. Más frecuentemente, la rueda no es sólida sino que tiene una porosidad controlada y una *estructura* más o menos abierta. Los granos están aglutinados uno con otro mediante *pilares aglutinados* (Fig. 16-50*a*). Una estructura más abierta tiene pilares más delgados, acomoda virutas hasta que las desaloja el fluido para esmerilar y permite que el fluido se mueva a través de la rueda.

La mayor parte de las ruedas de esmerilar está aglutinada con vidrio. Las ruedas con *enlaces vitrificados* son las más resistentes y las más duras, y la composición del vidrio se puede ajustar sobre un amplio intervalo de resistencias. La denominada *rueda de silicato*, aglutinada con vidrio soluble, es la más suave.

Los agentes aglutinantes orgánicos son de menor resistencia, pero están disponibles en un rango amplio de propiedades. Las *ruedas con resina* están aglutinadas con resinas termofijas y se refuerzan fácilmente con anillos de acero, fibra de vidrio u otras fibras, para incrementar su resistencia a la flexión. Con los polímeros más flexibles como la laca o el caucho, pueden fabricarse *ruedas de corte* muy delgadas. Los metales (por lo general bronce sinterizado) se emplean para superabrasivos, aunque el costo de las ruedas sólidas es muy alto. Tanto el CBN como el diamante se pueden recubrir con un metal (a menudo Ni o Cu) para lograr una mejor unión con la matriz; parte del mejoramiento proviene del entrelazado mecánico con el recubrimiento. En el diamante, un recubrimiento delgado de Ti forma una interfaz de TiC que también mejora la retención de cristal. Para velocidades mayores, las ruedas tienen centros de metal o de compuestos reforzados con fibra; el abrasivo (o superabrasivo) se aglutina en una capa de 3 a 5 mm de espesor o se coloca en segmentos. Alternativamente, una rueda de acero (a menudo cortada con la forma) se recubre con una sola capa de superabrasivo por medio de soldadura fuerte o electrochapado. Esas *ruedas recubiertas* tienen una estructura del gránulo más abierta y cortan más frías.

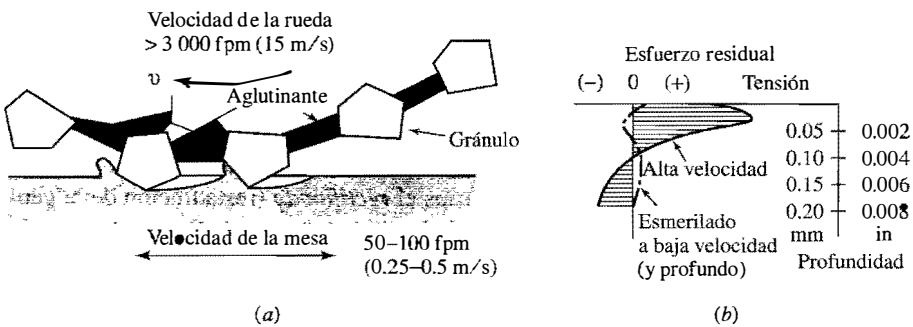


Figura 16-50 (*a*) Una rueda de esmerilado contiene gránulos abrasivos en un aglutinante. (*b*) El esmerilado provoca esfuerzos superficiales residuales que pueden acumular mucha tensión en el exceso de esmerilado.

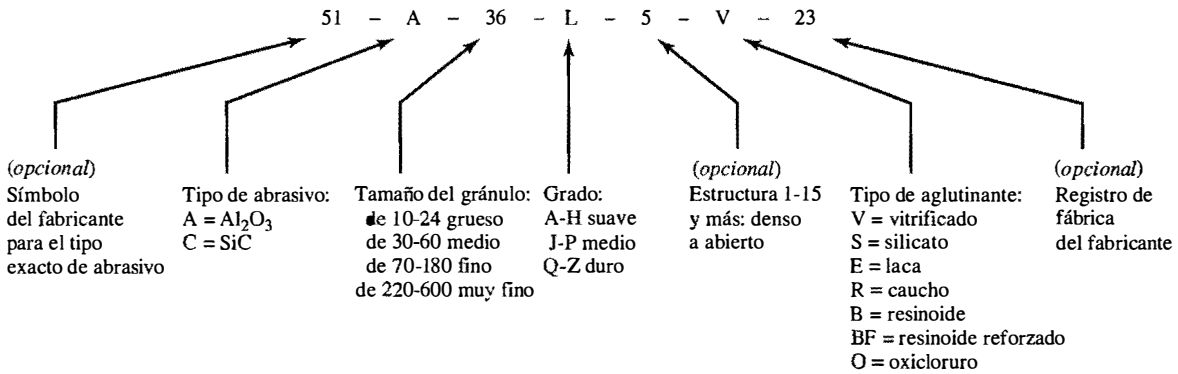


Figura 16-51 Las ruedas de esmerilar se describen por medio de una nomenclatura estandarizada. (*De ANSI B74.13-1977, American Society of Mechanical Engineers, Nueva York; también ISO 525-1975E.*)

El tamaño y la distribución del tamaño del gránulo y la porosidad de la estructura contribuyen a determinar el desempeño del esmerilado; por lo tanto, las designaciones estándar de las ruedas de esmeril se refieren a todos estos factores (Fig. 16-51).

Variables del proceso Las *velocidades de operación* (*superficie*) normalmente están entre 20 y 30 m/s (de 4 000 a 6 000 ft/min). Las velocidades de hasta 150 m/s (30 000 ft/min) se logran en el esmerilado de alta velocidad con ruedas y superabrasivos especialmente construidos. Suele existir una velocidad óptima a la cual la razón G es mayor. La rapidez de remoción del material se incrementa con la fuerza impuesta a la rueda pero, más allá de un cierto límite, la razón G baja pronunciadamente. Las condiciones prácticas representan un compromiso, para dar una rapidez alta de remoción del material con una razón de esmerilado económicamente tolerable. Las altas velocidades rotacionales imponen esfuerzos grandes en la rueda; todas las ruedas se deben inspeccionar, para evitar posibles fallas, antes de su instalación en bridas balanceadas, y el equipo debe protegerse apropiadamente para beneficio de los operadores.

Rectificado y apresto Incluso la rueda de esmerilar mejor elegida experimenta cambios graduales. Puede desarrollar un patrón de desgaste periódico que conduce al castañeo y a la emisión de un chirrido, o puede perder su geometría aun si permanece balanceada. Al esmerilar materiales duros, el desgaste causa el *vidriado* de la superficie. En otros casos, la superficie de la rueda se tapa (*satura*) con el material de la pieza de trabajo. Por todas estas razones, son necesarios el *rectificado* (restauración de la geometría deseada) y el *apresto* (reposición de la habilidad de corte). Esto se hace en la esmeriladora misma, de manera que la alineación y el balance de la rueda no se pierdan. Se usan dos métodos básicos. En uno, a la rueda se le da un acabado al cortar con una *punta de diamante* (en el caso de esmeriladoras CNC, bajo control CNC) o con un disco rotativo impregnado con diamante. En el otro, una rueda con un aglutinante frágil se *termina por presión* presionando un rodillo de acero de alta resistencia contra su superficie; esto es muy rápido y particularmente económico para el apresto de ruedas con

forma. El apresto innecesario aumenta el costo, especialmente con superabrasivos, por lo que cada vez más se emplean varias técnicas de detección (fuerza, par de torsión, o emisión acústica) para monitorear las condiciones del esmerilado y para determinar la condición de la rueda. Las ruedas chapadas superficialmente no requieren acabado ni rectificado, pero se pueden volver a chapar.

Lubricación y enfriamiento Una parte indispensable del sistema de esmerilado es el *fluido para esmerilar* (tabla 16-2). Éste cumple una función triple: primero, mantiene la superficie esmerilada fría y puede evitar su quemado y agrietamiento en materiales duros; segundo, afecta el proceso de corte y reduce la carga y el desgaste de la rueda de esmerilar (e incrementa la razón de esmerilado); tercero, reduce la fricción y en gran medida la generación de calor. Por consiguiente, como en el corte, tanto el enfriamiento como la lubricación son importantes; sin embargo, la función de la segunda es mucho más trascendente en el esmerilado que en el corte. Las máximas ventajas se obtienen con aceites y con fluidos acuosos que incorporan aditivos de lubricación. No es poco común que los requerimientos específicos de la potencia bajen en un factor de 4 o más; la rapidez de remoción de metal y el volumen que se puede eliminar antes del inicio del castañeo se incrementan cinco veces o más; las razones de esmerilado aumentan en un factor de 10 o más. Para mejores resultados, el lubricante se suministra con alta presión, si es posible, a través de la rueda. El desecho del cieno del esmerilado puede ser un problema serio, especialmente si el residuo se clasifica como material peligroso. Una razón para el uso creciente de CBN es que el desgaste lento de la rueda reduce la cantidad de cieno que se forma.

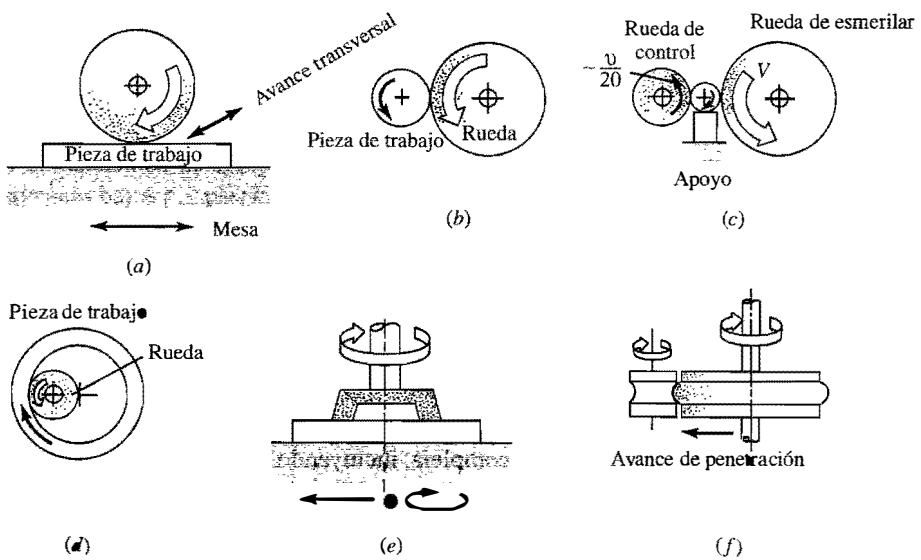


Figura 16-52 Varios procesos de esmerilado: (a) esmerilado superficial, husillo horizontal; (b) esmerilado cilíndrico; (c) esmerilado sin centros; (d) esmerilado interno; (e) esmerilado superficial, husillo vertical, y (f) esmerilado de forma (por penetración).

Procesos de esmerilado La geometría del esmerilado puede ser tan variada como la de otros procesos de maquinado (Fig. 16-52).

1. El *esmerilado superficial* se practica con la superficie cilíndrica de una rueda (como en el fresado plano), pero ésta suele ser más angosta que la pieza de trabajo y se debe avanzar en forma cruzada (proporcionando un movimiento transversal de avance a la pieza de trabajo, Fig. 16-52*a*).

2. El *esmerilado cilíndrico* (Fig. 16-52*b*) tiene resultados similares al torneado, excepto que la rueda de esmerilar que gira rápidamente, ahora trabaja sobre la superficie de la pieza, que gira más lentamente y los cortes individuales son pequeños. El esmerilado superficial se puede comparar con el esmerilado cilíndrico por medio del diámetro equivalente D_e

$$D_e = \frac{D_g}{1+(D_g / D_w)} \qquad \textbf{(16-34a)}$$

donde D_g es el diámetro de la rueda de esmerilar y D_w es el diámetro de la pieza de trabajo.

3. Las piezas cilíndricas de gran precisión se obtienen a una rapidez alta en el *esmerilado o rectificado sin centros* (Fig. 16-52*c*); la pieza de trabajo se soporta ligeramente en un soporte del trabajo, mientras que la presión de esmerilado se toma de la *rueda de regulación* que gira a cerca de 1/20 de la velocidad de la rueda de esmerilado.

4. En el *esmerilado interno* (Fig. 16-52*d*), una rueda pequeña trabaja en la cavidad de la pieza de trabajo, y los cortes individuales son mayores que en el esmerilado cilíndrico (externo):

$$D_e = \frac{D_g}{1-(D_g / D_i)} \qquad \textbf{(16-34b)}$$

donde D_i es el diámetro interno.

5. Todo el ancho de una pieza de trabajo plana se puede esmerilar con la cara extrema anular de una *rueda de copa* (Fig. 16-52*e*); esto se parece al fresado terminal. Las piezas más pequeñas también se pueden fresar en la cara extrema de una rueda cilíndrica; esto se llama *esmerilado lateral*. Las superficies paralelas de alta precisión se forman por medio del *esmerilado de disco doble* entre las caras extremas de dos ruedas.

6. Además de generar superficies geométricas básicas, el rectificado se emplea para terminar muchas piezas de forma compleja, incluyendo roscas, engranes y la mayoría de las herramientas de corte. Igual que en otros tipos de maquinado, se practica el formado (Fig. 16-52*f*) y la generación de superficies (Figs. 16-24 a la 16-26).

Para una geometría dada del proceso, el espesor de la viruta sin deformar y la longitud del corte aumentan con el incremento de la profundidad del contacto de la rueda, con el aumento de la rapidez de avance y con la disminución de la velocidad de la rueda.

Objetivos del esmerilado El esmerilado originalmente se consideraba como un proceso de acabado; sin embargo, su alcance se ha expandido considerablemente. Los procesos se pueden categorizar de acuerdo al espesor de la viruta sin deformar.

1. *Esmerilado de precisión.* Originalmente, la mayor parte del esmerilado se realizaba para mejorar las tolerancias y el acabado superficial. El espesor de la viruta sin deformar es pequeño y los requerimientos de energía específica son altos (tabla 16-6). Algunas veces el proceso se controla aplicando una fuerza constante en vez de un avance constante. Hasta el advenimiento del maquinado de precisión, el esmerilado era el método principal para fabricar piezas de precisión, y aún ocupa una posición dominante.

2. *Esmerilado burdo.* Más recientemente, el esmerilado se ha convertido en un proceso de remoción de material. Las ruedas se fabrican para liberar el gránulo desgastado sin necesidad de apresto, pero sin desgaste excesivo. Las velocidades aumentan porque entonces se obtiene una rapidez mayor de remoción del metal; la formación de viruta domina, y la energía específica baja a entre 5 y 10 $W \cdot s/mm^3$. El esmerilado burdo (*rebarbado*) de fundiciones y forjas, para remover compuertas o rebaba, se ha practicado desde hace tiempo.

3. *Esmerilado profundo.* La profundidad completa se elimina con una sola pasada pero a una tasa baja de alimentación. La acumulación de calor delante de la rueda acelera la remoción de metal, pero sin efectos dañinos, porque el material dañado por calor se esmerila.

4. *Esmerilado profundo de alta eficiencia.* El HEDG usa ruedas formadas de CBN de una sola capa para eliminar material a una alta rapidez, con velocidades de 100 a 150 m/s y avances de 700 a 2 500 mm/min. La mayoría del material se remueve en virutas finas, como en el fresado, de ahí que el proceso también se llame *maquinado superabrasivo.*

Un buen acabado superficial no es garantía de buena calidad superficial; la integridad superficial de componentes endurecidos se asegura con el uso de ruedas suaves, avances bajos por pasada, altas velocidades de la rueda, apresto frecuente de las ruedas y un copioso fluido de fluido para esmerilado. Las partes esmeriladas con CBN a menudo presentan mayor vida de fatiga, aunque la superficie tiende a no ser tan fina como con la alúmina.

El esmerilado se presta para el control CNC, y las esmeriladoras han experimentado un desarrollo similar al de las máquinas herramientas (Secc. 16-7-4). El control adaptivo es posible, y las ruedas CBN con su larga vida son particularmente adecuadas para producir piezas de precisión.

Ejemplo 16-14

Un bloque de acero H13 tratado térmicamente, con dureza HRC 55 y 50 × 100 mm de área superficial, se esmerila en una esmeriladora recíproca de mesa con husillo vertical, usando una rueda de copa de 150 mm de diámetro (como en la Fig. 16-52*e*). En el *Machining Data Handbook* (3a. ed., vol. 2, p. 8.45) se recomienda una velocidad de la rueda de 1 500 m/min, una velocidad de la mesa de 30 m/min, y una profundidad de corte de 0.05 mm, empleando una rueda

de grado A80HB. Se va a eliminar un total de 0.4 mm. Calcule las rpm de la rueda y el tiempo total de esmerilado, suponiendo que la inversión de la mesa toma 0.5 s.

Es común esmerilar en dirección de la longitud. Para obtener un acabado superficial uniforme, la rueda debe librar la pieza de trabajo al final de la carrera; así, la carrera total es 100 + 150 = 250 mm. La velocidad de la superficie es 1 500 m/min = $D\pi N = 0.15\pi N$. Entonces, $N = 3\,183$ rpm. El número de pasadas, a 0.05 mm/pasada, es 0.4/0.05 = 8 pasadas. Tiempo/pasada = carrera/velocidad de la mesa = 0.25(60)/30 = 0.5 s/pasada. El tiempo total para 8 pasadas = 8(0.5 + 0.5) = 8 s.

16-8-5 Otros procesos con abrasivos aglutinados

Además del esmerilado, hay otros procesos que utilizan gránulos abrasivo aglutinado.

Abrasivos recubiertos Tradicionalmente, los granos abrasivos sujetos a un respaldo flexible como papel o tela se usan para el acabado de superficies a baja velocidad. Sin embargo, con el desarrollo de adhesivos y refuerzos más fuertes, *bandas recubiertas* que operan a altas velocidades (por lo general de 15 a 30 pero hasta 70 m/s) se han convertido en importantes herramientas de producción, capaces de una alta rapidez de remoción de metal. Hasta 6 mm de material se pueden remover en una pasada, a una rapidez de 200 $cm^3/min \cdot cm$ de ancho, reemplazando al torneado, el cepillado o el fresado en la producción en masa (por ejemplo, en el maquinado de las superficies de empaquetado de bloques de motores y cabezas de cilindros).

Los granos se depositan en una capa de adhesivo (*recubrimiento de forma*) aplicada al respaldo, y se mantienen en su lugar con una segunda capa (*recubrimiento de apresto*). La resistencia del aglutinante se equilibra para prevenir el desprendimiento de los granos nuevos, en tanto que permite la liberación de los desgastados. Los granos con bordes agudos y de formas alargadas se alinean electrostáticamente para proporcionar filos de corte de ángulos de ataque negativos bajos, espaciados unas 10 veces más lejos que en las ruedas de esmerilar. Algunas bandas tienen capas múltiples de gránulos que alargan la vida.

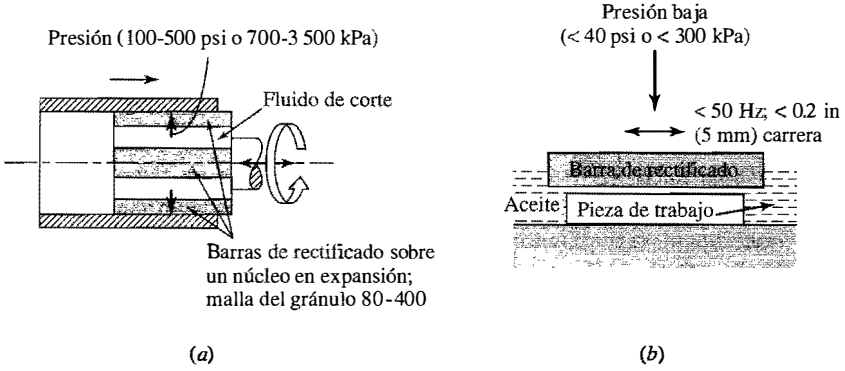


Figura 16-53 Ilustración esquemática del maquinado abrasivo de movimiento alternante con abrasivos aglutinados: (*a*) rectificado y (*b*) superacabado.

La formación de viruta es el modo dominante de remoción de metal, y las necesidades específicas de energía y las temperaturas de la superficie son relativamente bajas. Los fluidos para esmerilar sirven para lubricar, enfriar, desalojar las partículas y reducir el taponamiento. Una rueda de contacto ranurada o una placa se usan detrás de la banda. Por lo tanto, el corte es intermitente; el calor puede fluir hacia la pieza de trabajo durante el periodo sin corte, permitiendo una alta rapidez de remoción sin quemado. Un corte aún más agresivo ocurre con un disco de respaldo.

El *corte con alambre abrasivo* utiliza gránulos de CBN o de diamante aglutinados a una superficie de alambre.

Rectificado En el *rectificado*, el abrasivo se hace con forma de plancha (*piedra, barra*). En la aplicación más frecuente (Fig. 16-53*a*), una superficie cilíndrica interna se termina con un número de barras de rectificado portadas en un cabezal en expansión que oscila axialmente (con velocidades axiales de 2 a 4 m/s), mientras que la pieza de trabajo se gira entre 2 y 15 m/s. Así, se produce un patrón achurado. Un fluido de rectificado, normalmente un aceite, se aplica para desalojar las partículas abrasivas. También se emplean los fluidos con base de agua, especialmente para los superabrasivos. La filtración es esencial en todos los casos.

Ejemplo 16-15

El aceite transportado hacia arriba por los anillos del émbolo proporciona lubricación de la pared del cilindro en los motores de combustión interna. Un acabado muy liso no sostendría el aceite, y el motor rápidamente se inmovilizaría; los mejores resultados se obtienen con un acabado achurado. Para esto, se usa un proceso de dos pasos. En la primera pasada, piedras de gránulo de 70 a 100 producen el patrón achurado. En la segunda pasada, piedras de gránulo 600 derriban los picos del acabado previo. Así, se dejan surcos profundos que atrapan lubricante y luego lo alimentan a las superficies altas aplanadas. (El acabado es similar al de la Fig. 3-20, perfil superior, pero con planos más grandes.)

El *superacabado* es una variante del rectificado en el que se imparte un movimiento oscilatorio a una piedra bastante grande, y la presión en la superficie se mantiene muy baja. Así, a medida que la superficie se hace más plana, acumula su propia película hidrodinámica lubricante, que termina la acción del abrasivo (Fig. 16-53*b*).

El *maquinado de flujo abrasivo* es un proceso de acabado que representa una transición para los abrasivos sin aglutinar. Un medio semisólido relleno de abrasivo se fuerza a través de un agujero o a lo largo de una superficie; es particularmente efectivo para eliminar las rebabas de las superficies internas.

16-8-6 Procesos con abrasivos sueltos

En un gran número de procesos, el abrasivo no se aglutina sino que se suministra como un polvo.

Lapeado El proceso se basa en una forma de desgaste abrasivo de tres cuerpos (Fig. 4-23*c*). El abrasivo se introduce como una lechada con base de aceite entre la pieza de trabajo y una superficie contraformada llamada la *pulimentadora.*

En la forma mejor conocida, la pulimentadora es una mesa relativamente suave, un poco porosa (por ejemplo, de hierro fundido), girada en un plano horizontal. Las piezas de trabajo se cargan en la superficie (algunas veces en jaulas impulsadas por un engrane desde el centro de la mesa rotatoria, Fig. 16-54*a*). La pieza de trabajo describe un movimiento planetario y adquiere un acabado uniformemente maquinado, aleatorio, de excelente planicidad. Cuando la pulimentadora se fabrica con forma tridimensional, se pueden lapear superficies curvas (por ejemplo, lentes de vidrio). El lapeado también es un proceso muy rápido para el periodo de asentamiento de engranes o tornillos sinfín acoplados (elimina la necesidad del periodo de operación a baja velocidad, por ejemplo, para los engranes hipoides de un eje trasero automotriz), y para remover protuberancias superficiales de los anillos para émbolo chapados en cromo.

Con menor frecuencia, la pulimentadora se fabrica de un abrasivo aglutinado; entonces, el proceso es similar al esmerilado pero a baja velocidad.

Maquinado ultrasónico Un transductor piezoeléctrico se usa para generar vibraciones ultrasónicas (de cerca de 20 000 Hz) de pequeña amplitud (alrededor de entre 0.04 y 0.08 mm), que impulsan a la *herramienta de forma* hecha de un material razonablemente dúctil como el acero suave. El gránulo abrasivo se proporciona en una lechada a la interfase, y la pieza de trabajo se erosiona gradualmente (Fig. 16-54*b*). El proceso es particularmente adecuado para maquinar materiales menos dúctiles.

Cardado de potencia Ahora, la herramienta es un cepillo hecho de alambres flexibles, normalmente girado a alta velocidad (de 15 a 30 m/s) y aplicado con una fuerza controlada, con la distancia seleccionada para hacer un corte de 0.5 a 0.8 mm de profundidad y remover material por impacto. Con máxima frecuencia, el objetivo es crear

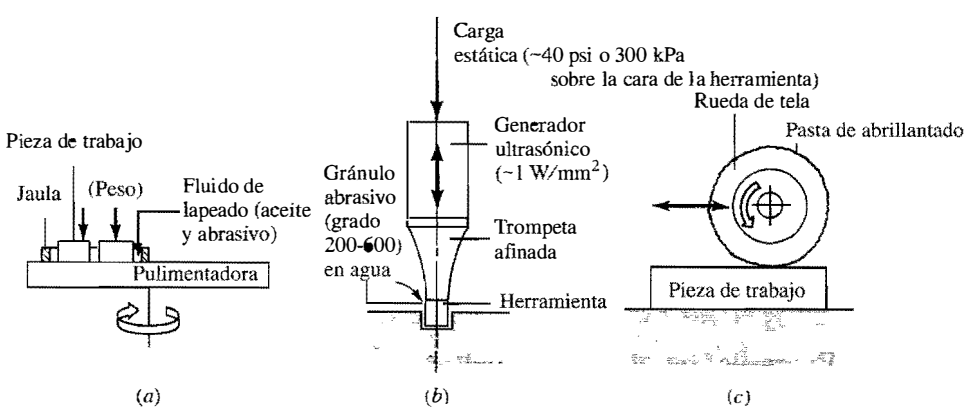


Figura 16-54 Maquinado con abrasivos sueltos (sin aglutinar); (*a*) lapeado, (*b*) maquinado ultrasónico y (*c*) abrillantado.

un acabado superficial específico, por propósitos estéticos o técnicos. Si no se realiza apropiadamente, las superficies se embadurnan y cargan con partículas vueltas a pegar o con fragmentos perdidos del alambre. En cualquier caso, el alambre debe ser de un material que no cause corrosión galvánica si se dejan fragmentos de alambre en la superficie. Los cepillos de fibra plástica (nylon o PP) cargados con abrasivos aglutinados (Al_2O_3, SiC, o algunas veces CBN o diamante) pueden ser muy efectivos. El proceso se utiliza ampliamente para la remoción de rebaba.

Acabado en barril El contacto con una herramienta se reemplaza por el contacto entre las piezas de trabajo en el *acabado en barril* o "*tomboleado*". En principio, las piezas de trabajo se colocan en un barril de sección transversal poligonal, de manera que caigan cuando el barril gira. El impacto mutuo elimina protuberancias de la superficie. Se obtiene un acabado mucho mejor cuando se agrega un *medio de rotación*, ya sea en un portador líquido (*medio húmedo*) o por sí mismo (*medio seco*). El medio se elige de acuerdo con el propósito definido, y puede variar de materiales suaves, como cáscaras de nuez, a bolas metálicas o no metálicas, virutas, piedras y abrasivos convencionales. Se obtienen resultados similares en el *acabado vibratorio*, en donde el barril vibra de modo mecánico. Estos procesos abrasivos completamente aleatorios son de gran valor al remover rebabas y aletas de las piezas de trabajo y, generalmente, para mejorar su apariencia superficial.

Abrillantado, pulido y bruñido La superficie dura es abandonada y el abrasivo se aplica a una superficie suave, por ejemplo, la superficie cilíndrica de una rueda compuesta de fieltro u otra tela (Fig. 16-54*c*). Para el *abrillantado*, el abrasivo se encuentra en un aglutinante semisuave. Para el *pulido*, el abrasivo se puede usar seco o en aceite u otro portador/lubricante. Tanto, el abrillantado como el pulido son capaces de producir superficies altamente reflejantes, no debido al alisado mayor sino más bien al embadurnado (deformación plástica) de las capas superficiales. La deformación localizada de la superficie introduce esfuerzos residuales de compresión y mejora la resistencia a la fatiga de los componentes.

Procesos de impacto En estos procesos se elimina todo el contacto con la herramienta o la pieza de trabajo.

1. En el *chorro de gránulos* o *de perdigones*, partículas de abrasivos de algún otro material (*perdigones*) se lanzan a la superficie de la pieza de trabajo a velocidades tan altas que se remueven películas superficiales —como óxidos— y se imparte una apariencia indentada uniformemente mate a la superficie (Fig. 3-23*b*). Las velocidades excesivas de impacto podrían causar daño, pero el chorro de perdigones apropiadamente controlado promueve una deformación plástica ligera y esfuerzos residuales de compresión que, como se analizó en la sección 9-2-2, mejoran la resistencia a la fatiga. Las velocidades necesarias se pueden producir por medio de aire comprimido o dejando caer los perdigones en la superficie de una rueda que gira a velocidades muy altas. La rueda puede o no tener paletas; el contacto con la rueda acelera las partículas de los gránulos.

2. Una forma especial de chorro de gránulos es el *hidrorrectificado*. El medio abrasivo se suspende en un líquido que luego se dirige hacia la superficie en forma de un chorro de alta presión.

3. En el *maquinado por fluido abrasivo*, un chorro de aire o de gas CO_2 altamente controlado, cargado con abrasivos secos, se aplica a presiones de 0.5 a 0.8 MPa a través de boquillas de zafiro o de WC. Impactando a una velocidad de 150 a 300 m/s, corta ranuras o agujeros en materiales muy duros.

4. Los materiales más suaves (YS < 80 MPa) se pueden cortar a través de su espesor con un *chorro de agua* a alta presión. El chorro se presuriza de 28 a 440 MPa (de 40 a 64 kpsi). El chorro de alta velocidad (de 600 a 900 m/s) que emerge de una boquilla de zafiro o de diamante de 0.08 a 0.4 mm de diámetro produce una superficie cortada limpia y libre de daños. El proceso es particularmente ventajoso cuando se debe evitar la fusión del material.

5. Los materiales duros se cortan introduciendo abrasivos (como un granate de malla 16 a 150, de 0.2 a 0.6 kg/min) en la corriente de agua. Este *corte abrasivo por chorro de agua* es altamente favorable para materiales sensibles al calor, puesto que no hay una zona afectada por el calor. Las instalaciones con control de ejes múltiples o integrado con un robot pueden hacer cortes en lámina, placa y partes 3-D. La mayoría están equipados con software de control que elige (o ayuda a elegir) los parámetros óptimos del procesamiento, como la velocidad de viaje y la tasa de alimentación de abrasivo.

Todos estos procesos también se usan ampliamente para remover las rebabas. Éstas se forman en muchas operaciones, incluyendo la fundición en matriz, el forjado, el troquelado, el moldeo por inyección y el maquinado, y su eliminación representa una de las etapas con alto costo del proceso.

16-9 CAPACIDADES DEL PROCESO Y ASPECTOS DEL DISEÑO

Las características generales de los procesos se dan en la tabla 16-7. Aunque los procesos individuales pueden estar limitados en las formas que pueden producir, una sucesión de operaciones puede desarrollar formas altamente complejas. En efecto, excepto por las formas huecas totalmente encerradas o con cuellos muy pequeños (T5 y F5 en la Fig. 3-1), todas las formas se pueden fabricar a partir de un bloque sólido, aunque el costo puede ser exorbitante. Se justifican las formas complejas si permiten la integración de la parte, reduciendo de esta manera los problemas con ajustes y el costo del ensamble. El tamaño sólo está limitado por el equipo disponible; como se muestra en la sección 16-7-3, se dispone de máquinas herramienta grandes, algunas veces en plantas que realizan trabajo del exterior. Hay poca limitación en el tamaño mínimo, y se pueden crear cuerpos rotativos muy esbeltos en máquinas tipo suizo. No obstante, existen límites prácticos sobre el espesor mínimo de pared, fijados por las deflexiones elásticas

bajo la influencia de las fuerzas tangenciales y normales que se desarrollan en el proceso. Los soportes efectivos pueden eliminar el límite.

Frecuentemente, el maquinado está entre las últimas operaciones en las piezas fundidas, forjadas, de metalurgia de polvos, e incluso cerámicos y plásticos (Figs. 5-2 y 5-3); entonces, su objetivo es crear características de la forma no obtenibles mediante el proceso anterior, o para mejorar las tolerancias y el acabado superficial. El alcance de los mejoramientos posibles es evidente en la figura 3-22: los procesos de maquinado pueden producir las tolerancias más estrechas y el acabado superficial más liso (lo que algunas veces se transfiere a productos de otros procesos como, por ejemplo, en el moldeo por inyección de plásticos y el laminado en frío de metales). Sin embargo, el incremento de la precisión y del acabado más liso tienen un precio; frecuentemente, requieren pasos extra de proceso y, aun si se pueden lograr en el mismo proceso, el avance y la profundidad de corte se deben reducir y la productividad disminuye.

16-9-1 Aspectos del diseño

En el diseño de piezas para maquinado, los principios de la ingeniería concurrente de nuevo deben seguirse. En particular, la elección del material y la configuración de la pieza se toman en cuenta al planear el proceso de maquinado y la secuencia del proceso. Algunos puntos a considerar son:

1. Dentro de los límites impuestos por las necesidades del servicio, se elige el material con mayor maquinabilidad. Así, los aceros tratados térmicamente generalmente se maquinan en la condición recocida (o normalizada o esferoidizada), luego se tratan térmicamente y se terminan, comúnmente por esmerilado. Se debe dejar una holgura suficiente para esmerilado, incluyendo una holgura para la distorsión en el tratamiento térmico. Sin embargo, en forma alterna el material completamente tratado térmicamente se puede terminar directamente con un corte duro, en forma competitiva y tal vez con ahorros.

2. El maquinado puede liberar esfuerzos residuales en fundiciones y forjas e introducir esfuerzos internos por su propia cuenta. Por lo tanto, las piezas sujetas a distorsión se tratan térmicamente, ya sea antes del maquinado o después de completar la mayor parte de éste.

3. La pieza de trabajo debe tener una *superficie de referencia* (una superficie cilíndrica externa o interna, una base plana, u otra superficie adecuada para sujetarla en la máquina herramienta o un aditamento).

4. Si es posible, la parte debe permitir el terminado en una sola configuración; si la parte necesita sujeción en una segunda posición diferente o en una máquina distinta, una de las superficies ya maquinada debe convertirse en superficie de referencia.

5. La forma de las partes más esbeltas debe permitir un soporte adicional adecuado contra la deflexión.

6. Los radios (a menos que se fijen por consideraciones de concentración de esfuerzos) deben acomodar al radio más natural de la herramienta de corte: el radio de la nariz de la herramienta en el torneado y conformado, el de la cortadora en el fresado de una

Tabla 16–7 Características generales de los procesos de maquinado

	Proceso de maquinado					
Características	**Torneado mecánico**	**Máquina automática de tornillos**	**Taladrado**	**Fresado**	**Esmerilado**	**Rectificado, lapeado**
Pieza						
Material	Todos	Todos	Todos	Todos	Duro	Duro
Preferido		Maquinado libre	Maquinado libre	Maquinado libre		
Forma*	R0-2,7; T0-2; Sp; U1-4	Igual que el torneado	T0,6	B; S; SS; F0-4, 6, 7; U7	Igual que el torneado, fresado	R0-2; B0-2, 7; T0-2, 4-7; F0-2; Sp
Sección mínima, mm	< 1 diám.	< 1 diám.	0.1 (diám. del agujero)	< 1	< 0.5	< 0.5
Configuración de la superficie	Axialmente simétrica	Igual que el torneado	Cilíndrica	Tridimensional	Igual que el torneado, fresado	Plana, cilíndrica, 3-D
Costo†						
Equipo	B–D	A–C	D–E	A–C	A–C	B–D
Herramientas	D–E	A–D	D–E	A–D	E–D	A–E
Mano de obra	A–C	D–E	B–D	A–B	A–E	B–D
Producción						
Habilidad del operador†	A–C	D–E	B–E	A–B	A–D	C–E
Tiempo de puesta a punto†	C–D	A–C	C–E	A–C	B–D	C–E
Rapidez (piezas/h)	1–50	10-500	10-500	1–50	1–1 000	1–1 000
Cantidad mínima	1	1 000	1	1	1	1

† Clasificaciones comparativas donde A indica el valor mayor, E el menor; las clasificaciones están influidas en gran medida por el grado de automatización. Por ejemplo, el torneado mecánico involucra un costo del equipo de alto a bajo, precio de la herramienta bajo a muy bajo, costo del trabajo alto a medio, requiere una habilidad muy alta a media del operador, y tiene un tiempo de preparación bajo.
* De la figura 3–1.

cavidad (Fig. 16-55*a*), el filo agudo de la cortadora en el fresado de ranuras o el borde redondeado de una rueda de esmerilar ligeramente desgastada (Fig. 16-55*b*). Un corte ranurado permite una esquina aguda en el fresado con el lado de la rueda, pero la deflexión de la rueda podría hacer inclinada la superficie lateral (Fig. 16-55*c*).

7. Los cortes ranurados (Fig. 16-55*d*) se pueden maquinar si no son demasiado profundos, pero incrementan los costos. Son esenciales cuando se necesita salida para herramientas de roscado (Fig. 16-55*e* y *f*).

8. Las deflexiones de la herramienta en el perforado o fresado de agujeros y recesos internos limitan la razón profundidad-diámetro (o profundidad-ancho). La deflexión de la herramienta en el maquinado de recesos profundos (Fig. 16-55*g*) necesita técnicas especiales (y más costosas), o sacrificar las tolerancias.

9. Los rasgos en un ángulo con la dirección principal del movimiento de la máquina exigen una máquina más compleja, transferencia a otra máquina diferente, interrup-

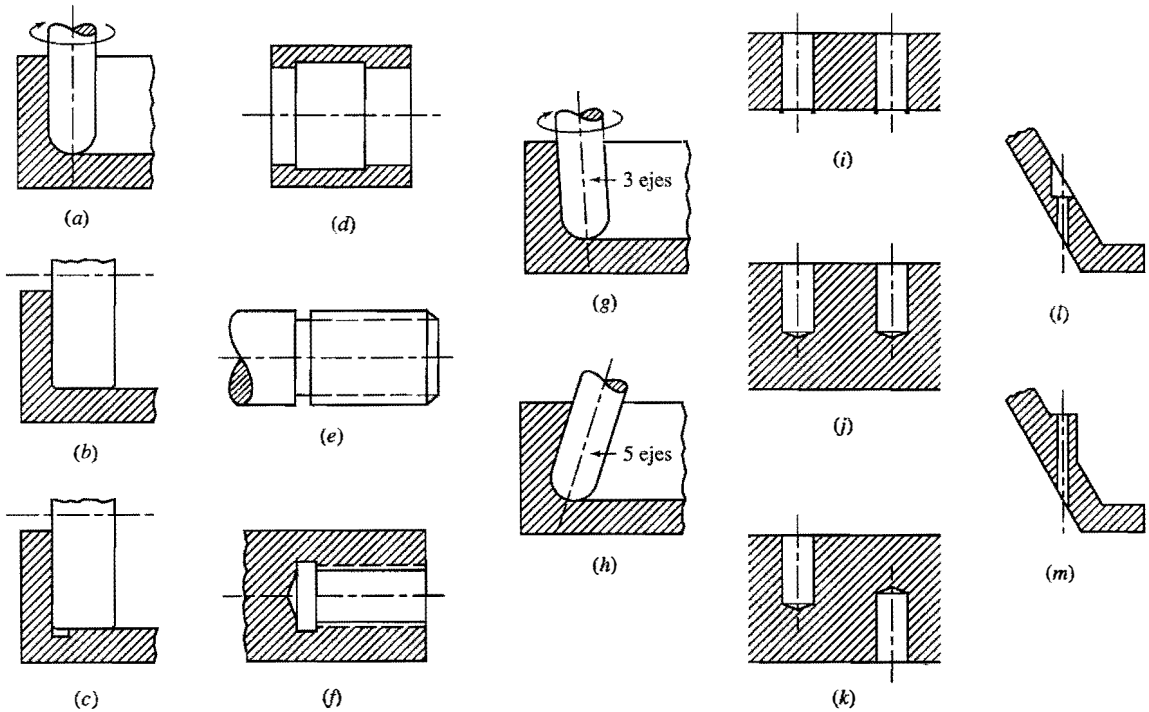


Figura 16-55 Algunas características del diseño para maquinado. Véase el texto para la interpretación.

ción de la acción principal de maquinado y herramientas o aditamentos especiales, por lo que se deben evitar. El control CNC de los centros de torneado o de los centros de maquinado de ejes múltiples eliminan algunas de las limitaciones (Fig. 16-55*h*), pero el costo será mayor.

10. Los agujeros con una razón grande de profundidad-diámetro requieren procesos especiales (incluyendo técnicas no tradicionales, Cap. 17). Cuando hay libertad de elección, los agujeros pasados (Fig. 16-55*i*) son preferibles a los ciegos (Fig. 16-55*j*). Los agujeros ciegos se deben evitar en los dos lados de la pieza (Fig. 16-55*k*), puesto que hacen necesaria la reubicación de ésta.

11. Los rasgos colocados en ángulo respecto a la superficie de la pieza de trabajo desvían la herramienta y necesitan una operación separada, como el refrentado local (Fig. 16-55*l*), o un rediseño de la pieza (Fig. 16-55*m*).

12. En la sección 10-3-3 se vio que las piezas cizalladas a menudo tienen rebaba. Esto también es cierto para las piezas maquinadas. Muchos están familiarizado con la rebaba producida por una broca helicoidal en el lado de salida; rebabas similares se forman en el punto de salida de las cortadoras de fresado y de otras herramientas. La remoción de rebaba es una de las operaciones más costosas. Su espesor es el factor determinante en el esfuerzo necesario para su remoción, y que tienen grosor mayor que 0.4 mm se deben retirar por medio del maquinado, siguiendo el contorno de la pieza.

Tanto la pieza como el diseño del proceso se enfocan (o deberían) a minimizar la formación de rebabas o, si es inevitable, a ponerlas en una localización fácilmente accesible.

16-9-2 Maquinado de precisión

El concepto de *manufactura de precisión* tiene varias connotaciones. Se puede referir a la mejor exactitud dimensional alcanzable; en la fundición, en la deformación plástica y en el procesamiento de particulados se usa de forma libre para denotar procesos para fabricar piezas hasta un orden de magnitud más estrecho que las tolerancias comunes, cualesquiera que sean. Se aplican criterios más cuantitativos en el maquinado y, como se muestra en la figura 16-56, el desarrollo de los procesos de maquinado ha conducido a una gradual redefinición de lo que es exactitud "normal" de maquinado. Cada paso de normal a precisión, alta precisión y ultraalta precisión representa un orden de magnitud en estrechamiento de tolerancias. Aunque puede parecer que las tendencias mostradas en la figura 16-56 continuarán, existe un límite absoluto fijado por el tamaño de los átomos. Con distancias interatómicas del orden de 0.3 nm, este límite es de alrededor de 1 nm. Existen máquinas herramientas capaces de trabajar con tolerancias de nanómetros, y en el capítulo 20 se verá que hay dispositivos electrónicos de estado sólido que se producen con tolerancias similares. (Al grupo de tecnologías capaces de producir tal precisión se le conoce algunas veces como *nanotecnología*, aunque esto puede causar confusión con la manufactura en nanoescala, Secc. 20-5-2.)

Ejemplo 16-16 Algunos productos cotidianos cumplen con la definición de nonotecnología. Por ejemplo, el disco duro de una PC contiene un disco de una aleación de aluminio con un diámetro de 130 mm, un espesor de 1.9 mm, maquinado hasta R_y 0.007 μm (7 nm). La cabeza magnética es de 3.2 mm de longitud y viaja con una holgura de 0.15 μm por encima del disco que gira a 1 600 rpm. Se puede obtener una idea de estas dimensiones aumentando el tamaño de la cabeza hasta la longitud de 70 m del Boeing 747: éste tendría que volar 3.3 mm por arriba de una superficie que tenga protuberancias con una altura máxima de 0.1 mm de altura sobre un área circular de 1 820 m de diámetro. (Citado por H. Nakazava en *Principles of Precision Engineering*, Oxford University Press, 1994, p. 9.)

La posibilidad de cumplir con una precisión dada depende, obviamente, del tamaño de la pieza. La American Society for Precision Engineering toma esto en cuenta cuando define precisión como ±50 partes por millón (ppm); así, la banda de tolerancia es 100 ppm o 10^{-4}. En la figura 3-22, esto se ubica en la abscisa, y parecería inalcanzable. Para lograr tal exactitud en un torno, centro de esmerilado o de maquinado con control CNC, la máquina herramienta misma se construye para ser extremadamente rígida y de alta precisión, con husillos libres de vibración de alta concentricidad (desbalance bajo) y con guías con cojinetes lineales, hidrostáticos o de aire (Secc. 16-7-4). Se emplean balanzas ópticas lineales para detectar la posición y para proporcionar retroalimentación. Los aditamentos de precisión con fuerzas controladas de sujeción evitan

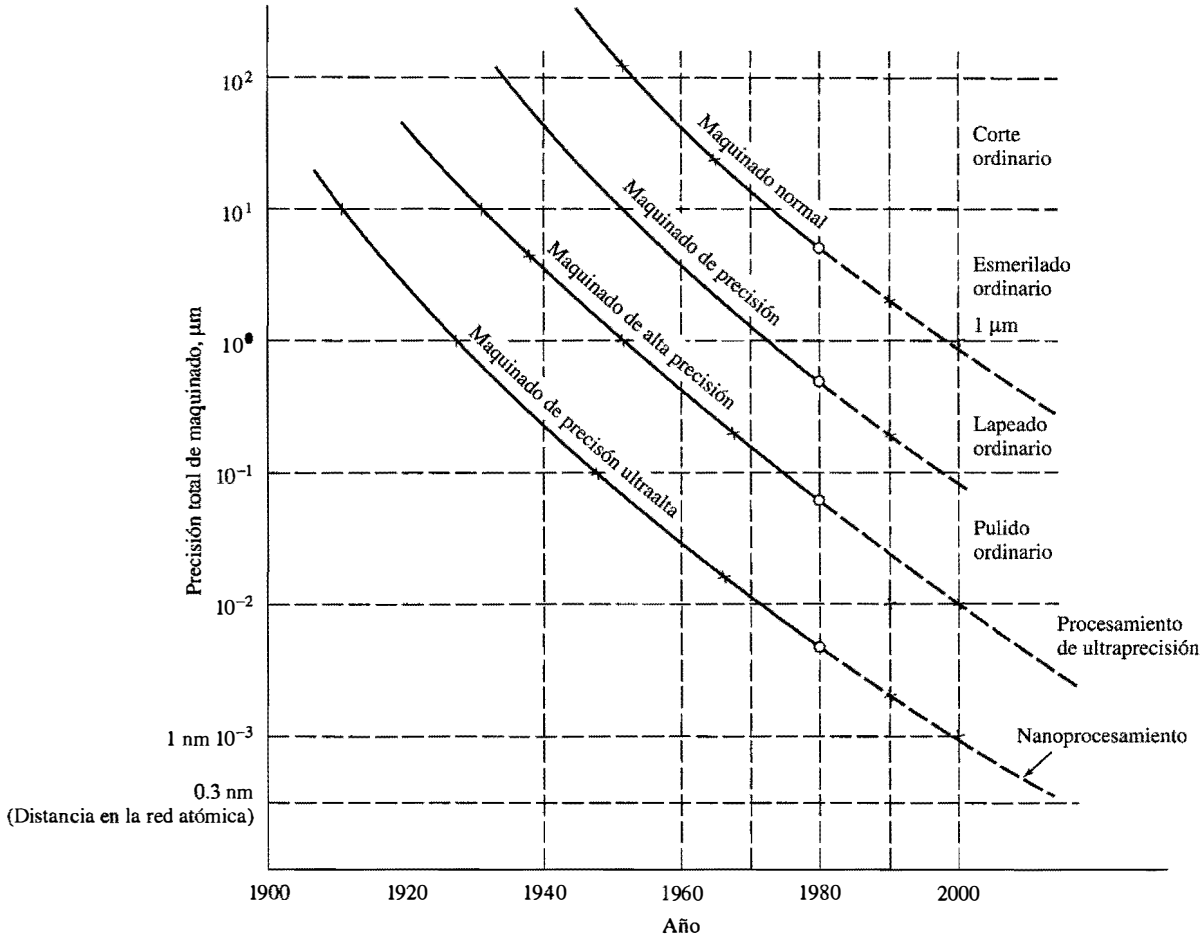


Figura 16-56 El progreso en la exactitud del maquinado en el siglo xx condujo a la redefinición continua de la exactitud. [*De N. Taniguchi (ed.): Nanotechnology, Oxford University Press, 1996, p. 1, Fig. Int. 1. Se publica con autorización de Oxford University Press.*]

la distorsión de la pieza. Las condiciones de maquinado se eligen para evitar el castañeo con herramientas apropiadas (muy frecuentemente, diamante; si la pieza es de acero, el diamante se recubre con Ni para evitar la destrucción de la herramienta). La variación de la temperatura es el mayor enemigo: de acuerdo con un viejo dicho, en una máquina herramienta todos los componentes son un termómetro. Por lo tanto, las máquinas herramientas se alojan en cuartos con control de clima y de temperatura hasta ±1°C o mejor; la temperatura del refrigerante se establece hasta ±1°C o mejor; la pieza se ecualiza antes del maquinado, y se usan programas CNC para compensación de dilatación térmica para corregir el posicionamiento de los ejes. Cuando el coeficiente de dilatación térmica de la pieza es diferente del de la máquina herramienta (por ejemplo, Al,

tabla 4-1), la compensación se realiza para la acumulación de calor en la pieza durante el maquinado. Para poner la máquina en equilibrio, ésta se "ejercita" durante algún tiempo antes de comenzar el corte real. El monitoreo del proceso detecta herramientas gastadas o rotas, y la medición de precisión de las piezas terminadas se utiliza para retroalimentar información al proceso.

Obviamente, la precisión alcanzable se establece también por la capacidad de los instrumentos de medición para resolver diferencias diminutas. Los sistemas láser actuales pueden medir longitudes de hasta 40 m con una resolución de 10 nm, a una precisión de 0.1 ppm. Así, para la dimensión de 25 mm que sirve de base a la figura 3-22, la precisión es 2.5 nm y, como la precisión de los instrumentos de medición debe ser de 5 a 10 veces mejor que la exactitud que se va a determinar, la pieza se puede fabricar hasta un valor de 12 a 25 nm.

Ejemplo 16-17

La precisión alcanzable por medio de los métodos existentes se ilustra por la Large Optics Diamond Turning Machine (LODTM) en el Lawrence Livermore National Laboratory de Estados Unidos. Se pueden maquinar piezas de hasta 1 620 mm de diámetro y 1 360 kg de masa. Se emplean haces múltiples de láser para posicionar la herramienta con una precisión de 28 nm, y las piezas se fabrican con una tolerancia menor que 5 ppm. Tal precisión, y su costo, sólo es justificable para productos excepcionales. Sin embargo, hay productos fabricados por miles que fácilmente cumplen con la definición de precisión de 10^{-4}. Por ejemplo, las cabezas femorales para los reemplazos de cadera (Fig. 1-5) suelen tener un diámetro de 30 mm y se fabrican hasta una esferoidicidad de 1.3 μm. [Fuente: J.R. Koelsch, *Manufacturing Engineering*, 1994 (3): 67-72.]

16-10 RESUMEN

La remoción de material es, en un sentido, la admisión de una derrota: se recurre a ella cuando otros procesos fallan al proporcionar la forma, la tolerancia o el acabado superficial requeridos, o cuando el número de piezas es demasiado pequeño para justificar un proceso más económico. La frecuencia de esto se demuestra con el hecho de emplear más horas-operador en el maquinado que en todos los otros métodos de procesamiento unitario. El maquinado aún es indispensable para el acabado de las superficies de algunos ejes, chumaceras, y bolas, rodillos y pistas de rodamientos; para el ajuste adecuado de partes de máquinas, de agujeros de cilindros de motores y para crear características de forma, que un proceso anterior no podría producir. Aunque sea material valioso, se convierte en virutas de bajo valor; el maquinado todavía puede ser económico, pero se deben observar algunos puntos básicos tanto por economía como por calidad.

1. La maquinabilidad de los materiales es altamente variable, y se debe elegir una condición del material que asegure que TS, n y q sean bajos, cuando esto sea factible.
2. El maquinado implica una competencia por la sobrevivencia entre la herramienta y la pieza de trabajo; las condiciones del proceso y los materiales de la herra-

mienta se deben elegir para prolongar la vida de la herramienta, en tanto que se debe maximizar la rapidez de remoción de material. La vida de la herramienta disminuyó mucho con el incremento de las temperaturas. Estas últimas, en la zona de corte, se elevan con la velocidad de corte; por lo tanto, es mejor aumentar la tasa de remoción de material incrementando primero la profundidad de corte, luego el avance y sólo al final la velocidad.

3. El objetivo del terminado es producir una superficie que esté dentro de determinadas tolerancias, que tenga rugosidad y textura de la rugosidad adecuadas, que esté libre de daño (rasgaduras, grietas, zonas embadurnadas, endurecimiento excesivo por trabajo en frío y cambios en las condiciones de tratamiento térmico) y de esfuerzos residuales dañinos.
4. El maquinado, como los otros procesos de manufactura, debe ser tratado como un sistema en el cual interactúan las características de la pieza de trabajo y los materiales de la herramienta, el lubricante (refrigerante), la geometría del proceso y las propiedades de las máquinas herramientas. Este enfoque es esencial, pues algunas interacciones pueden pasar fácilmente sin ser detectadas, en detrimento de la calidad, de la rapidez de producción y de la economía.
5. La productividad aumenta sustancialmente cuando se minimiza el tiempo perdido en la carga, la descarga, la verificación y el cambio de la herramienta. Las máquinas herramientas NC y CNC, en combinación con los sistemas de manejo de la pieza y de la herramienta, pueden lograr una apropiada utilización de la capacidad. Las ventajas del maquinado CNC se hacen realidad completamente sólo si las capacidades de los materiales avanzados de herramientas se aprovechan; para esto, la máquina herramienta debe tener suficiente rigidez, un husillo de alta precisión con velocidad y potencia suficientes, y guías de la máxima calidad y movimiento rápido.
6. Se producen grandes cantidades de virutas y de depósitos que se han esmerilado, y el proceso se debe llevar a cabo para que el reciclado sea posible y económico.
7. Las partes móviles, las virutas que vuelan o enredadas, el rompimiento de la herramienta, la desintegración de las ruedas de esmerilado y otros riesgos se deben tomar en cuenta para planear la protección pertinente. Algunas máquinas herramienta son totalmente cerradas; otras son relativamente accesibles, y una operación segura requiere entrenamiento y responsabilidad de los operadores. La protección ocular es esencial; además, la ropa de protección es necesaria si la exposición a los refrigerantes y lubricantes es inevitable.

PROBLEMAS 16A

16A-1 (*a*) Haga un boceto del corte ortogonal ideal con un ángulo de ataque positivo. Marque el (*b*) ángulo de ataque, (*c*) el ángulo de alivio, y (*d*) el ángulo de corte.

16A-2 Realice bosquejos del corte ortogonal con ángulo de ataque (*a*) positivo y (*b*) negativo. En cada bosquejo, identifique el ángulo de corte y el espesor de la viruta; señale las diferencias.

16A-3 (*a*) Dibuje un boceto del corte ortogonal realista con un ángulo de ataque positivo, suponiendo un material endurecible por deforma-

ción y baja fricción en la cara de ataque. (*b*) Repita para fricción alta en la cara de ataque; muestre el cambio en el ángulo de corte y en el espesor de la viruta.

16A-4 Realice un bosquejo del corte ortogonal (*a*) sin un rompedor de viruta y (*b*) con un rompedor de viruta del tipo de surco. Muestre la diferencia en la formación de la viruta.

16A-5 Indique las fuentes más probables de (*a*) vibración forzada y (*b*) castañeo regenerativo.

16A-6 (*a*) Haga un boceto en perspectiva de una herramienta de torno, identificando la cara de ataque y la cara del flanco. Muestre la ubicación de (*b*) desgaste de cráter, (*c*) desgaste en el flanco y (*d*) desgaste de muesca.

16A-7 (*a*) Enliste las dos funciones principales de los fluidos de corte a velocidades bajas y (*b*) analice al menos dos mecanismos por medio de los cuales se cumplen estas funciones.

16A-8 (*a*) Liste las dos funciones principales de los fluidos de corte a velocidades altas y (*b*) analice al menos dos mecanismos mediante los que se realizan estas funciones.

16A-9 (*a*) Liste tres métodos de aplicación de los fluidos de corte. (*b*) En una operación de torneado, indique dónde se deberá aplicar preferiblemente el fluido.

16A-10 Dibuje bosquejos para mostrar las características esenciales del (*a*) torneado, (*b*) perforado, (*c*) careado y (*d*) tronzado. Siempre muestre la dirección de avance y la sección transversal de la viruta sin deformar, distinguiendo el espesor sin deformar de la viruta h y la profundidad de corte w.

16A-11 Distinga entre (*a*) rugosidad superficial y (*b*) integridad superficial.

16A-12 (*a*) Dibuje un diagrama que indique la vida de la herramienta como una función de la velocidad de corte. (*b*) Identifique los ejes y su escala. Trace líneas que muestren la vida relativa de la herramienta para (*c*) HSS, (*d*) carburo y (*e*) cerámica.

16A-13 Haga tres bocetos para mostrar los eventos posibles entre un gránulo en una rueda de esmerilado y la pieza de trabajo.

16A-14 Defina la razón de esmerilado.

16A-15 Realice un bosquejo del rectificado sin centros, identificando los componentes principales del sistema.

16A-16 Haga bocetos del esmerilado superficial con (*a*) husillo horizontal y (*b*) vertical. (*c*) y (*d*) Muestre esquemáticamente las marcas de acabado (esmerilado) en la superficie de las piezas producidas por cada método.

16A-17 Describa el control de lazo abierto en la forma en que se aplica a una máquina fresadora.

16A-18 Describa el control de lazo cerrado como se aplica a una máquina fresadora.

16A-19 Distinga entre CNC y DNC en la manera en que se aplican a un grupo de centros de maquinado.

PROBLEMAS 16B

16B-1 Para explicar los efectos de la geometría de la herramienta, haga tres bosquejos que señalen el corte ortogonal con ángulo de ataque (1) altamente positivo, (2) cero y (3) negativo. En forma tabular, indique los niveles relativos del (*a*) ángulo de corte, (*b*) espesor de la viruta, (*c*) velocidad de la viruta, (*d*) fuerza de empuje, (*e*) fuerza de corte y (*f*) potencia.

16B-2 (*a*) Analice las condiciones que conducen a la formación de acumulación en el filo; haga un boceto para ilustrarlo. (*b*) Liste las ventajas y (*c*) desventajas del corte con acumulación. (*d*) Sugiera formas en que se puede evitar la acumulación.

16B-3 (*a*) Dibuje un boceto del avance y del espesor de la viruta en el torneado con una herramienta de punto único con ángulo de avance cero. (*b*) En otro boceto, use un ángulo de avance positivo y el mismo avance. Explique si un ángulo de avance mayor resulta en mayor o menor (*c*) espesor de la viruta sin deformar, (*d*) fuerza de corte y (*e*) fuerza de empuje (radial).

16B-4 (*a*) Realice un bosquejo de una fresa de extremo redondo. (*b*) Indique esquemáticamen-

te la variación del espesor de la viruta sin deformar al moverse hacia el punto del cortador. (*c*) Señale cuál es el espesor de la viruta sin deformar en el centro del punto (ápice), y qué efectos tiene esto en la eficiencia de corte. (*d*) Sugiera una forma de incrementar la eficiencia del corte.

16B-5 (*a*) Dibuje un boceto que muestre las características esenciales del corte de metal ortogonal ideal con ángulo de ataque positivo. (*b*) Identifique el ángulo de ataque α, el ángulo de alivio θ y el ángulo de corte ϕ. (*c*) Establezca el espesor de la viruta sin deformar h y el espesor de la viruta deformada h_c. En dibujos separados, muestre los cambios debidos al (*d*) endurecimiento por deformación, (*e*) corte con una zona secundaria de corte y (*f*) la formación de un borde de acumulación. (*g*) Determine, genéricamente, a qué velocidades, si las hay, (*d*), (*e*) y (*f*) se aplican al corte de acero al bajo carbono. (*h*) Indique cuál de los casos anteriores proporciona los requerimientos mayor y menor de energía. Justifique su respuesta. (*i*) Diga cuál de los casos anteriores redunda en el mejor y el peor acabado superficial.

16B-6 (*a*) Dibuje un boceto del corte ortogonal con acumulación en el filo. Indique qué efecto tienen las siguientes variables en la probabilidad del desarrollo de la acumulación: (*b*) ángulo de ataque positivo, (*c*) redondeado de la nariz, (*d*) lubricación, (*e*) cara ataque burda, (*f*) menor adhesión entre la herramienta y la pieza de trabajo, (*g*) material de maquinado libre. Justifique brevemente sus elecciones.

16B-7 Un inserto de carburo no identificado se usa para cortar acero AISI 1045 a la velocidad recomendada. La herramienta se desgasta extremadamente rápido. Sugiera al menos dos causas posibles del problema, así como sus soluciones.

16B-8 Las virutas tapan el espacio de maquinado. (*a*) Identifique las causas posibles del problema. Sugiera soluciones cuando se corten materiales (*b*) dúctiles y (*c*) menos dúctiles.

16B-9 (*a*) Realice un boceto del proceso de corte ortogonal ideal con un ángulo de ataque positivo, mostrando el ángulo de ataque α, el ángulo de alivio θ y el ángulo de corte ϕ, y los espesores de la viruta sin deformar y deformada. (*b*) Haga otro bosquejo, con un ángulo de ataque negativo. (*c*) Explique si el ángulo de corte, la razón viruta-espesor, la velocidad de la viruta, la fuerza de corte y la energía se incrementan de (*a*) a (*b*). (*d*) Dé al menos dos argumentos por los que los ángulos de ataque altamente positivos se usan rara vez. (*e*) Explique por qué uno usaría una herramienta con un ángulo de ataque negativo.

16B-10 (*a*) Realice un bosquejo de una operación de careado. (*b*) Muestre claramente el avance, la profundidad de corte y el espesor de la viruta sin deformar en una ampliación de la zona de corte. (*c*) Muestre, en un nuevo boceto, el efecto de aumentar el ángulo del filo de corte lateral. Indique qué r/min se deberá elegir para obtener (*d*) la máxima vida de la herramienta y (*e*) la máxima productividad.

16B-11 En principio, qué clase de máquina herramienta es la más económica para producir piezas con simetría rotatoria con las siguientes características: (*a*) requiere torneado, taladrado, perforado y tronzado, a una rapidez de producción de 10 000 piezas por mes; (*b*) igual que (*a*) pero sólo 10 piezas por mes; (*c*) una pieza muy esbelta de alta precisión que requiere torneado y tronzado, a una rapidez de producción de 1 000 piezas por mes; (*d*) igual que (*c*), pero sólo 10 piezas por mes; (*e*) igual que (*a*), pero con un agujero transversal; (*f*) igual que (*b*), pero con un agujero transversal.

16B-12 Para explicar las características principales del fresado plano, (*a*) realice un boceto del fresado ascendente y (*b*) otro para el fresado descendente. (*c*) En una vista ampliada, muestre el avance, el espesor de la viruta sin deformar y la profundidad de corte para ambos casos. (*d*) Explique cuál de los dos proporcionará mejor acabado superficial y por

qué. (*e*) Establezca cuál requiere una fresadora más rígida y por qué.

16B-13 Un maquinista tornea un acero 1020 recocido con una herramienta HSS de ángulo de ataque positivo. (*a*) ¿Qué viruta se debe esperar y por qué? (*b*) ¿Cuál es la causa probable si, al incrementar la velocidad, la viruta se adelgaza, su lado inferior muestra partículas adheridas ocasionales y la superficie maquinada es más pobre? (*c*) Además de aminorar la velocidad, sugiera al menos dos medidas que se podrían tomar para mejorar la calidad de la superficie maquinada, aun utilizando una herramienta HSS.

16B-14 Para explicar los efectos de la fricción en la cara de la herramienta, (*a*) realice bosquejos del corte ortogonal con una herramienta con ángulo de ataque positivo. Muestre el ángulo de corte y el espesor de la viruta para (*b*) fricción baja y (*c*) fricción alta.

16B-15 El consumo de energía es una función del espesor de la viruta sin deformar. Para demostrarlo, (*a*) dibuje un diagrama del consumo de energía contra el espesor de la viruta sin deformar. (*b*) Trace una recta para indicar la tendencia y (*c*) elija escalas que proporcionen esa relación de línea recta. (*d*) Justifique su elección de la pendiente de la curva.

16B-16 En una operación de torneado, el castañeo se origina durante el maquinado de una pieza particular. (*a*) ¿Cuál será su manifestación (liste al menos dos) y (*b*) indique los pasos a seguir para identificar la causa del castañeo.

16B-17 Una superficie torneada con una herramienta de radio de nariz de 1 mm tiene una rugosidad inaceptablemente alta. Para mejorar el acabado, sugiera un cambio en el (*a*) proceso y en la (*b*) herramienta, e indique las consecuencias no intencionadas de esos cambios (suponga que la rugosidad no es causada por adhesión de la herramienta).

16B-18 Sugiera la mejor condición metalúrgica para cortar acero 1010, 1045 y 1080 (en su respuesta, defina la composición y la estructura de cada material y justifique su elección).

16B-19 Una pieza de acero endurecido se esmerila con una rueda de alúmina vitrificada. La superficie de la parte está decolorada y son visibles grietas diminutas. (*a*) Identifique los eventos que condujeron al problema y (*b*) sugiera el menos dos soluciones.

16B-20 La brida de hierro fundido del ejemplo 7-9, inciso *b,* se va a terminar por maquinado. Diseñe, en principio, la secuencia de las operaciones. Para cada una, muestre cómo se montará la pieza y la posición de la herramienta al trabajar en ella. Considere alternativas, aplique un juicio crítico a cada una. (Nota: tome las dimensiones del texto, no de la ilustración.)

16B-21 (*a*) Liste los factores geométricos que afectan los mecanismos típicos de los encuentros abrasivos grano/pieza de trabajo. Establezca qué niveles relativos de estos factores resultan en (*b*) deformación elástica, (*c*) arado, (*d*) formación de viruta. (*e*) Identifique los que contribuyen a la remoción de metal. (También puede responder en forma tabular.)

16B-22 En el esmerilado, la transición de deformación elástica a la formación de viruta tiene un gran efecto en la potencia y en la rapidez de remoción de material. (*a*) ¿Cuáles son estos efectos? Para promover la transición, ¿qué se debe hacer en la elección del (*b*) material de la pieza de trabajo, (*c*) de la velocidad de esmerilado, (*d*) del fluido de esmerilado?

16B-23 Realice bocetos para mostrar los eventos que pueden ocurrir cuando el gránulo de una rueda de esmerilar encuentra la superficie de la pieza de trabajo. A partir de la energía consumida y del material removido en estos encuentros, juzgue si el requerimiento de energía específica debe ser mayor en el esmerilado o en el corte.

16B-24 A partir de las consideraciones de la geometría del esmerilado y de las relaciones de velocidad, indique la variación de los factores siguientes para condiciones de otra manera idénticas: (*a*) longitud de corte en esmerilado cilíndrico *contra* esmerilado interno; (*b*) longitud de corte en esmerilado ascendente

y descendente; (*c*) espesor de la viruta sin deformar a velocidades incrementadas de la rueda; (*d*) espesor de la viruta sin deformar a una rapidez de alimentación de aumentada. (Emplee bosquejos, si lo desea.)

16B-25 La razón de esmerilado se controla mediante varios factores, entre ellos la fuerza que actúa en los granos (que, cuando es excesiva, puede arrancar un grano) y la temperatura (que lleva a un desgaste más rápido de los granos). (*a*) Defina la razón de esmerilado. (*b*) Considere el efecto de la velocidad de la rueda en la fuerza y (*c*) en la temperatura. (*d*) Deduzca si una velocidad baja o alta proporcionará la razón de esmerilado mayor.

PROBLEMAS 16C

16C-1 (*a*) Realice un boceto de un corte ortogonal ideal con un ángulo de ataque positivo y un plano de corte de longitud unitaria. Marque los ángulos de corte y de ataque y los espesores de la viruta sin deformar y deformada. (*b*) Desarrolle la ecuación (16-3).

16C-2 Un torno se impulsa por un motor de 5 hp. Estime la tasa de remoción de material posible (en unidades de $pulg^3/min$) si el material de la pieza de trabajo es acero (HB 270), una aleación de aluminio y una superaleación con base de níquel. También exprese la respuesta en unidades SI.

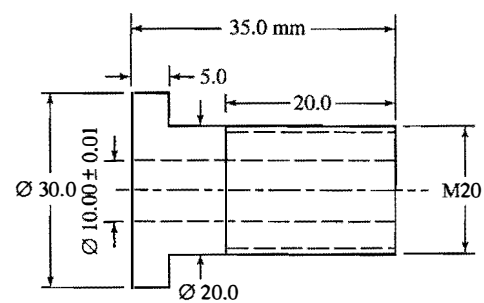
16C-3 La forma completa de la ecuación de Taylor, ecuación (16-19′), es válida en cualquier sistema de medición. En unidades SI, v y v_r estarán en m/s, y t y t_{ref} en s. Sin embargo, una vida de la herramienta de referencia de $t_{ref} = 1$ s sería irracional; por lo tanto, se usa $t_{ref} = 60$ s. (*a*) Desarrolle una fórmula general para convertir C en v_r (en unidades SI). (*b*) Si $C = 500$ ft/min, ¿cuál es el valor de v_r?

16C-4 Encuentre el factor de conversión para K_1 en la ecuación (16-14) de unidades SI a unidades USCS.

16C-5 Si la vida de una herramienta de corte HSS es 60 min a la velocidad de corte recomendada, ¿cuál será la vida a una velocidad (*a*) 20% y (*b*) 40% mayor? (Suponga que $n = 0.1$).

16C-6 El anillo del ejemplo 9-23 está fabricado de acero para herramienta O1 endurecido a HRC 58. Se forjó en caliente, y la rebaba interna y externa se quitó en el taller de forja, donde se permitió que la parte se enfriara lentamente. (*a*) ¿Qué condición metalúrgica espera en la forja? (*b*) Considere las opciones disponibles en el diseño de la secuencia de maquinado, suponiendo que el acabado superficial en las superficies paralelas y en el diámetro interno deben ser mejores que 0.2 μm R_a.

16C-7 El buje roscado que se muestra en la ilustración se fabricará en grandes cantidades (más de 10 000 piezas/mes). Diseñe la secuencia de operación óptima de la máquina de tornillo pasando por los siguientes pasos: (*a*) clarifique las dimensiones faltantes, las tolerancias y las especificaciones del acabado superficial (en ausencia de consulta con el diseñador, haga suposiciones con sentido común); (*b*) elija el material inicial, las dimensiones del mismo y su condición metalúrgica; (*c*) determine en qué forma se deberá orientar la pieza para permitir el acabado desde el lado de la barra; (*d*) seleccione las operaciones básicas que se requieren, estableciendo las velocidades, avances y tiempo de maquinado apropiados, y (*e*) determine la secuencia de operación, teniendo en cuenta la posibilidad de maquinado simultáneo y de repartir las operaciones tardadas en



Material: AISI 1117 acero

Figura problema 16C-7

varias posiciones. (Necesitará acceso a una base de datos como la MHDE.)

16C-8 (*a*) Haga un boceto del careado en un torno. Muestre la dirección de rotación, la profundidad de corte, el avance y el espesor de la viruta sin deformar. Suponga que hierro fundido de BHN 200 recibe acabado maquinado con herramientas de carburo. (*b*) Encuentre la velocidad de corte y el avance. (*c*) Calcule, a partir de conocimientos fundamentales, el tiempo necesario para terminar un disco de 200 mm de diámetro.

16C-9 Un tubo de acero 1045 recocido se perfora, eliminando una capa de 3 mm de espesor con un solo corte. El diámetro exterior del tubo es de 150 mm, el espesor de la pared de 15 mm y la longitud del tubo de 300 mm. (*a*) Haga un boceto de la operación, luego calcule (*b*) la velocidad de corte y el avance recomendados para una herramienta de carburo, (*c*) la potencia requerida, (*d*) el tiempo necesario para terminar el corte, (*e*) la fuerza de corte que actúa sobre la barra de perforación, si se usa una sola herramienta, y (*f*) suponiendo que dos herramientas se accionan simultáneamente, el par de torsión que actúa en la barra de perforación.

16C-10 (*a*) Liste las propiedades del material que influyen en la maquinabilidad. (*b*) A través de diagramas de equilibrio adecuados, indique qué estructura se debe esperar; a partir de datos numéricos contenidos en este libro, (*c*) clasifique los siguientes materiales de acuerdo con su maquinabilidad anticipada: acero 1008, acero 1045, acero inoxidable 302, latón 60Cu-40Zn, Al 1100 y níquel, todos en condición recocida. (*d*) Muestre el razonamiento que aplicó para llegar a su clasificación.

16C-11 Analice qué condiciones del material se deben especificar para facilitar el maquinado de (*a*) aluminio 1100, (*b*) aluminio 6061, (*c*) cobre puro, (*d*) latón de maquinado libre, (*e*) acero 1018, (*f*) acero 1045, (*g*) acero 1080, (*h*) Hastelloy X.

16C-12 Se van a taladrar agujeros de 6 mm de diámetro y 20 mm de profundidad en acero inoxidable 304, usando brocas helicoidales con punta de carburo. Determine las recomendaciones para (*a*) velocidad de corte, (*b*) rpm del taladro, (*c*) avance (mm/r), (*d*) rapidez de avance (mm/min) y (*e*) la potencia requerida (W).

16C-13 Se van a taladrar agujeros de 12 mm de diámetro y 36 mm de profundidad en una aleación de aluminio 6061-T6 con brocas helicoidales HSS. Determine (*a*) la velocidad de corte, (*b*) el rpm del taladro, (*c*) avance (mm/r), (*d*) la rapidez de avance (m/min o m/s), (*e*) el requerimiento de potencia (kW).

16C-14 Si $n = 0.25$ y $C = 1\,000$ fpm, ¿cuál debe ser la velocidad v para una vida de 1 hora?

16C-15 Una placa de hierro fundido ASTM No. 20 de 100 mm de ancho, 600 mm de longitud y 100 mm de espesor se va a limpiar, hasta una profundidad de 3 mm, en la superficie de 100 × 600 mm, por medio de fresado plano, usando una fresa HSS de 120 mm de diámetro, con siete filos de corte. (*a*) Realice un boceto del proceso del fresado descendente, mostrando la rotación de la cortadora y la dirección del avance. (*c*) Seleccione la velocidad de corte, el avance y la rapidez de ésta. (*d*) Calcule el tiempo necesario. (*e*) Determine la potencia requerida.

16C-16 La pieza de trabajo del problema 16C-15 ahora es de una aleación de aluminio. Indique si la potencia del motor aumenta o disminuye. Justifique su respuesta.

16C-17 Una placa rectangular de dimensiones 4 × 10 × 1 pulg, de una aleación de aluminio 332.0, se va a fresar frontalmente en las dos superficies mayores. La fresa tiene un diámetro D_m y, por uniformidad del acabado superficial, se opera librando los extremos de la pieza de trabajo. (*a*) Haga un dibujo para clarificar el problema. (*b*) Estime un diámetro razonable de la fresa y del número de insertos de carburo. Luego determine, para un corte de desbaste, la (*c*) velocidad, (*d*) el avance y (*e*) el tiempo neto de corte t_c.

16C-18 Un acero se corta en un torno con herramientas HSS. Ahora se propone elevar la rapidez

de producción en 30%. Hay una disputa en cuanto a si dicho aumento se obtendrá incrementando (*a*) la velocidad, (*b*) el avance o (*c*) la profundidad de corte. Dirima la disputa determinado el cambio en la vida de la herramienta para los tres casos; use las constantes dadas con la ecuación (16-21). (Para mayor claridad, considere $K = 100$ unidades arbitrarias, y valores iniciales de $v = f = w = 1$.) (*d*) Recomiende qué variable se debe incrementar primero y cuál al final.

16C-19 La velocidad de corte para el maquinado de mínimo costo v_c está dada por la ecuación (16-32). (*a*) Sustituya v_c en la ecuación (16-19′) y exprese el tiempo de corte t para una operación de costo mínimo; denótela t_c. (*b*) Con $n = 0.1$, 0.35 y 0.6 para HSS, carburo y cerámica, respectivamente, exprese las magnitudes relativas de t_c (suponiendo costos idénticos de la herramienta y del cambio de la herramienta).

16C-20 Establezca la velocidad de corte más baja para el torneado de desbaste de hierro fundido de HB 200 con herramienta de carburo. Los datos de los costos son los mismos que en el ejemplo 16-13.

16C-21 Se maquina una barra de acero 1008, estirada en frío a 30% de reducción. (*a*) Calcule la dureza. (*Sugerencia*: para un material trabajado en frío, TS = σ_f, que se puede calcular a partir de K y n.) (*b*) Encuentre la velocidad de corte recomendada para herramientas HSS.

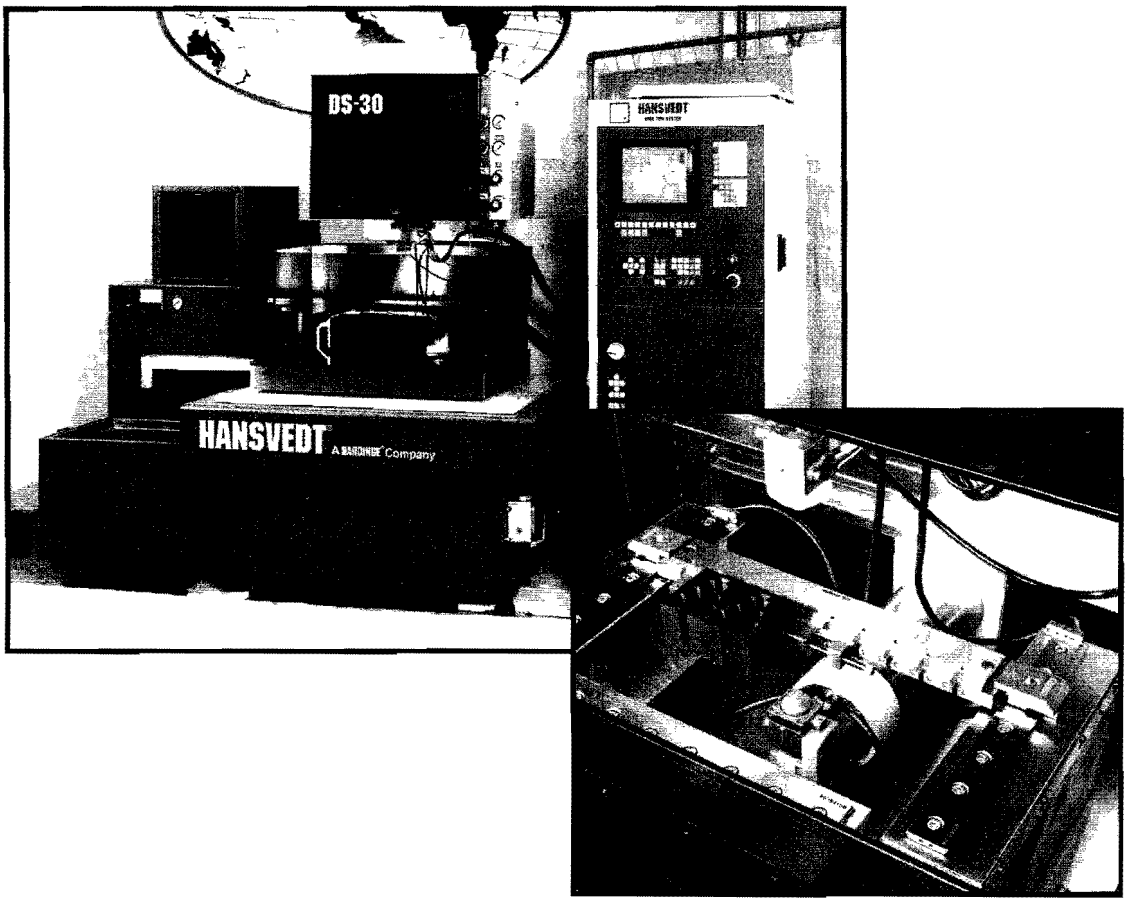
16C-22 Un bloque de un cilindro de hierro fundido (TS = 420 MPa) se limpia por fresado frontal. La superficie sujeta al maquinado es de 600 mm de longitud y 150 mm de ancho. La fresa frontal tiene siete insertos de corte de carburo recubierto en un diámetro de 200 mm. (*a*) Realice un boceto del proceso, mostrando la pieza de trabajo como un bloque rectangular simple. (*b*) Calcule la velocidad de corte, avance y la profundidad recomendadas para un corte de desbaste. (*c*) Calcule el tiempo requerido para el corte. (*d*) Estime la potencia necesaria, si la eficiencia es de 70%.

16C-23 Una superficie de acero de herramienta endurecido (HRC 55) de dimensiones 30 × 200 mm se va a esmerilar hasta un acabado superficial de 0.4-0.5 μm R_a. La experiencia pasada muestra que una rueda adecuada (A-46-H-V) producirá el acabado necesario con un avance transversal de 0.5 mm/pasada y una profundidad de esmerilado de 0.050 mm. La velocidad de la mesa es 0.1 m/s. La rueda es de 20 mm de ancho, 150 mm de diámetro, y libra la pieza de trabajo con un rebase de 50 mm. (*a*) Haga un dibujo para clarificar la tarea. Determine (*b*) el número de pasadas necesarias (cuente el movimiento hacia delante y hacia atrás de la mesa como pasadas separadas, y tome en cuenta que la rueda inicia y termina fuera del ancho de la pieza de trabajo, (*c*) el tiempo total requerido, recordando que la rueda debe librar en cada extremo de la pieza de trabajo (realice un dibujo para determinar la posición de la rueda en el extremo), (*d*) el material removido, total y por minuto, y (*e*) la potencia necesaria en HP.

16C-24 A una barra de 30 mm de diámetro de acero de baja aleación, previamente tratada térmicamente a HRC 28, se le da un acabado torneado sobre una longitud de 200 mm, utilizando un inserto de herramienta de carburo. (*a*) Dibuje el proceso, mostrando claramente el espesor de la viruta sin deformar h, el avance f, y la profundidad de corte w. Luego establezca, para el primer corte (desbaste), (*b*) la velocidad, (*c*) avance y (*d*) la profundidad de corte. Determine (*e*) rpm del torno, (*f*) la tasa de remoción del material, (*g*) el requerimiento de energía y potencia (considere $a = -0.4$), (*h*) la fuerza de corte que actúa en el portaherramienta, (*i*) el tiempo necesario para la terminación del corte.

LECTURAS ADICIONALES

ASM Handbook, vol. 16, *Machining*, ASM International, 1989.
Drozda, T. y C. Wick (eds.): *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, 4a. ed., vol. 1, *Machining*, Society of Manufacturing Engineers, 1983.
Machining Data Handbook, 3a. ed., Machinability Data Center, Metcut Research Associates (ahora disponible del Institute of Advanced Manufacturing Science), Cincinnati, Ohio, 1983.
Armarego, E.J.A. y R.H. Brown: *The Machining of Metals*, Prentice-Hall, 1969.
Boothroyd, G. y W.W. Knight, *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, Dekker, 1989.
Brown, J.: *Advanced Machining Technology Handbook*, McGraw-Hill, 1998.
Campbell, P.: *Basic Fixture Design*, Industrial Press, 1994.
Davis, J.R. (ed.): *Tool Materials*, ASM International, 1995.
DeVries, W.R.: *Analysis of Material Removal Processes*, Springer, 1992.
Gorczyca, F.E.: *Application of Metal Cutting Theory*, Industrial Press, 1987.
Hoffman, E.G.: *Jig and Fixture Design*, 4a. ed., Delmar, 1996.
Hoffman, E.G.: *Setup Reduction through Effective Workholding*, Industrial Press, 1996.
Komanduri, R.: *Tool Materials*, en *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 4a. ed., vol. 24, Wiley, 1997, pp. 390-455.
Konig, W., I.K. Essel e I.L. Witte: *Specific Cutting Force Data for Metal Cutting*, Verlag Stahleisen, Dusseldorf, 1982.
Madison, J.: *CNC Machining Handbook*, Industrial Press, 1996.
Malkin, S.: *Grinding Technology: Theory and Applications*, Wiley, 1989.
Metal Cutting Tool Handbook, 7a. ed., Industrial Press, 1989.
Meyers, A.L. y T. Slattery: *Basic Machining Reference Handbook*, Industrial Press, 1988.
Nakazawa, H.: *Principles of Precision Engineering*, Oxford University Press, 1994.
Oxley, P.L.B.: *The Mechanics of Machining, an Analytical Approach to Assessing Machinability*, Wiley, 1989.
Roberts, G.A., G. Krauss y R. Kennedy: *Tool Steels*, 5a. ed., ASM International, 1998.
Salmon, S.C.: *Modern Grinding Process Technology*, McGraw-Hill, 1992.
Shaw, M.C.: *Metal Cutting Principles*, 3a. ed., Oxford University Press, 1984.
Shaw, M.C.: *Principles of Abrasive Processing*, Oxford University Press, 1996.
Sluhan, C. (ed.): *Cutting and Grinding Fluids: Selection and Application*, Society of Manufacturing Engineers, 1992.
Smith, G.T.: *CNC Machining Technology*, 3 vols., Springer, 1993.
Schneider, A.F.: *Mechanical Deburring and Surface Finishing Technology*, Dekker, 1990.
Stephenson, D.A. y J.S. Agapiou: *Metal Cutting Theory and Practice*, Dekker, 1997.
Stout, K.J., E.J. Davis y P.J. Sullivan: *Atlas of Machined Surfaces*, Chapman and Hall, 1990.
Szymanski, A. y J. Borkowski: *Technology of Abrasives and Abrasive Tools*, Ellis Horwood, 1992.
Taniguchi, N. (ed.): *Nanotechnology*, Oxford University Press, 1996.
Trent, E.M.: *Metal Cutting*, 3a. ed., Butterworth-Heineman, 1991.
Walsh, R.A.: *McGraw-Hill Machining and Metalworking Handbook*, McGraw-Hill, 1994.
Webster, J.A. y otros: *Abrasive Processes: Theory, Technology, and Practice*, Dekker, 1996.
United States Cutting Tool Institute: *Metal Cutting Tool Handbook*, 7a. ed., Industrial Press, 1989.



La EDM por alambre es una herramienta poderosa para cortar formas complejas en aceros endurecidos en máquinas como la unidad de cinco ejes que aquí se muestra. En la fotografía del recuadro, el flujo del fluido se apagó para revelar el espacio de trabajo con las guías del alambre y un componente de acero con recortes escalonados. (*Cortesía de Hardinge Inc., Elmira, Nueva York.*)

capítulo

17

Procesos no tradicionales de maquinado

Aunque la mayor parte del maquinado se realiza eliminando material en forma de virutas más o menos definidas, existen otros métodos que ofrecen capacidades únicas. Exploraremos los conceptos básicos de la remoción de material por medio de:

Disolución química

Disolución química asistida por corriente eléctrica

Descarga eléctrica controlada

Haces de electrones y rayos láser de alta intensidad de energía

Procesos en competencia directa con los anteriores

Todos los procesos de maquinado analizados hasta este punto se caracterizaron por la remoción mecánica de material en forma de viruta, aunque la formación de la viruta pudiera ser imperfecta. Existe una variedad de procesos para eliminar material por fusión, evaporación, o acción química y/o eléctrica; a menudo se les llama colectivamente procesos *no convencionales* o *no tradicionales*. Algunos de ellos en realidad no son nuevos, pero su aplicación industrial se ha popularizado sobre todo debido a las exigencias de las industrias aeroespacial y electrónica. Como grupo, se caracterizan por la insensibilidad a la dureza del material de la pieza de trabajo, de ahí que sean adecuados para formar piezas con base en materiales completamente tratados térmicamente, evitando así los problemas de distorsión y de cambio dimensional que con frecuencia acompañan al tratamiento térmico.

17-1 CLASIFICACIÓN

En forma más conveniente, los procesos se clasifican de acuerdo con el modo de acción (Fig. 17-1). Algunos procesos son exclusivamente para la eliminación de material, pero los de haces de alta energía también se pueden usar para unir, por lo que se analizarán de nuevo en la sección 18-7-2.

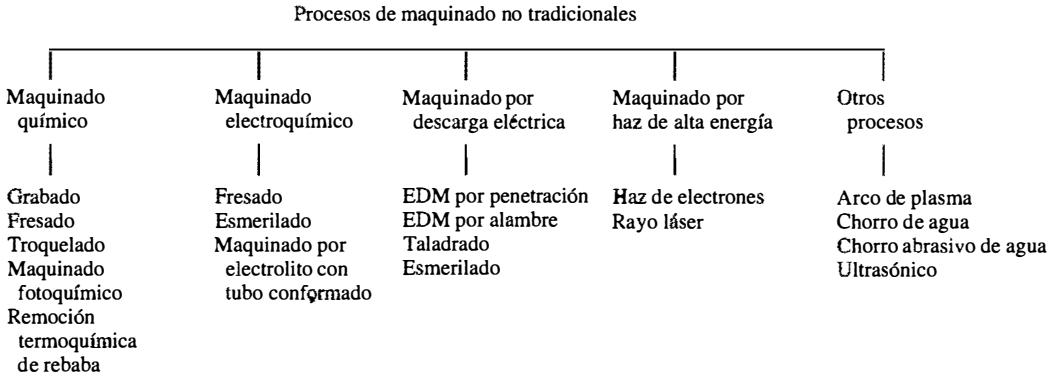


Figura 17-1 Clasificación de los procesos no tradicionales de arranque de metal.

17-2 MAQUINADO QUÍMICO (MQ)

Durante muchos años se ha sabido que la mayor parte de los metales (y también algunos cerámicos) son atacados por químicos específicos, usualmente ácidos y álcalis. El metal se disuelve átomo por átomo y se convierte en un compuesto soluble sobre toda la superficie expuesta. En las aplicaciones de remoción de metal, sólo se ataca la superficie, pero las partes restantes se deben proteger con una sustancia, como cera, pintura o una película de polímero (material que evita el ataque químico). Las películas gruesas se depositan por inmersión o rocío sobre toda la superficie; el patrón que se va a grabar se corta en forma manual con un cuchillo a lo largo de una plantilla o con un láser, y el material de protección se desprende. (El proceso se repite cuando se utiliza grabado en etapas para producir partes de espesores variados.) Se obtiene una mejor exactitud aplicando el material protector a través de una pantalla de seda o de acero inoxidable, mediante un estarcido. Una mayor exactitud (mejor que 1 μm) se consigue con las películas fotorresistentes usadas en la tecnología de semiconductores (véase la Secc. 20-3-5). Hay varias aplicaciones:

1. El *grabado*, practicado durante cientos de años por artistas e impresores, actualmente se usa para placas de identificación y tableros de instrumentos.

2. El *maquinado químico* sirve para remover cavidades de material, como en el adelgazamiento de recubrimientos de alas endurecidos integralmente y otros componentes de aeronaves que suelen tener dimensiones muy grandes. La sustancia de ataque disuelve al material en todas direcciones; por lo tanto, socava hasta aproximadamente el mismo ancho que la profundidad del corte (Fig. 17-2*a*). El socavado se aprovecha para incrementar la rigidez de los lienzos con nervaduras cabeceadas (Fig. 17-2*b*). La rugosidad superficial depende de la estructura metalúrgica; las partículas de segunda fase pueden atacarse con diferente rapidez.

3. *Troquelado químico*, se emplea para cortar a través de una lámina delgada. Cuando la protección se lleva a cabo por medio de técnicas fotoquímicas (Secc. 20-3-5), al

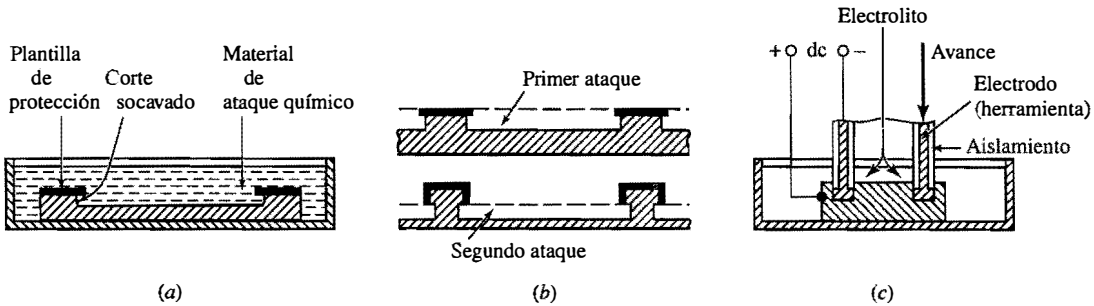


Figura 17-2 El corte socavado desarrollado en el ataque químico (a) puede aplicarse para fabricar ranuras (*b*). La remoción del material se acelera en los materiales eléctricamente conductivos mediante el maquinado electroquímico.

Tabla 17-1 Procesos de maquinado químico y eléctrico*

	Maquinado químico	Maquinado electroquímico	EDM por penetración	EDM por alambre
Rapidez de remoción de metal	0.012-0.07 mm/min	1.5 cm^3/1 000 A · min	0.15-400 cm^3/h	200 cm^2/h acero 450 cm^2/h Al
Acabado superficial, R_a μm	2 en Al 1.5 en acero 0.6	0.1-1.4	0.2 a 0.15 cm^3/h 5 a 8 cm^3/h 10 a 50 cm/h	0.1 corte poco profundo 1-2 corte de desbaste
Corriente eléctrica				
Volts		4-24	< 300	45-60
Amperes		50-40 000	0.1-500	1-32
Frecuencia		DC	0.5 MHz-200 Hz	180-300 000

*Extraídos de *Machining Data Handbook*, 3a. ed., Machinability Data Center, Metcut Research Associates, Cincinnati, Ohio, 1980.

proceso se le llama *maquinado fotoquímico.* Los tableros de circuitos impresos y las partes de lámina delgada se fabrican por medio de esta técnica.

Las diversas rapideces para remover metal se establecen en la tabla 17-1.

Ejemplo 17-1

Un componente de una aeronave se maquina químicamente de una placa de aleación 2024-T3 de 500 × 800 mm y 20 mm de espesor. Un patrón nervadurado se produce removiendo 80% del área hasta una profundidad de 18 mm. (*a*) Suponiendo una rapidez media de remoción de material de la tabla 17-1, calcule el tiempo requerido. (*b*) Para reducir el ensamble, el patrón se repite y la integración de la pieza forma en una placa de 500 × 800 mm; calcule el tiempo necesario.

(*a*) De la tabla 17-1, la rapidez de remoción es (0.012 + 0.07)/2 = 0.041 mm/min. La profundidad a remover es de 18 mm; el tiempo de maquinado es igual a 18/0.041 = 439 min = 7.3 h.

(*b*) El área de la superficie no entra en el cálculo, así que el tiempo de maquinado permanece igual. Esto demuestra la gran ventaja del proceso para maquinar piezas grandes (o varias piezas pequeñas en un tanque grande).

4. *Rebabeado termoquímica*, considerada como una versión a alta temperatura del maquinado químico. Las piezas se encierran en una cámara en la que se introduce una mezcla explosiva de gas natural, hidrógeno y oxígeno. Al incendiarse, la elevada temperatura instantánea elimina las rebabas mediante fusión, vaporización y oxidación. Las piezas apenas se calientan, a condición de que la sección más delgada sea al menos 10 a 15 veces más gruesa que la rebaba. El proceso es adecuado para metales y plásticos termoestables.

17-3 MAQUINADO ELECTROQUÍMICO (ECM)

La rapidez de disolución del material aumenta en gran medida cuando se aplica una corriente de cd. El proceso es el inverso al del electroformado (Secc. 11-8). La pieza de trabajo, que debe ser conductora, se sumerge en el electrolito (una solución de cloruro de sodio, nitrato de sodio y ácido sulfúrico diluidos, o una solución comercial) junto con el cátodo siendo la pieza el ánodo. La tasa de remoción de material Wc ($g/s \cdot m^2$) puede calcularse a partir de la ecuación (11-4). Es común expresar el volumen removido en tiempo unitario

$$V_t = \frac{W_c}{\rho j} \left(\frac{m^3}{A \cdot s} \right) \tag{17-1}$$

donde ρ es la densidad (g/m^3) y j la densidad de corriente (A/m^2). Por conveniencia de cálculo, V_t se proporciona en la tabla 17-2 en unidades de $mm^3/A \cdot min$, con las valencias entre paréntesis. Entonces, la tasa de alimentación del electrodo es

$$v_e = V_t j \tag{17-2}$$

En algunos metales puede acumularse una película aislante de óxido que se puede romper con descargas de chispas intermitentes producidas por un arco o por un circuito de cd pulsante. Se usan varias versiones del proceso:

1. El *fresado electroquímico* sirve para eliminar material de superficies grandes; el cátodo está en forma de una placa plana montada a distancia.

2. En el *maquinado electroquímico* (ECM) se emplea un cátodo de metal o de grafito, que es el negativo de la forma que se va a producir. El cátodo se alimenta sobre la pieza de trabajo a una rapidez controlada (Fig. 17-2*c*). Se hace circular al electrolito, a menudo a través del cátodo, para desalojar el cieno de hidróxido metálico y para ventilar el hidrógeno que se forma en el curso de la electrólisis. La máquina herramienta está construida

Tabla 17-2 Tasas específicas de remoción de material en el maquinado electroquímico*

Metal	Tasa específica de remoción $mm^3/A \cdot min$
Hierro (2)	2.21
Hierro (3)	1.47
Aluminio (3)	2.06
Cobre (1)	4.39
Cobre (2)	2.20
Níquel (2)	2.11
Níquel (3)	1.36
Titanio (3)	2.19
Titanio (4)	1.65

*Recopilada de *Machining Data Handbook*, 3a. ed., Machinability Data Center, Metcut Research Associates, Cincinnati, Ohio, 1980.

de manera rígida para evitar vibraciones e inexactitudes consecuentes. En la tabla 17-1 se proporcionan directrices aproximadas de las variables del proceso.

3. En el *maquinado con electrolito y tubo conformado* (STEM) se utiliza un tubo aislado de titanio como cátodo, a través del que se bombea un electrolito ácido para hacer agujeros de 0.25 a 6 mm de diámetro, con razones de aspecto (profundidad-diámetro) hasta de 300:1. Se consiguen tolerancias de ±0.08 mm, con un acabado de 0.4 a 3.2 μm R_a. El proceso es lento (0.75 a 3 mm/min), pero se pueden hacer simultáneamente muchos agujeros de diámetros diferentes. En el *taladrado por corriente eléctrica* y en el *taladrado capilar* se usan tubos de vidrio para dirigir el electrolito y hacer agujeros pequeños en álabes de turbinas enfriados internamente y en piezas similares.

4. En el *esmerilado electroquímico* se emplea una rueda conductora de esmeril (Al_2O_3 aglutinada con cobre o diamante aglutinado con metal) como cátodo. La mayor parte del material se quita mediante electrólisis, puesto que el gránulo remueve los óxidos y las películas que interfieren. En contraste con el esmerilado convencional, la pieza de trabajo permanece fría y las presiones son bajas. El proceso es adecuado para afilar herramientas de corte de carburo y para esmerilar álabes y paletas de turbina, y piezas delicadas como agujas hipodérmicas y estructuras en forma de panal.

Como la remoción de metal ocurre en el estado iónico, la dureza del material no tiene relevancia en el MQ o en el ECM; la integridad superficial es excelente, no hay daño por calor; los esfuerzos residuales son mínimos o inexistentes, el acabado superficial es no direccional. A menudo se cortan las superaleaciones y los aceros completamente tratados térmicamente, así como las aleaciones de aluminio. Las aleaciones susceptibles a la fragilidad del hidrógeno se deben calentar a 200°C durante algunas horas después del MQ.

Ejemplo 17-2

El componente del ejemplo 17-1 tiene cavidades triangulares equiláteras de 100 mm por lado. Encuentre el tiempo de maquinado por cavidad, si la corriente aplicada es de 5 000 A.

El área frontal del electrodo es un triángulo equilátero de 100 mm por lado. Área = $100(50\sqrt{3})/2 = 4\,330$ mm^2. Densidad de corriente = 5 000 A/4 330 mm^2 = 1.155 A/mm^2. De la tabla 17-2, V_r = 2.06 mm^3/A · min. Rapidez de penetración, de la ecuación (17-2) = 2.06/1.155 = 1.784 mm/min. El tiempo de maquinado es igual a 18/1.784 = 10.1 min. El proceso se debe repetir para trabajar en toda la superficie de la pieza, por lo tanto aunque el tiempo de maquinado para una cavidad es mucho menor que el requerido para el maquinado químico, el tiempo total no sería favorable, sobre todo debido a la necesidad de electrodos de configuraciones diferentes. Sin embargo, el ECM es muy competitivo cuando se remueven áreas pequeñas.

17-4 MAQUINADO POR DESCARGA ELÉCTRICA (EDM)

En este proceso, no se utiliza la acción química; el metal se remueve a través del calor intenso de las chispas eléctricas. Existen varios procesos y todos comparten el mismo mecanismo.

La pieza de trabajo y el cátodo (herramienta), hechos de metal o granito, se sumergen en un *fluido dieléctrico*. Al sistema se le aplica una corriente directa con un potencial de hasta 300 V; si se usa una fuente de poder de estado no sólido, se incluye un capacitor en paralelo con el entrehierro (Fig. 17-3). A bajo voltaje, el fluido actúa como un aislante; a medida que el voltaje se acumula, el fluido sufre una *descomposición dieléctrica* (una gran cantidad de electrones aparecen en la banda de conducción) y una chispa pasa a través de la separación. Las temperaturas se incrementan lo suficiente para causar la vaporización local de un poco del material de la pieza de trabajo. Después de una descarga de duración controlada, el voltaje disminuye hasta un valor bajo durante un tiempo breve (tiempo de espera), para reestablecer la película aislante mediante la deionización del dieléctrico. Los generadores de impulsos repiten el ciclo controlado a una frecuencia de 200 a 500 000 Hz. El dieléctrico debe cumplir funciones

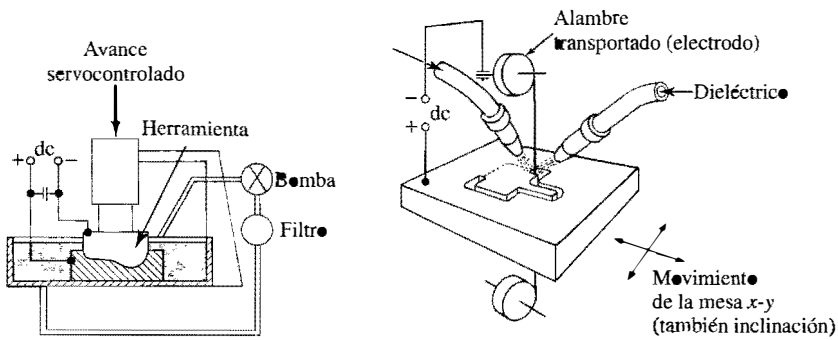


Figura 17-3 El maquinado por descarga eléctrica se practica con (a) herramientas formadas en el EDM por penetración y (b) alambre transportado en EDM por alambre.

adicionales: se suministra a la interfase herramienta-pieza de trabajo para proveer enfriamiento y para desalojar los residuos. Se debe filtrar continuamente para retirar residuos que podrían causar cortocircuitos. La descarga siempre ocurre en la separación más cercana; así que el electrodo se alimenta de manera continua para cortar la forma deseada. Las condiciones óptimas y la separación de entrehierro se mantienen mediante servocontrol. El control global del proceso actualmente se realiza con CNC.

La tasa de remoción de metal es una función de la densidad de corriente (tabla 17-1). Empíricamente se ha determinado que disminuye para metales de mayor punto de fusión,

$$V_{\text{EDM}} = 4T_C^{-1.23} \quad (\text{cm}^3 / \text{kA} \cdot \text{min}) \tag{17-3a}$$

donde T_C es el punto de fusión en grados Celsius. En unidades convencionales de volumen

$$V_{\text{EDM}} = 0.243T_C^{-1.23} \quad (\text{in}^3 / \text{kA} \cdot \text{min}) \tag{17-3b}$$

El acabado superficial está gobernado por una variedad de factores y se vuelve más rugoso con mayores densidades de corriente (lo que provoca más energías de descarga), un dieléctrico más viscoso y una menor frecuencia. Los mismos factores que contribuyen a un acabado más rugoso también provocan mayor *sobrecorte* (usualmente, de 0.005 a 0.5 mm/lado) y una *zona afectada por el calor* (dañada) es más profunda (por lo general de 2 a 400 μm de profundidad). Un poco del metal fundido se vuelve a depositar (*capa refundida*) y también puede ocurrir ablandamiento. Por lo tanto, se acostumbra usar una baja densidad de corriente para terminar un corte, o dar acabado a la superficie por medio de otras técnicas. Esto es de particular importancia para las piezas de trabajo sujetas a carga de fatiga.

La remoción de material no está limitada a la pieza de trabajo: también se erosiona la herramienta. En condiciones óptimas, la razón *de desgaste* (el volumen removido de la pieza de trabajo entre el perdido por la herramienta) es 3:1 con electrodos metálicos, y de 3:1 a 100:1 con electrodos de grafito. El proceso es insensible a la dureza del material; por lo que tiene amplia aplicación para fabricar matrices para forja, extrusión, para trabajo de lámina de metal, para fundición y para moldeo por inyección en bloques de matrices de acero endurecido, a través de varias técnicas:

1. *EDM por penetración.* Las cavidades complejas se forman por la penetración controlada de un electrodo formado en el cuerpo (Fig. 17-3*a*). El electrolito es aceite de baja viscosidad. El uso del electrodo se mejora restringiendo el uso de un nuevo electrodo para el acabado y luego usándolo para desbastar la siguiente pieza de trabajo. A veces el desbaste se realiza con un proceso EDM sin desgaste, en el que la polaridad se invierte y el ánodo de grafito no sufre pérdida de peso. Con la ayuda del CNC, a la pieza de trabajo se le da un movimiento lateral controlado (movimiento planetario con una amplitud de 10 a 100 μm) para mejorar la precisión y el acabado superficial e incrementar la tasa de remoción de material. También es posible maquinar formas complejas con electrodos sencillos movidos en una trayectoria compleja, de manera análoga al fresado de contorno con ejes múltiples, a condición de que la tasa de remoción permanezca suficientemente elevada. Aunque el proceso es bastante lento, generalmente se usa el con-

trol CNC con retroalimentación, y es posible agregar cambiadores automáticos de plataformas y de electrodos; de esta manera, el proceso se presta para la operación sin atención. Los electrodos se producen por medio del fresado de copiado o por CNC. También se han desarrollado procesos abrasivos especiales para producir electrodos de grafito.

2. *Corte por descarga eléctrica con alambre.* Denominado EDWC, o, más frecuentemente, EDM por alambre, se ha convertido en un proceso importante de producción. Ahora el electrodo es un alambre de latón, cobre, tungsteno o molibdeno de 0.08 a 0.3 mm de diámetro (Fig. 17-3*b*). El alambre actúa como una sierra de cinta, pero en lugar de los dientes, las chispas realizan el corte. La ranura que se forma es un poco más ancha (en cerca de 25 μm) que el alambre. Éste se alimenta continuamente desde la bobina de suministro bajo tensión controlada (cerca de 60% de su resistencia a la tensión) con una rapidez de entre 2.5 y 150 mm/s. Para ayudar a la expulsión del material de la ranura, se emplea *alambre estratificado*: el alambre de latón se recubre con Zn o un latón al alto Zn, el cual hierve antes que el núcleo pierda su resistencia. Así, es factible utilizar densidades de corriente más elevadas. La presión de gas ocasiona que el alambre se curve, así que la velocidad de viaje se debe reducir, especialmente en las esquinas, si se requiere un corte recto a través del espesor. Como lo indica la ecuación (17-3), el corte progresa más rápido en metales de menor punto de fusión (tabla 17-1). El electrolito es aceite o agua con aditivos; el crecimiento de bacterias se evita por medio de un tratamiento con ozono, puesto que los bactericidas destruyen las propiedades dieléctricas. Uno o más *cortes superficiales* menos profundos (usualmente de 0.04 mm) se pueden realizar con corriente ca de alta frecuencia para remover la superficie dañada. El control de ejes múltiples hace posible cortar formas 3-D, por ejemplo, matrices para extrusión con entrada ahusada. Los controles CNC con retroalimentación se utilizan para monitorear las condiciones del entrehierro, ajustar las velocidades de corte, y para volver a enhebrar en caso de fractura del alambre. Muchas piezas tienen agujeros para los que se debe hacer un agujero piloto por medio de algún proceso; luego el alambre se enhebra y el desperdicio se retira manual o automáticamente. Pueden cortarse esquinas muy agudas y la calidad del corte es adecuada para muchas matrices de trabajo de lámina de metal y otras aplicaciones, incluyendo matrices de WC. Se han cortado espesores de hasta 400 mm de esta forma.

3. *Taladrado por descarga eléctrica.* Se usa alambre de tungsteno como electrodo en conjunto con un dieléctrico acuoso para hacer agujeros de diámetro pequeño (entre 0.05 y 1 mm) y grandes profundidades, como agujeros de enfriamiento en álabes de turbinas fabricadas de superaleaciones. Al bombear el electrolito a través de un electrodo giratorio se eleva la tasa de remoción, pero a costa de las tolerancias.

4. *Esmerilado por descarga eléctrica.* La remoción del material ocurre por las descargas entre una rueda giratoria de grafito y la pieza de trabajo.

Ejemplo 17-3 Calcule las tasas relativas de remoción de metal por medio de EDM para Al 7075, acero 1045, superaleación de Hastelloy X, y una aleación de Ti-6Al-4V. Tome los puntos de fusión de la tabla 8-3 y de la figura 6-11.

Aleación	Liquidus, °C	$T^{-1.23}$
Al 7075	640	0.354×10^{-3}
Acero 1045	1 500	0.124×10^{-3}
Hastelloy X	1 290	0.149×10^{-3}
Ti-6Al-4V	1 660	0.109×10^{-3}

Note que la condición metalúrgica del material no entra en la relación. El acero 1045 se podría templar y revenir o bien estar completamente recocido. Se corta a casi la misma rapidez que la superaleación de Ti, que normalmente se considera mucho más difícil de maquinar.

Ejemplo 17-4

Los rotores de acero inoxidable de los motores para cohete de 50 mm de diámetro se fabricaban mediante el fresado de 5 ejes. Cada rotor contiene más de 100 álabes de forma compleja con una tolerancia de ±0.03 mm, y el maquinado tomó 2 000 horas por pieza. Posteriormente, los rotores se fabricaron por EDM; primero se eliminó el material de un lado para obtener los bordes de ataque, luego la parte se invirtió y se maquinó de nuevo para obtener los bordes de salida. El tiempo de maquinado fue de 400 horas, sólo un quinto del tiempo que requería el fresado. [Fuente: *Manufacturing Engineering*, 1998(3): 160.]

17-5 MAQUINADO POR HAZ DE ALTA ENERGÍA

Los materiales se pueden maquinar —principalmente corte y perforado— fundiendo y/o vaporizando la sustancia de manera controlada. Los procesos se derivan de los procesos de unión que se estudiarán en el capítulo 18. No sólo son útiles para metales sino también para materiales que de otra manera serían difíciles de maquinar, por ejemplo, los plásticos, los cerámicos y los compuestos.

17-5-1 Maquinado por haz de electrones (EBM)

La fuente de energía para el EBM es un cañón de electrones (Fig. 17-4) similar a un tubo de vacío. El cátodo de W o Ta, calentado a 2 500°C, emite grandes cantidades de electrones que se aceleran y enfocan hasta un haz de 0.25 a 1 mm de diámetro de alta densidad de energía (en exceso de 200 kW/mm^2). En el impacto, la energía cinética de los electrones se transforma en energía térmica, suficiente para fundir y vaporizar parcialmente el material de la pieza de trabajo; el vapor expulsa la fusión. Se emplean impulsos de 0.05 a 100 ms de duración. La cavidad es de diámetro y profundidad pequeños (de ahí el término *agujero de cerradura*), la zona afectada por el calor es muy angosta, y la eficiencia de la conversión de la energía es alta, cerca de 65%. Como un haz de electrones se puede desviar con una bobina electromagnética, se hacen cortes de alta calidad en patrones complejos, prácticamente en cualquier material.

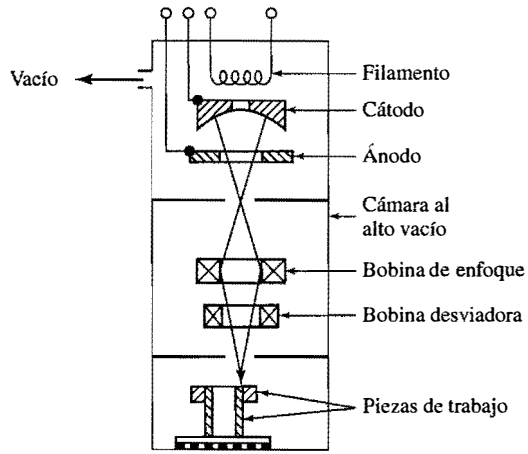


Figura 17-4 Se obtienen densidades de energía muy altas en el corte con haz de electrones.

El cañón de electrones siempre está al alto vacío. La penetración más profunda se obtiene cuando la pieza de trabajo también está contenida en *alto vacío* (10^{-4} a 10^{-1} Pa), pero hacer el vacío en la cámara lleva varios minutos. El *vacío medio* (0.1 a 3 kPa) permite aún la operación sobre muchos metales con un tiempo de bombeo de menos de 1 minuto. Con trampas de vacío especialmente construidas, el haz de electrones emerge desde el cañón hacia un gas protector, pero las intensidades de la potencia son mucho menores en la operación fuera de cámara o *sin vacío*.

Con impulsos individuales, se producen agujeros pequeños (de 0.1 a 0.3 mm de diámetro en lámina de 0.1 mm de espesor, y de 0.6 a 0.85 mm de diámetro en material de 8 mm de espesor) con extremada rapidez; miles de agujeros se hacen en sólo minutos. Las razones de profundidad-diámetro varían hasta 15. Para agujeros pasados se necesita un respaldo temporal para mantener presión de vapor; el respaldo a menudo es polvo de latón en caucho silicónico o epóxico. Los componentes de los motores de reacción, así como las hiladas para las fibras de vidrio y de polímero, con frecuencia se fabrican por medio de esta técnica.

17-5-2 Maquinado por rayo láser (LBM)

La palabra láser significa *amplificación de la luz mediante la emisión estimulada de radiación*. Algunos materiales (*que facilitan el láser*) emiten un haz de luz altamente colimado, coherente y monocromático cuando se excitan (*bombean*) con una fuente de energía apropiada. Las aplicaciones han proliferado ya que se obtienen altas densidades de energía, no se necesita vacío, y el haz se dirige fácil y rápidamente por instrumentos ópticos adecuados.

En los primeros láser se utilizaba rubí (un cristal de Al_2O_3 con iones de Cr) como el medio para el láser y aún son útiles para tareas como alineación y medición. Para propósitos de manufactura, se aplican tres clases de láser, cada una proporciona una luz de longitud de onda diferente. El tamaño de la sección del haz es una función de la longitud de onda y de la óptica empleada, pero generalmente disminuye con la disminución de la longitud de onda. Así, el ancho del corte también decrece con la disminución de la longitud de onda.

1. *Láser de gas.* Los que más se estilizan son los *láser de CO_2*; éstos contienen una mezcla de gases en la que el CO_2 es el medio para el láser, excitado por una descarga eléctrica entre electrodos colocados en el tubo de descarga. La luz emitida es una longitud de onda de 10.6 μm, en el rango infrarrojo extremo, y se puede dirigir con espejos. Las unidades grandes pueden desarrollar más de 40 kW en el modo continuo con una eficiencia de 15%; en el modo de impulsos, la energía es menor de 1 J/impulso.

2. *Láser de estado sólido.* El *láser Nd:YAG* más importante para la industria contiene pequeñas concentraciones de iones de neodimio en un granate de itrio aluminio (YAG). Bombeados con luz blanca de alta intensidad de una lámpara de xenón o criptón (Fig. 17-5*a*), emiten radiación de una longitud de onda de 1.06 μm (infrarroja cercano), la cual se dirige con fibras ópticas a grandes distancias, sin pérdida excesiva. El haz se comparte entre varias estaciones para justificar la inversión mayor. Operados ya sea en el modo de impulsos o en el continuo, los láser desarrollan hasta 500 J/impulso de una duración de 0.1 a 20 ms, o varios kW continuos. La eficiencia global de la conversión de energía es baja, de alrededor de 2%.

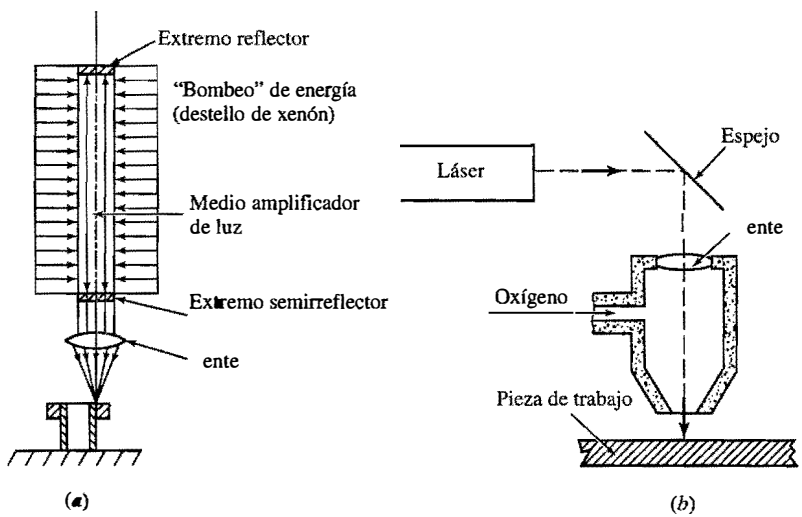


Figura 17-5 Las altas densidades de energía generadas por (*a*) rayos láser se usan para realizar el corte, y éste se acelera en gran medida cuando (*b*) se suministra oxígeno a la zona de corte.

3. *Láser excímer.* Estos dispositivos tienen una salida mucho menor y se usan sobre todo para el micromaquinado o para el procesamiento de semiconductores (y también para la cirugía correctiva ocular). En una descarga eléctrica, un átomo de gas noble (Ar, Kr, Xe) y un gas halógeno (Cl_2 o F_2) forman un dímero (de ahí su nombre "dímero excitado", *excited dimer*). A medida que la descarga eléctrica decae, el dímero se divide y emite luz UV. La energía absorbida por el material objetivo es suficientemente grande para romper los enlaces químicos y expulsar moléculas pequeñas sin fusión. Se utiliza una plantilla para definir el patrón (*grabado láser sin calor*).

Los rayos láser se pueden enfocar con lentes hechos de materiales transparentes para la longitud de onda particular (seleniuro de zinc o germanio para el CO_2, y vidrios convencionales para el láser de YAG). Como los rayos están altamente colimatados, hasta un tamaño de la sección de 0.2 a 0.3 mm, se logran densidades pico de la energía de 5 a 200 kW/mm^2. Dependiendo de la densidad de la energía, un poco de material se fusiona (ablación), otro se evapora, creando un agujero de cerradura, como en el corte por haz de electrones. El maquinado a una profundidad controlada es posible hasta cierto punto. Frecuentemente, el oxígeno se suministra a la superficie para incrementar la absorción de energía (Fig. 17-5*b*). La reacción exotérmica de oxidación también suministra calor y acelera la fusión; además, el óxido se funde a una temperatura menor y se retira. Los aceros tratados térmicamente se pueden cortar; la calidad del borde es adecuada aun para punzones y matrices usados en el trabajo de lámina de metal.

Los láser proporcionan una solución para el difícil problema de taladrar agujeros en materiales duros. En el *taladrado de percusión* con descargas intensas, el agujero es del tamaño del haz, que varía al enfocarlo; las tolerancias son ±0.03 mm. En el trepanado se corta un círculo con una tolerancia de ±0.013 mm. El tamaño mínimo del agujero es usualmente de 0.5 mm para el láser de CO_2, 0.08 mm para el láser de Nd:YAG y 1 μm para el láser excímer. Los agujeros ciegos no se pueden hacer a la profundidad exacta.

Ejemplo 17-5

En la Harley-Davidson, las partes de lámina de metal estiradas-embutidas, como protectores de calor, tanques de combustible y defensas, se cortaban antiguamente en zig zag en matrices complejas de prensa: las dos matrices se cierran y luego se mueven en dos direcciones laterales para recortar la pieza en un plano horizontal. Los tiempos de ajuste eran de 20 a 90 min por matriz y el borde recortado debía lijarse. Actualmente, un sistema láser robótico tridimensional requiere tiempos de ajuste de sólo 1 a 10 min y recorta tan rápido como lo hacían las matrices, pero con un acabado directo de borde aceptable y sin el costo de las matrices. Como la pieza no la toca ninguna herramienta, no hay defectos para desmerecer su acabado superficial. [Según J.V. Owen, *Manufacturing Eng.*, 1992 (6): 35-41.]

Ejemplo 17-6

Los taladrados por haz de electrones y por láser a menudo son competitivos. Las hiladas para la manufactura de fibra de vidrio y de polímero son ejemplos muy importantes. En un caso, 25 600 agujeros de 0.6 mm de diámetro se taladraron con un haz de electrones en un anillo de superaleación de 3.3 a 5.5 mm de espesor de pared en 16 min. Un láser YAG emplearía alrededor de 12 veces más tiempo. [Fuente R.R. Schreiber, *Manufacturing Eng.*, 1992 (5): 37-41.]

17-6 MAQUINADO DE MATERIALES NO METÁLICOS

El énfasis en el análisis anterior y en el capítulo 16 se puso en los metales, pero muchos de los principios básicos analizados se aplican a otros materiales, si se consideran sus propiedades.

17-6-1 Maquinado de materiales cerámicos

La mayor parte de los cerámicos son duros y actúan como abrasivos. Por lo tanto, con frecuencia su maquinado está limitado a la abrasión mediante otro cerámico aún más duro. Así, el diamante se puede usar para afilar ruedas de esmerilado o para terminar brocas de herramienta o componentes cerámicos (por ejemplo, Al_2O_3). Todos los procesos abrasivos, incluyendo esmerilado, lapeado, pulido, maquinado ultrasónico, hidrorrectificado, chorro de arena y corte abrasivo por chorro de agua, se emplean tanto para el terminado global como para el formado localizado de piezas cerámicas (incluso vidrio). Los cerámicos susceptibles al ataque químico (como lo es el vidrio al ataque del ácido HF) se pueden maquinar químicamente. Se han desarrollado procesos mecánicos abrasivos, así como los *químico-mecánicos*, para el acabado de materiales frágiles hasta un nivel muy alto de calidad superficial.[1]

El esmerilado con tasas lentas de alimentación puede ser económico para desarrollar la forma partiendo de una preforma simple. Las velocidades, comparadas con las de los metales, son bajas (45 m/s); la profundidad de corte es de 2.5 a 6 mm, y el avance de 250 a 600 mm/min. El calor se transporta en las partículas; por lo tanto, los esfuerzos, la potencia requerida y las temperaturas son menores que en el esmerilado superficial.

Muchos procesos no tradicionales reciben aplicación. El EDM es posible si la resistividad es menor de 300 $\Omega \cdot$ cm. La vaporización por rayo láser es adecuada para taladrar cerámicos y cristales de silicio y se usa extensamente para hacer rayado rectilíneo en sustratos electrónicos: la perforación parcial crea una línea de falla a lo largo de la que las piezas se pueden separar con seguridad.

Ejemplo 17-7

Para una vida larga, las bolas de algunos rodamientos hechos de Si_3N_4 deben ser lisas y libres de defectos superficiales. Se terminan puliéndolas; el pulido químico-mecánico remueve material con rapidez, combinando abrasión con reacciones químicas en un entorno acuoso. La superficie se convierte en SiO_2 frágil, el cual tiene una dureza significativamente menor que el Si_3N_4 y se remueve un abrasivo relativamente suave como el CeO_2. Así, se puede lograr una superficie libre de rayaduras con acabado $R_a = 4$ nm ($R_t = 40$ nm). [Fuente M. Jiang, N.O. Wood y R. Komanduri, *J. Eng. Mat. Techn.*, **120**: 04-312 1998).]

[1] R. Komanduri, D.A. Lucca y Y. Tani, *CIRP Annals*, **46**: 545-596 (1997).

17-6-2 Maquinado de plásticos

Aunque los plásticos tienen una estructura molecular en vez de atómica, los procesos de formación de viruta se pueden aplicar a ellos si se toman en cuentan las diferencias en sus propiedades.

1. En comparación con los metales, los plásticos tienen un módulo de elasticidad bajo y se flexionan fácilmente con las fuerzas de corte; por lo tanto, deben apoyarse cuidadosamente.

2. Debido al comportamiento viscoelástico de los termoplásticos, determinada cantidad de la deformación elástica local inducida por el filo de corte se recupera cuando la carga desaparece. En consecuencia, las herramientas deben tener ángulos de alivio grandes y se deben fijar más cerca que el tamaño terminado de la parte.

3. En general, los plásticos tienen una conductividad térmica baja (tabla 4-1); así que la acumulación de calor en la zona de corte no se distribuye por el cuerpo, por lo que la superficie cortada se puede sobrecalentar. Es factible alcanzar la temperatura de transición vítrea T_g en una resina termoplástica, y deformar o dañar la superficie, mientras que ocurren la descomposición térmica y el agrietamiento en las resinas termoestables. Por lo tanto, se debe reducir la fricción puliendo y rectificando las caras activas de la herramienta y aplicando un chorro de aire o un refrigerante líquido (preferiblemente con base de agua, a menos que ataque al plástico). El mejor acabado superficial se produce a alta velocidad y con baja alimentación. Los dientes de las sierras se deben espaciar mucho para evitar el sobrecalentamiento.

4. Como la zona de corte decrece y la energía de corte se reduce con un ángulo de ataque grande (Secc. 16-1-1), las herramientas de corte se fabrican con un ángulo de ataque positivo grande (tabla 16-4). Esto es permisible porque la resistencia de los plásticos es baja, comparada con la de los metales. Sin embargo, con ángulos de ataque excesivos, el mecanismo de corte cambia a *escisión*, en el cual se levantan fragmentos gruesos desunidos y se produce una superficie muy pobre.

5. Las brocas helicoidales deben tener ranuras amplias y pulidas, un ángulo de la hélice bajo (<30°) o incluso cero, y un ángulo de la punta de 60 a 90°, sobre todo para plásticos más suaves, aunque algunos como el PP se pueden taladrar con brocas estándar.

6. Los plásticos pueden ser sorprendentemente difíciles de maquinar cuando están reforzados con rellenos. Las fibras de vidrio son particularmente agresivas para las herramientas, en lo que no es poco común que sólo las de carburo o de diamante puedan soportar el proceso.

7. El recorte de las piezas de plástico a menudo se realiza con procesos no convencionales. El chorro de agua es suficiente para plásticos sin relleno, pero el chorro abrasivo de agua es necesario para plásticos con relleno; estos procesos no se pueden utilizar si el plástico absorbe agua (como lo hacen las aramidas). En el corte con haces de alta energía, las cadenas de los polímeros se degradan, los polímeros termoplásticos se funden y los termofijos se descomponen (queman). Pueden producirse bordes limpios.

En general, los métodos de moldeo y de formado (Cap. 14) producen acabados superficiales y tolerancias aceptables (Fig. 3-22), y por lo general el diseño tiene como objetivo evitar el maquinado subsecuente. Sin embargo, en ocasiones el maquinado es una alternativa viable al moldeo (por ejemplo, para PTFE, el cual es un producto sinterizado y no moldeable por medio de las técnicas usuales).

17-6-3 Maquinado de compuestos

Algunos problemas comunes en el corte de los compuestos son la delaminación, el limitado acabado superficial y la extracción de la fibra o resina. Por lo tanto, los procesos no tradicionales se usan mucho para hacer agujeros, recortar piezas terminadas y para cortar blancos para su formado posterior. Una gran ventaja es que no hay desgaste y los bordes quedan sellados. Los robots con control de ejes múltiples son necesarios cuando la pieza tiene una configuración tridimensional.

El chorro abrasivo de agua puede funcionar con todos los compuestos de matriz plástica, pero es mejor evitarlo para los compuestos con fibras aramídicas. Los plásticos se pueden cortar con láser, aunque algunos se descomponen o se queman. Los láser se emplean para compuestos vidrio/epóxico y Kevlar/epóxico, pero no para plásticos reforzados con fibra de carbono, ya que este último no se evapora a una temperatura suficientemente baja. Los compuestos de vidrio/epoxi se queman y los bordes se vuelven conductivos; por lo tanto, si el aislamiento es importante, el borde dañado debe removerse.

Como se indicó en la sección 15-1-2, la madera es un polímero natural con una estructura altamente direccional. Su resistencia relativamente baja permite el trabajo con ángulos de ataque altamente positivos; sin embargo, el material puede partirse delante de la herramienta cuando la dirección de la veta fomenta la escición a un ángulo que produce un espesor mayor de la viruta sin deformar. Los cortes de alta calidad se realizan con láser si la densidad de energía es suficientemente alta para causar vaporización.

Los compuestos con matriz de metal, como los insertos de las herramientas de carburo, se pueden esmerilar convencionalmente con diamante, o se puede aprovechar la conductividad eléctrica de la matriz por medio de una descarga eléctrica o por maquinado y esmerilado electromecánicos.

17-7 CAPACIDADES DEL PROCESO Y ASPECTOS DEL DISEÑO

Las capacidades del proceso se determinan por la naturaleza del proceso. La mayor parte de los procesos son principalmente para la generación de formas en dos dimensiones, y existen pocas limitaciones sobre la complejidad de éstas. En la tercera dimensión, se pueden cortar escalones sencillos por medio del maquinado químico y se pueden producir formas sin cortes socavados mediante la penetración con herramientas formadas en ECM y EDM por penetración. Los cortes socavados limitados se pueden

formar con EDM si el electrodo (o la pieza de trabajo) se fija a un ángulo y se mueve de manera programada. El EDM por alambre es capaz de hacer cualquier forma que tenga una generatriz de línea recta.

El maquinado ultrasónico es, hasta cierto punto, competitivo con el EDM por penetración y con el ECM. El EDM por alambre, el haz de electrones y el maquinado por láser compiten con el corte con chorro abrasivo de agua (AWJ) y con algunos procesos de soldadura, especialmente con el corte con arco de plasma. En la tabla 17-3 se proporciona una evaluación comparativa en términos del costo, la productividad y las características técnicas. Las tolerancias y el acabado superficial inferiores son aceptables para muchas aplicaciones y no necesariamente eliminan un proceso de consideración. A menudo hay escoria de metal resolidificado en el lado de salida de los cortes con plasma y, en cantidades menores, en los cortes con haz de electrones y con láser, pero tanto la escoria como la zona afectada por el calor están por completo ausentes en el corte por AWJ. El corte con chorro de agua es una alternativa potencial para materiales suaves, principalmente plásticos, caucho, cuero y telas.

Todos los procesos de corte son muy adecuados para cortes de contorno, si se usan mecanismos de seguimiento, NC o CNC. El corte con plasma o con láser a menudo se incorpora en centros de punzonado CNC (Secc. 10-3-4), con lo que se incrementa en gran medida la versatilidad de estas máquinas. Con una alta rapidez de posicionamiento y control CNC, la productividad puede ser muy alta, haciendo al láser competitivo a pesar de su elevado costo de capital.

17-8 RESUMEN

Una característica común de los procesos de maquinado no tradicionales es que la remoción de material ocurre no por la formación de viruta, sino por la disolución químí-

Tabla 17-3 Características de los procesos de corte

	Láser	EDM por alambre	Plasma	Chorro abrasivo de agua
Espesor máx, mm	12 acero, 4 Al	200	200	200
Ancho de corte, mm	0.2-0.5	0.1-0.5	1-4	0.8-1.5
Tolerancia, ± mm	0.02-0.4	0.01-0.03	1	0.2-0.4
Rugosidad del borde, R_a µm	1-2	0.2-1	1-10	1-2
Inclinación del borde, grados	0.5-1	0	1-3	0
Zona afectada por el calor, mm	0.03-1	0.05-0.5	1-5	0
Metal	Sí	Sí	Sí	Sí
Cerámico	Sí	(No)*	No	Sí
Plástico	Sí	No	(Sí)†	Sí

*Sí, si es conductor.

†Sí sólo si el quemado del borde es aceptable.

ca, la fusión, la evaporación o el rompimiento de enlaces. Debido a esto, los procesos son insensibles a la dureza del material de la pieza de trabajo y ocupan una posición especial en el maquinado de aceros para herramienta tratados térmicamente, de superaleaciones, de cerámicos y de compuestos. En muchos casos, el control CNC de lazo cerrado permite que los procesos sean operados sin atención o en el modo de luces apagadas.

1. El maquinado químico es lento, pero es factible tratar superficies amplias, de ahí que la productividad sea adecuada, especialmente si la tarea de aplicación de plantillas se acelera.
2. El ECM ofrece una tasa de remoción de material mucho mayor en materiales conductores de electricidad. El esmerilado EC es valioso para el conformado de herramientas de carburo cementado.
3. El EDM ha alcanzado una posición significativa en la fabricación de herramientas y matrices. El EDM por penetración produce cavidades de forma compleja y el EDM con alambre se ha convertido en el proceso preferido para muchas formas de matrices bidimensionales.
4. El corte con haz de electrones, y con mayor frecuencia mediante rayo láser, es adecuado para fabricar partes de pequeña y mediana producción. Como los rayos láser no requieren vacío, se pueden incorporar en los centros de corte con punzones mecánicos y mesas *x*-*y*. El láser también se emplea para hacer rayado rectilíneo y para marcar todos los materiales.
5. Los procesos no tradicionales a menudo ofrecen la única forma práctica para hacer agujeros pequeños y profundos en materiales muy duros.
6. Muchos procesos representan peligros para la salud. Las sustancias químicas empleadas en el CM y ECM son corrosivas y se requieren sistemas de recolección de vapores y ropa de protección para su manejo. Muchos fluidos EDM son flamables y se deben instalar extintores de fuego. Las instalaciones con haces de alta energía necesitan estar encerradas, por lo que la protección ocular es esencial.

PROBLEMAS 17A

17A-1 Defina (*a*) CM y (*b*) ECM. (*c*) Haga un boceto que muestre las características esenciales de una instalación para ECM.

17A-2 Defina (*a*) EDM y (*b*) realice un bosquejo que indique los elementos esenciales de EDM por penetración.

17A-3 Defina (*a*) esmerilado electroquímico y (*b*) esmerilado por descarga eléctrica.

17A-4 ¿Qué quiere decir el término *láser*?

17A-5 ¿Es necesario que la pieza de trabajo sea un conductor eléctrico para el maquinado (*a*) CM, (*b*) ECM, (*c*) EDM, (*d*) haz de electrones y (*e*) rayo láser? (Simplemente responda sí o no.)

17A-6 Los circuitos de un tablero de circuito impreso se fabrican por medio del ataque fotoquímico de una tira de cobre. Establezca cuánto tiempo tardará en atacar a través de

un cobre completamente duro, respecto a uno blando del mismo espesor.

PROBLEMAS 17B

17B-1 Un álabe de una turbina internamente enfriado tiene 30 agujeros de 0.5 mm de diámetro. El material es una superaleación de alta dureza. Sugiera al menos tres procesos que se podrían considerar para hacer los agujeros.

17B-2 Un componente de plástico reforzado con fibra de 1 m de longitud y 0.5 m de ancho se prensa en una forma poco profunda pero compleja mediante el moldeo en matrices acopladas. Los bordes de la pieza terminada deben recortarse. Liste todos los procesos útiles si el plástico es un polímero termoplástico y la fibra es (*a*) vidrio o (*b*) carbono. Enuncie las ventajas y limitaciones.

17B-3 Se van a cortar blancos de una forma dada de una lámina de polímero termoplástico de 0.5 mm de espesor. Para una mayor productividad, se propone apilar 10 láminas del plástico y cortarlas juntas. Mencione los procesos que se podrían emplear para cortar (*a*) individualmente y (*b*) en una pila, justificando su elección. (Enliste los procesos posibles, pero que deberían ser rechazados.)

17B-4 Un cuerpo tridimensional se fabrica por deposición manual de un compuesto de moldeo (prepeg) de epóxico reforzado con fibra de vidrio. Se utilizan varias piezas, cada una con forma diferente. Indique tres métodos (tradicionales o no) para cortar la forma, y juzgue (*a*) la aplicabilidad, (*b*) la conveniencia para la producción de una sola pieza, (*c*) la conveniencia para la producción de un lote medio, (*d*) la inversión en el equipo y (*e*) la precisión del corte.

17B-5 Ciertas partes prensadas de acero al bajo carbono de 1 mm de espesor y de forma tridimensional compleja necesitan recortarse. Determine al menos cinco métodos convencionales y no tradicionales que se pueden considerar y clasifíquelos en orden de conveniencia (incluya procesos que deben rechazarse). Justifique sus clasificaciones dando las ventajas y las desventajas principales de cada proceso.

17B-6 Se hará un agujero de 20 mm de diámetro en láminas de Al, ya sea por CM o ECM. El espesor de la lámina es de 1 mm o de 3 mm. Para cada espesor de la lámina elija el diámetro del (*a*) corte en el material de protección para CM y (*b*) del electrodo para ECM. (Los valores absolutos se determinarán a partir de la experiencia; aquí el interés primario son las magnitudes relativas.)

17B-7 Un agujero se hará en un acero de herramienta D2 de 30 mm de espesor con dureza HRC 60, por medio de EDM con alambre. Sugiera al menos tres opciones para hacer el agujero inicial, y juzque su conveniencia.

PROBLEMAS 17C

17C-1 Un agujero de 80 mm de diámetro se trepana mediante ECM (como en la Fig. 17-2*c*) en una placa de acero de matriz H13 para trabajo en caliente de 50 mm de espesor. El diámetro interior del electrodo en forma de tubo es de 60 mm. La fuente de poder disponible suministra 10 000 A. Ignorando el sobrecorte, estime el tiempo necesario para terminar el corte (suponga que la velocidad de remoción es la mitad entre el hierro bivalente y el trivalente en la tabla 17-2).

17C-2 Una pieza de una superaleación con base de Ni tiene una configuración superficial tridimensional con cavidades poco profundas. Se someterá a carga de fatiga en el servicio. El acabado superficial es 0.2 mm R_a. Los procesos bajo consideración incluyen (*a*) esmerilado a velocidad lenta, (*b*) fresado CNC, (*c*) fresado CNC seguido del esmerilado, (*d*) fresado CNC seguido de esmerilado electroquímico y (*e*) EDM por penetración. Realice una crítica, en la que evalúe cada proceso probable para producir el acabado superficial requerido sin esfuerzos residuales dañinos. (*Sugerencia*: comience con la Fig. 3-22 y depure su juicio al referirse a las descripciones de los procesos en este libro.)

17C-3 Una lámina de acero inoxidable 304 de 1 mm de espesor tiene 20 agujeros de 21.7 mm de diámetro en un patrón irregular. La tolerancia diametral y de localización es ±0.1 mm. Se permite una altura máxima de la rebaba de 0.1 mm. Repase todos los métodos que pueda pensar para fabricar (*a*) una lámina y (*b*) 150 láminas por semana. (*c*) Critique el diseño de la pieza; sugiera cómo cambiarían las elecciones si el diámetro del agujero fuera de 20 mm. Justifique su respuesta, incluyendo los procesos rechazados.

17C-4 Una lámina de acero inoxidable 304 de 1 mm de espesor se producirá con 1 200 agujeros de 0.2 mm de diámetro. La tolerancia diametral y de localización es ±0.03 mm y no se permite rebaba. Repase todos los métodos factibles para fabricar (*a*) una lámina y (*b*) 12 láminas por semana.

17C-5 Las matrices de forjado necesarias para fabricar las piezas del ejemplo 9-23*b* se producen por EDM por penetración. Tome las dimensiones de la figura del ejemplo 7-9*b*, y para completar el diseño de la matriz agregue canales de rebaba internos y externos como en la figura del ejemplo 9-23*b*. (*a*) Realice un boceto con las dimensiones de la matriz inferior y (*b*) estime el tiempo de maquinado si 99% del volumen es removido a la máxima rapidez, y si para mejorar el acabado superficial y lograr una capa refundida mínima, 1% se remueve a la rapidez mínima.

LECTURAS ADICIONALES (véase también el capítulo 16)

Guitran, E.B.: *The EDM Handbook*, Hanser-Gardner, 1997.

Hablanian, M.H.: *High-Vacuum Technology*, 2a. ed., Dekker, 1997.

Harris, W.T.: *Chemical Milling: The Technology of Cutting Materials by Etching*, Oxford University Press, 1976.

Hoare, J.P. y M.A. LaBoda: *Electrochemical Machining*, en *Comprehensive Treatment of Electrochemistry*, vol. 2, Plenum, 1981.

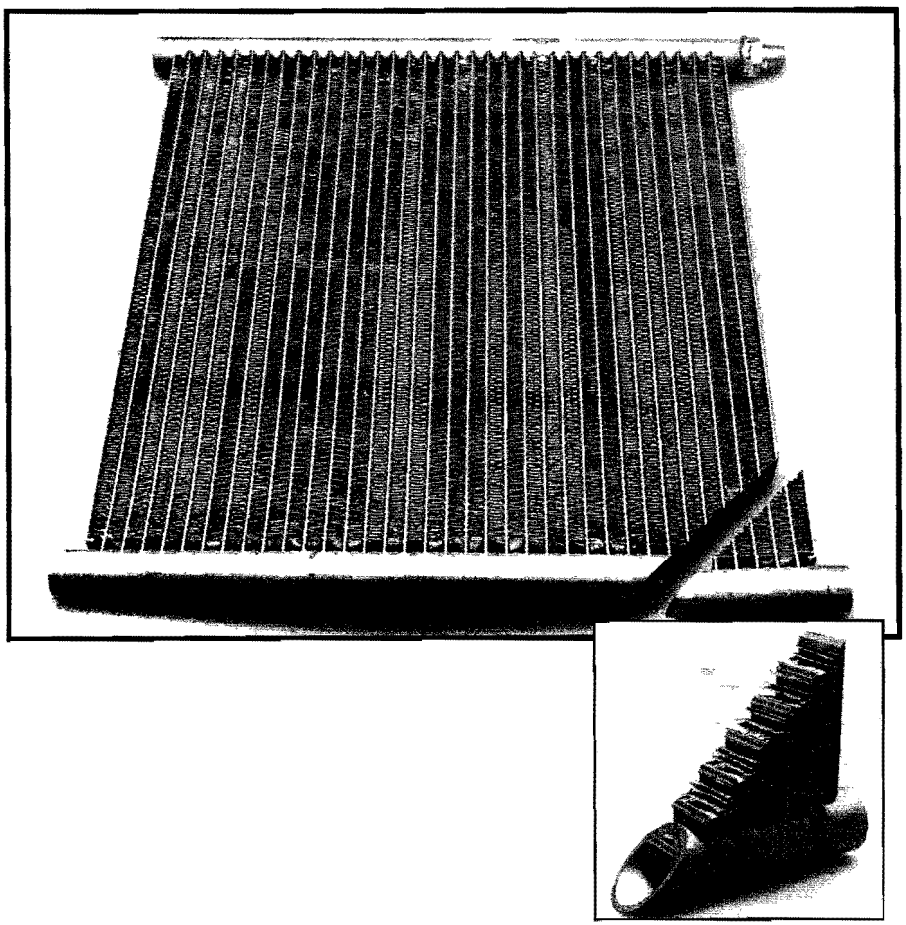
Ikeda, M.I., Miyamoto y T. Miyazaki: *Energy-Beam Processing of Materials*, Oxford Science Publications, 1989.

Powell, J.: *CO_2 Laser Cutting*, Springer, 1991.

Steen, W.M.: *Laser Material Processing*, Springer, 1991.

Taniguchi, N.: *Energy-Beam Processing of Materials*, Oxford University Press, 1989.

Weller, E.J. (ed.): *Nontraditional Machining Process*, 2a. ed., Society of Manufacturing Engineers, 1984.



Centenares de componentes de aluminio de este cambiador de calor automotriz se unen simultáneamente con soldadura fuerte; las aletas en forma de persiana visibles en la sección sin corte son sólo de 0.1 mm de espesor. (*Cortesía de Modine Manufacturing Co., Racine, Wisconsin.*)

capítulo

18

Procesos de unión

Las piezas producidas por cualquiera de los métodos previamente analizados se pueden unir para formar cuerpos más grandes y complejos. Se explorarán las bases de técnicas como:

Sujeción mecánica

Creación de un enlace metalúrgico por adhesión y difusión

Unión mediante fusión con el uso de varias fuentes de calor

Soldadura fuerte o suave con un metal de punto de fusión más bajo

Aplicaciones para plásticos y cerámicos

Producción de laminados

Construcción de piezas sin el uso de un molde

La unión difiere de los procesos previamente discutidos en que toma las piezas producidas por medio de otros procesos unitarios y las articula en una pieza más compleja; por lo tanto, también se podría considerar como un método de ensamble. El producto puede reemplazar a una pieza que habría sido fabricada a través de otras técnicas (por ejemplo, el bastidor fundido de una máquina herramienta es reemplazado por uno soldado) o ser de una clase que se produce sólo mediante procesos de unión (por ejemplo, una carrocería integral o un radiador automotrices, o un cuadro de bicicleta). Aunque la mayoría de los métodos de unión se practican en metales. también se pueden unir cerámicos y polímeros por medio de técnicas similares.

18-1 CLASIFICACIÓN

Algunas uniones son puramente mecánicas; dentro de esta categoría, los dispositivos que establecen uniones semipermanentes (como tornillos y pernos) son adecuadamente considerados como medios de ensamble. Nuestro análisis se enfoca en los procesos unitarios; de ahí que nos concentremos en los métodos para establecer uniones perma-

nentes (Fig. 18-1). Tenemos mucho en que basarnos. Los métodos de unión mecánica se derivan de los procesos de trabajo de metal, las técnicas de estado sólido se basan en la adhesión y en la deformación, las soldaduras de fusión están relacionadas con los procesos de fundición, y los procesos líquidos/sólidos recurren a las tecnologías de solidificación, adhesión y de polímeros. Sin embargo, existen diferencias sustanciales en la forma en que se llevan a cabo estos procesos, y tales diferencias serán el centro de nuestra atención. Donde sean aplicables, los procesos se identificarán por los nombres y abreviaciones dadas por la American Welding Society.

Los procesos de unión a menudo exigen una habilidad considerable. Los humos dañinos, los altos voltajes eléctricos y las altas temperaturas requieren protección del operador. Por estas razones, y también para mayor productividad, los esfuerzos tienen como objetivo minimizar la participación del operador, y se indicarán las oportunidades para la mecanización (control de la maquinaria por lazo abierto) y automatización real (control de lazo cerrado, sin o con inteligencia artificial).

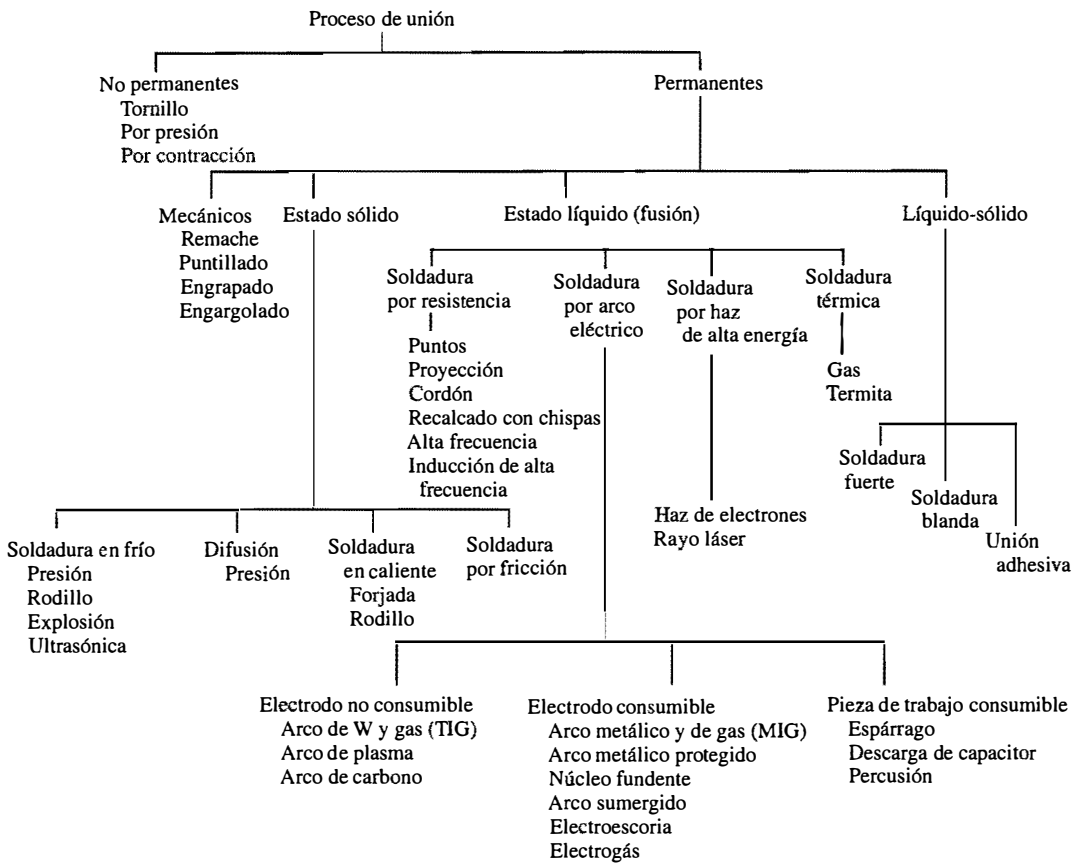


Figura 18-1 Clasificación de los procesos de unión.

18-2 UNIONES MECÁNICAS

Además de la unión semipermanente por tornillo, hay varias técnicas para establecer una unión por medios *mecánicos*.

1. El sujetador mecánico más común es el *remache*. Ya sea sólido o hueco (Fig. 18-2*a* y *b*), produce una unión sujetando las dos piezas entre las cabezas. Normalmente, una cabeza se forma en una operación previa; el remache resultante se avanza a través de agujeros previamente taladrados o punzonados, y la segunda cabeza es producida mediante recalcado, ya sea en frío o en caliente (para el recalcado, véase la sección 9-2-1). En un remache hueco, la cabeza se forma por medio de ensanchamiento, una operación relacionada con el embridado de un tubo (Fig. 10-34*c*). Los *remaches ciegos* son tubulares que se pueden insertar desde un lado. Incorporan su propia herramienta de formado, usualmente un mandril que es jalado por una herramienta especial para expandir el lado ciego (Fig. 18-2*c*). Luego, el vástago ranurado del mandril se rompe (remaches "pop").

El agujero representa una discontinuidad en la estructura y podría causar falla por fatiga. Así pues, a los bordes se les remueven las rebabas para eliminar los concentradores de esfuerzos; para aplicaciones más críticas, el agujero se escaria o, para inducir esfuerzos residuales de compresión, el agujero se expande ligeramente pasando un perno más grande a través de él. El remachado ha perdido su dominio en la construcción de edificios y en la manufactura de bastidores para automóviles, pero aún es de gran importancia. Por ejemplo, decenas de miles de uniones remachadas se realizan en muchos aeroplanos. Para mayor consistencia, el remachado se mecaniza o confía a robots.

2. Las láminas delgadas se pueden unir sin taladrado preliminar mediante *puntillado o engrapado* (Fig. 18-2*d*). El engrapado se utiliza ampliamente para sujetar lámina a un respaldo de madera.

3. Los *engargolados* (Fig. 18-2*e*) se producen por medio de una secuencia de dobleces en radios agudos (la mitad del espesor de la lámina) (Secc. 10-4). Los engargo-

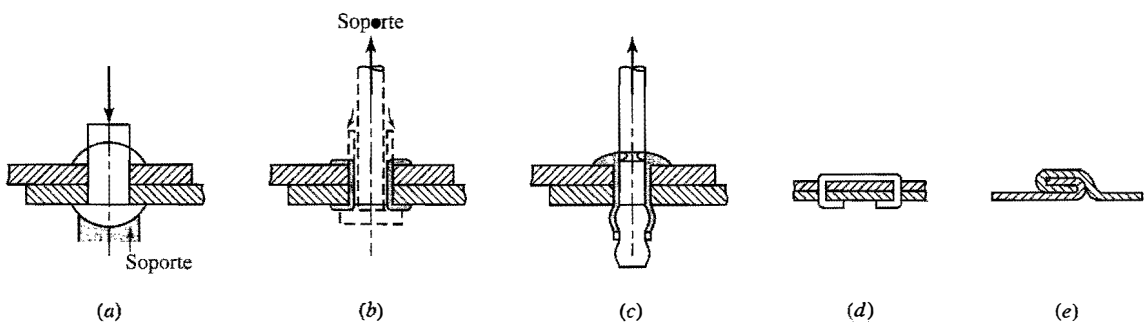
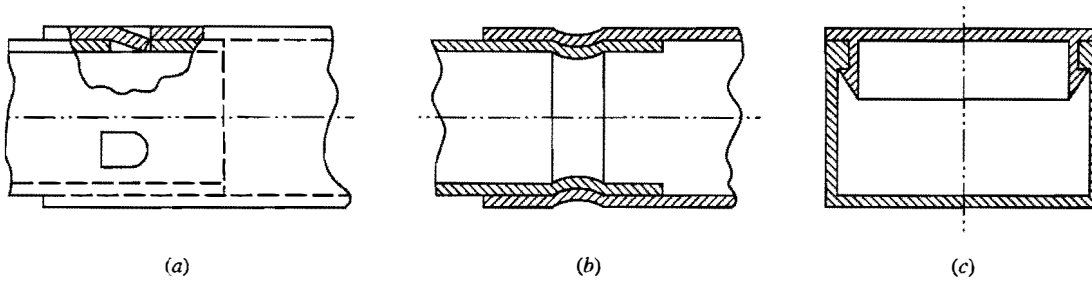


Figura 18-2 Uniones mecánicas permanentes: (a) remache, (b) remache tubular, (c) remache ciego, (d) grapa y (e) costura.



(*a*) (*b*) (*c*)

Figura 18-3 Uniones mecánicas permanentes: (a) lanceta saliente, (*b*) unión presionada y (*c*) unión elástica.

lados plegados se pueden hacer impermeables con o sin rellenos como adhesivos, sellos poliméricos o soldadura. Algunos engargolados se realizan a lo largo de líneas rectas, como los de los tubos de radiadores y el engargolado lateral de las latas de bebidas de tres piezas; otros se hacen a lo largo de los bordes de piezas circulares, como las tapas de latas (Fig. 10-35*d*), y entonces el proceso se relaciona con el embridado. Un *doblez* se forma cuando los bordes de una pieza se voltean sobre la otra (Fig. 10-35*a* y *b*).

4. Las uniones también se producen creando una interferencia mecánica con la ayuda de deformación plástica, como en el torcido o doblado de *salientes desplegadas* (Fig. 18-3*a*) y *engarzado* (Fig. 18-3*b*).

5. La *contracción* de una camisa en un núcleo es aplicable principalmente para piezas redondas. El esfuerzo de compresión necesario para mantener una unión permanente se consigue ya sea calentando la camisa (y/o enfriando el núcleo), por estampado (Fig. 9-24), o prensando en conjunto dos partes con un ajuste cónico de interferencia de ángulo bajo.

6. Las *uniones de ajuste elástico* se basan en la recuperación elástica de elementos en cantilever (Fig. 18-3*c*).

7. El *entalingado* forma el equivalente a un remache de lámina de metal. Se usan herramientas especiales para formar la unión en una sola carrera de la prensa.

Ejemplo 18-1

Las tapas de las cajuelas de automóviles se fabrican de una lámina exterior, formada por medio de estirado-embutido hasta la curvatura deseada (Fig. 10-18*b*) y un miembro rigidizador interior de perfil más profundo con varios cortes. Los dos se unen por doblado, normalmente con la inclusión de una cama de adhesivo que eleva la resistencia y contribuye a amortiguar el sonido. Una brida a 90° se forma en el lienzo exterior, el miembro interior se posiciona y la brida se voltea hacia abajo para lograr un sello hermético. Se imponen altas deformaciones de compresión lateral en las esquinas (esencialmente, una continuación del embridado por contracción, Fig. 10-35*b*); para evitar el arrugamiento, aquí se reduce el ancho del doblez. La misma técnica se emplea para unir los lienzos exteriores e interiores de las puertas.

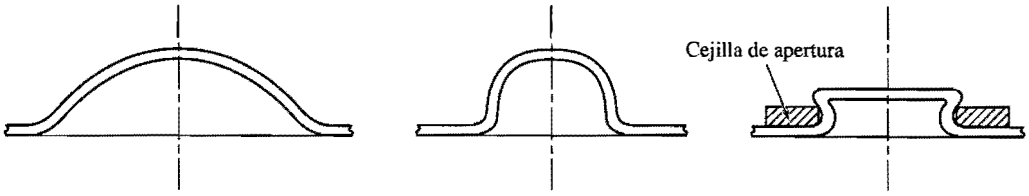


Figura del ejemplo 18-2

Ejemplo 18-2

Un proceso relacionado con el entalingado se usa para sujetar la cejilla de apertura a la tapa de las latas de bebidas hechas de aluminio. Primero, se estira un domo (*a*), se recoge para formar otro domo más profundo y de diámetro menor (*b*), la cejilla de apertura se coloca encima de él, y el domo se aplana (*c*) para formar una unión remachada integral a prueba de fugas.

Ejemplo 18-3

Las *aleaciones con memoria de forma* permiten la unión de piezas críticas como la tubería hidráulica de aleación de titanio en las aeronaves con propulsión a chorro. Las camisas de unión se fabrican de una aleación de Ni-Ti (de aproximadamente 52% Ni), que es austenítica a temperatura ambiente pero cambia a martensita de baja resistencia por debajo de 130°C. El acoplamiento se maquina en la condición austenítica con un diámetro interior menor que el diámetro exterior de los tubos. Posteriormente se enfría en nitrógeno líquido hasta el rango martensítico y se expande mecánicamente hasta un diámetro mayor que el exterior del tubo. Se almacena en este estado en nitrógeno líquido hasta su instalación. Una vez colocado en posición sobre la unión del tubo, se calienta hasta la temperatura ambiente, regresa a su diámetro original maquinado (memoria de forma) y establece una unión de contracción a prueba de fugas. [Fuente: *Adv. Mater. Proc.*, 1995 (4) 23-26.)

18-3 SOLDADURA DE ESTADO SÓLIDO

Al analizar la adhesión se mencionó que los enlaces interatómicos se establecen aproximando mutuamente los átomos de dos superficies (Secc. 4-9-2). Es absolutamente esencial que las superficies que se van a unir (también llamadas *superficies de empalme*) estén libres de contaminantes (óxidos, películas de gas adsorbido o residuos lubricantes) que podrían evitar la formación de enlaces interatómicos. Esta condición es difícil de satisfacer en la atmósfera de la Tierra (Fig. 4-21), por lo que se deben tomar medidas para neutralizar los efectos de las películas superficiales:

1. El *movimiento relativo* entre las superficies ayuda a romper las películas superficiales. Hacer rugosa la superficie con cepillado de alambre es útil porque, al realizar la unión, los picos se deforman.

2. La deformación plástica de los cuerpos en contacto causa un crecimiento, *extensión de la superficie interfacial* y, si las películas superficiales son incapaces de

seguirla, se exponen superficies nuevas y frescas que luego forman soldaduras de estado sólido.

3. Aunque en teoría no se requiere presión para unir superficies perfectamente acopladas y limpias, en la práctica es necesaria una *presión normal* para asegurar la adaptación de las superficies en contacto y para romper las películas superficiales.

4. El *calor* no es una parte esencial del proceso básico de unión, pero el ablandamiento de los materiales promueve el contacto íntimo y la difusión de átomos ayuda a lograrla. Sin embargo, la difusión es inaceptable cuando dos metales disímiles forman compuestos intermetálicos que vuelven frágil a la unión.

En principio, se pueden unir dos materiales cualesquiera y, en efecto, la unión de estado sólido a menudo se aplica cuando otras técnicas fallan. No obstante, las mejores uniones se obtienen entre metales cuando existe registro atómico (es decir, los átomos de dos componentes están similarmente espaciados y cristalizan en la misma estructura de red). Esto significa que los metales se unen mejor con ellos mismos y con otros, con los que forman soluciones sólidas.

18-3-1 Soldadura en frío (CW)

El término *soldadura en frío* (CW) se usa ampliamente para describir el procesamiento a temperatura ambiente.

1. La *soldadura de traslapo* se basa en una expansión de 50 a 90% de las superficies cuando se introducen penetradores en la lámina que se va a unir (Fig. 18-4*a*). Los hombros en los penetradores limitan la distorsión y promueven la soldadura.

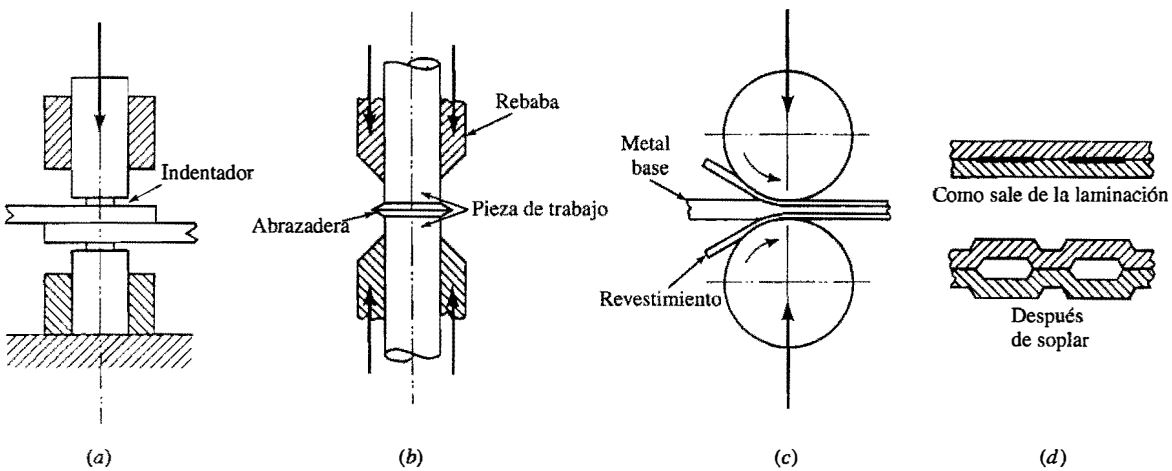


Figura 18-4 Las piezas se pueden unir en estado sólido a través de: (*a*) soldadura de traslapo en frío, (*b*) soldadura a tope y (*c*) unión por rodillos. (*d*) Se pueden crear pasajes inflando los ensambles unidos con rodillos.

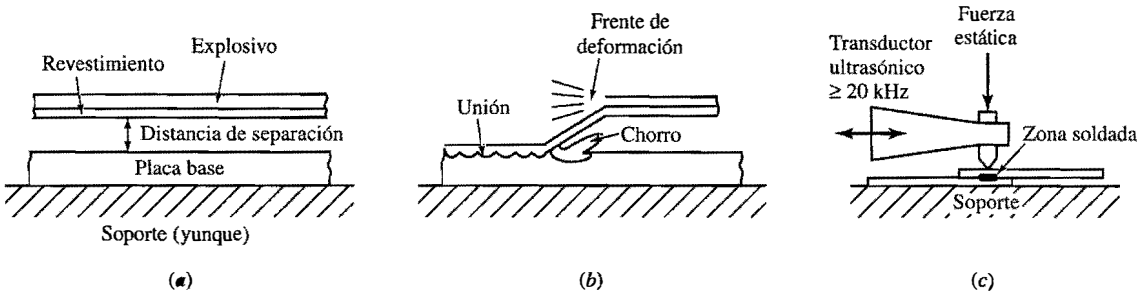


Figura 18-5 Las uniones de estado sólido se establecen en (a) la soldadura por explosión al (*b*) mover la lámina de revestimiento hacia el material base y en (c) la soldadura ultrasónica por un movimiento de frotamiento en la interfase.

2. La *soldadura a tope* de alambres establece la unión recalcando los extremos del alambre para causar expansión de la superficie (Fig. 18-4*b*). La soldadura se refuerza aún más cuando se da un giro.

3. La *unión con rodillos* o *soldadura con rodillos* (ROW) (Fig. 18-4*c*) es altamente efectiva porque las grandes reducciones (de 50 a 80% en una sola pasada) resultan en gran extensión y rompimiento de las películas superficiales. La unión se puede evitar localmente depositando un agente de separación (*aislamiento*), como grafito o un cerámico, en un patrón predeterminado. Luego, la inflación por aire o fluido presurizado produce piezas como las placas del evaporador del refrigerador (Fig. 18-4*d*).

4. En la *soldadura por explosión* (EXW), la unión se establece a través de la deformación intensa de la interfase. Una esterilla explosiva se coloca encima de la lámina o placa de revestimiento (la *placa móvil*), mantenida a una distancia crítica de la superficie del material base (Fig. 18-5*a*). Cuando el explosivo es detonado desde un extremo, la presión desarrollada acelera la placa móvil en un ángulo respecto a la superficie. Bajo la intensa presión, se forma un chorro fluido que expulsa los contaminantes superficiales; el flujo turbulento resulta en la formación de remolinos agudos o vórtices en la interfase (Fig. 18-5*b*). En muchos casos no hay fusión, pero la combinación de la adhesión y del entrelazado mecánico asegura una unión fuerte. La técnica se utiliza para revestir placas grandes para la industria química y también para la expansión *in situ* de tubos para formar los cabezales de calderas y condensadores tubulares.

5. En la *soldadura ultrasónica* (USW) se induce un movimiento relativo de la interfase mediante vibración tangencial (Fig. 18-5*c*). No hay deformación extensa, y el proceso es adecuado para la soldadura de traslapo de hojas y de instrumentos delicados y componentes electrónicos. Cuando la punta de soldadura es reemplazada por un rodillo, se pueden producir soldaduras de costura.

Ejemplo 18-4

Al sustituir a las monedas de veinticinco y diez centavos de dólar de aleación de plata, el níquel fue inaceptable en Estados Unidos, donde las máquinas de venta comprueban las propiedades magnéticas. Por lo tanto, un núcleo de cobre se reviste con cuproníquel (75Cu-25Ni), dando la

blancura deseada y falta de ferromagnetismo. Un emparedado de 7.5 mm de espesor se lamina hasta 1.36 mm; la extensión de la superficie, junto con la solubilidad del níquel en el cobre (Fig. 6-4), asegura un enlace permanente. Calcule la proporción de la nueva superficie atómicamente limpia, suponiendo que las películas superficiales preexistentes no se expanden.

De la invariabilidad del volumen (ecuación 4-2),

$$V = h_0 A_0 = h_1 A_1$$

$h_0/h_1 = A_1/A_0 = 7.5/1.36 = 5.515$, así la nueva superficie ocupa $(5.515 - 1)/(5.515 = 81.9\%$ de la interfase.

18-3-2 Soldadura por difusión

Generalmente, se obtiene mejor unión cuando la temperatura es suficientemente alta para asegurar la difusión, típicamente por arriba de 0.5 T_m (Secc. 8-1-6; las temperaturas comunes se dan en la tablas 8-2 y 8-3).

La *soldadura por difusión* (DFW) no es nueva; por siglos los joyeros han rellenado oro colocando hojas de recubrimiento sobre un núcleo de plata o de cobre y comprimiendo el laminado con una pesa (Fig. 18-6*a*). Al mantenerlo en un horno por un tiempo prolongado, se obtiene una unión permanente. La presión requerida también se puede generar en una prensa o restringiendo el ensamble con un aditamento hecho de un material de menor dilatación (frecuentemente, molibdeno). También se usa el término *soldadura en caliente por presión* (HPW).

En la década de los 70, la técnica se extendió a la construcción de fuselajes. La deformación simultánea ayuda en gran medida al desarrollo de una unión sólida, por lo tanto, la *soldadura por difusión combinada con el formado superplástico* (Fig. 18-6*d*) ha demostrado ser muy exitosa. Usando dos, tres o cuatro láminas, se imprimen patrones con un aislamiento de nitruro de boro. El ensamble se coloca en una caja evacuada

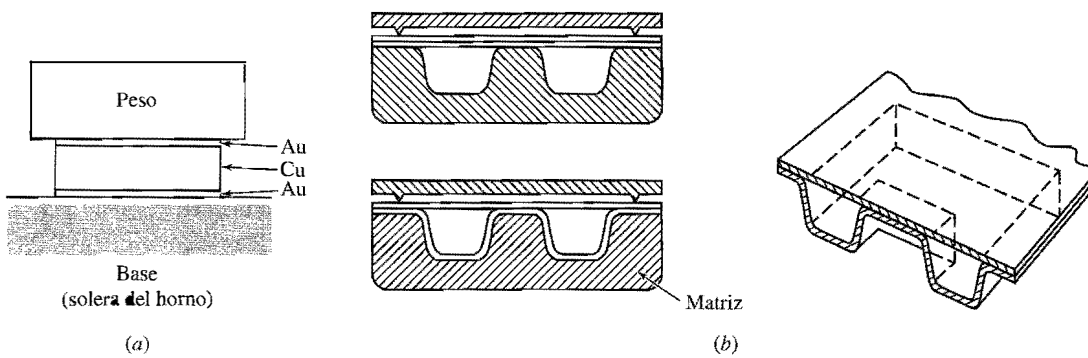


Figura 18-6 Lo unión o temperatura elevada es posible sin deformación sustanciol en (a) la soldadura por difusión, que puede ser (b) combinada con el formado superplástico paro fabricar piezas estructurales complejos.

(retorta) mantenida en una prensa, y se forman superficies integrales mientras son sopladas las cavidades.

Como el titanio disuelve sus óxidos (Secc. 11-4-1) y las aleaciones como Ti6Al-4V tienen el pequeño tamaño de grano necesario para el formado superplástico (Secc. 8-1-6, Fig. 8-12) aun sin procesamiento especial, las aleaciones de titanio son naturales para la técnica. Es factible la consolidación de piezas a gran escala. Por ejemplo, en las aeronaves de alto rendimiento como los aeroplanos caza supersónicos, el fuselaje se construye de un revestimiento delgado reforzado con nervaduras de complejidad considerable. Convencionalmente, las piezas de lámina metálica, las extrusiones y las placas con cavidades fresadas se unen con miles de remaches. La unión por difusión con formado superplástico reduce el número de piezas, la mano de obra, el tiempo de entrega y el costo. Al aplicar las técnicas a las aleaciones de aluminio, la deformación es vital para romper el óxido estable y frágil.

La soldadura por difusión también se aplica a la manufactura de compuestos de matriz metálica (por ejemplo, titanio o aluminio reforzado con fibra de boro). Cuando la unión no ocurra debido a la falta de solubilidad o resulte en la formación de un compuesto intermetálico frágil, se pueden usar capas intercaladas que sean mutuamente solubles, en forma de hojas o láminas delgadas. Por ejemplo, las superaleaciones se unen después de electrochapar con una aleación de Ni-Co.

18-3-3 Soldadura en caliente

En términos generales, el concepto *soldadura en caliente* describe la soldadura por deformación en el rango de temperatura de trabajo en caliente.

1. La *soldadura forjada* (FOW) se refiere al proceso de soldadura industrial más antiguo. El enlace se crea por medio de la deformación local sustancial de la unión. Las piezas de trabajo calientes y preformadas, usualmente de hierro o acero, se forjan juntas para expulsar los óxidos, la escoria y los contaminantes y para asegurar el enlace interatómico (Fig. 18-7*a*). La técnica se empleaba no sólo para unir (por ejemplo, forjado de eslabones de cadena), sino también para la soldadura de tubos y para formar, capa por capa, espadas medievales e incluso objetos muy grandes, como anclas. Es posible la soldadura forjada en que los extremos de las piezas de trabajo se prensan juntos axialmente (*soldadura a tope*), pero la calidad de la junta tiende a ser pobre.

2. En las variantes más recientes del proceso, el calor es proporcionado a través del *calentamiento por inducción* para minimizar la oxidación (Fig. 18-7*b*). Mucho menos deformación es suficiente, por lo tanto, es practicable la soldadura a tope de las piezas de trabajo.

3. El calor también se puede generar pasando una corriente a través de las caras comprimidas (Fig. 18-7*c*). Actualmente, la *soldadura eléctrica a tope* se ha reemplazado en gran medida por la soldadura a tope por chispas (Secc. 18-5).

4. La *unión en caliente por rodillos* (*soldadura laminada*, ROW, la versión a alta temperatura de la Fig. 18-4*c*) se utiliza ampliamente para crear materiales compuestos de bajo costo o alto rendimiento. Así, el Alclad combina la resistencia a la corrosión de

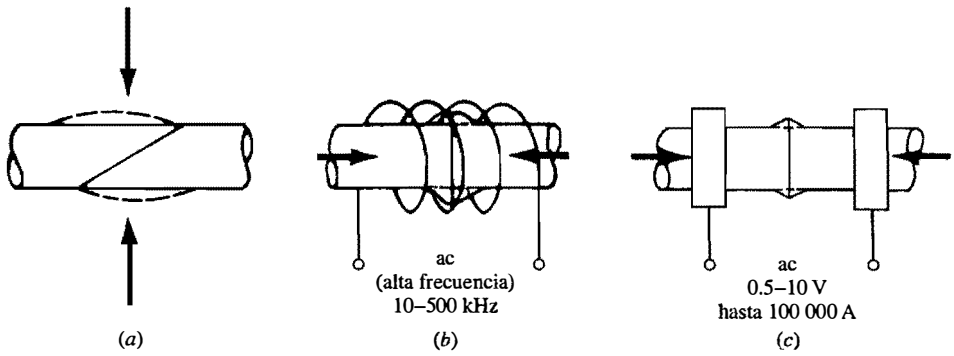


Figura 18-7 La unión de estado sólido a temperatura elevada se obtiene en la soldadura (a) forjada, (*b*) por inducción y (*c*) eléctrica a tope.

un revestimiento de aluminio puro con la alta resistencia de un núcleo de aluminio endurecido por precipitación. Se emplea acero inoxidable para revestir acero dulce para protección contra la corrosión, y las aleaciones de diferente coeficiente de dilatación térmica se unen para crear *cintas bimetálicas* para termostatos. El laminado, que consiste de una placa base y de láminas de cubierta, es encerrado y evacuado si se debe evitar la oxidación.

18-3-4 Soldadura por fricción (FRW)

El trabajo de fricción generado cuando dos cuerpos se deslizan uno sobre otro se transforma en calor; cuando la rapidez del deslizamiento es alta y el calor es contenido en una zona angosta, ocurre la soldadura.

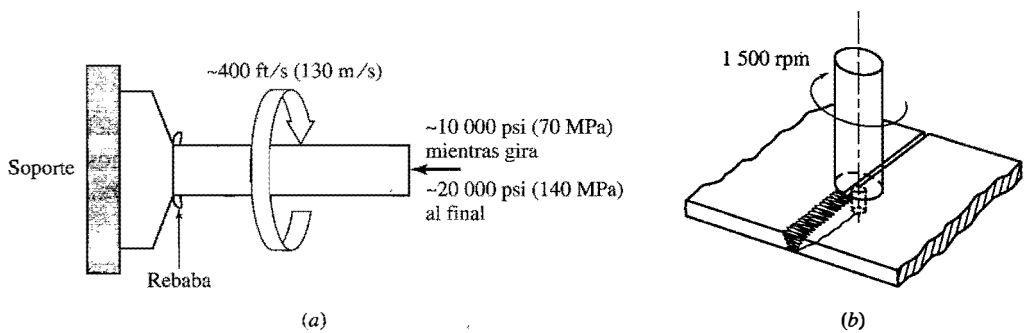


Figura 18-8 (a) El calor se genera en la soldadura por fricción por la rotación de las piezas de trabajo una contra la otra, y el enlace se establece por recalcado. (*b*) Una herramienta rotatoria genera calor en la soldadura por fricción y agitación.

En la FRW de *accionamiento continuo* (Fig. 18-8*a*), una pieza se sujeta firmemente mientras la otra (usualmente de simetría axial) es girada bajo la aplicación simultánea de presión axial. La temperatura se incrementa, las zonas soldadas parcialmente formadas se cortan, las películas superficiales se rompen; repentinamente, la rotación se detiene y una fuerza adicional de recalcado es aplicada cuando toda la superficie se suelda. Algo del material suavizado es expulsado como rebaba, pero no está completamente claro si en realidad ocurre la fusión. La zona calentada es muy delgada; así que los metales disímiles se unen fácilmente. En la FRW de *accionamiento por inercia*, la rotación es impartida por un volante de inercia, cuya energía se calcula de manera que la soldadura sea completada cuando la rotación se detiene.

Ejemplo 18-5

La FRW de accionamiento continuo se realiza en talleres cautivos de fabricantes automotores y de artículos electrodomésticos, así como en talleres de trabajos especializados. Por ejemplo, los cables de aluminio de las líneas eléctricas de distribución subterráneas se deben unir a conmutadores de cobre. Para evitar la corrosión, barriles de aluminio extruidos por impacto se engarzan en el cable y luego estos bloques terminales de cobre, cabeceados en frío, se sueldan por fricción a los barriles. El proceso también se puede usar para aumentar la complejidad de la forma: los extremos de los vástagos de émbolos se sujetan a vástagos de émbolos de cilindros hidráulicos; dos blancos forjados para engrane se unen sin perder sus propiedades; tubos de pared gruesa se sujetan a las vigas de eje de remolques para transporte. (Fuente J.R. Huber, ARD Industries Ltd., Cambridge, Ontario.)

La *soldadura por fricción y agitación* es adecuada para unir láminas y placas. Una herramienta rotatoria penetra en el área de la unión y, en su viaje a lo largo de la costura, genera suficiente calor para que el metal fluya plásticamente para llenarla (Fig. 18-8*b*).

18-4 SOLDADURA POR FUSIÓN

En la gran mayoría de las aplicaciones, el enlace interatómico se establece por fusión. Cuando los materiales de la pieza de trabajo (*metal base*) y el *metal de aporte* (si es que se usa) tienen composiciones y puntos de fusión similares pero no necesariamente idénticos, al proceso se le denomina *soldadura por fusión* o simplemente *soldadura.*

La soldadura está muy relacionada con los procesos de fundición. Se suministra calor para fundir el metal base y el de aporte. La fusión es contenida físicamente en la zona de fusión donde, por medio de su contacto con el metal base circundante de alta conductividad térmica, se enfría rápidamente (típicamente, a decenas de cientos de grados por segundo). De esta manera, la rapidez de enfriamiento está entre la que predomina en la fundición en molde permanente (Secc. 7-5-6) y en la atomización (Secc. 11-2-1); el control adecuado requiere una familiaridad completa con la metalurgia de no equilibrio (Secc. 6-1-6). Aquí se debe hacer un análisis rápido de los principios, basados en gran parte en los conceptos discutidos en el capítulo 6, que sería útil repasar en este

momento. No obstante, es indispensable cierto conocimiento de los efectos del material si se van a evaluar las capacidades y limitaciones de los distintos procesos.

18-4-1 Unión por fusión

Una unión por fusión está muy lejos de ser homogénea. El grado de no homogeneidad y de complejidad se incrementa desde los metales puros hasta las aleaciones de fases múltiples y también es una función de la entrada de calor por distancia unitaria. Una mayor intensidad de calor proporciona una penetración más profunda, una zona caliente más concentrada, menos cambio en la estructura metalúrgica y esfuerzos menores en la soldadura. El análisis siguiente es, por lo tanto, generalizado y no necesariamente se aplica a todas las tasas de entrada de calor.

Materiales de una fase Una sección a través de la unión en un metal puro (Fig. 18-9), como aluminio o cobre, soldada con una varilla de composición idéntica, demuestra que el calor aplicado no sólo ha fundido la varilla de soldadura sino también un tanto del material base para formar el *cordón de soldadura* (o simplemente la *soldadura*). El material base adyacente al límite de la fusión se expuso a altas temperaturas y las propiedades y la estructura son cambiadas dentro de esta *zona afectada por el calor.*

Si el material de la pieza de trabajo se trabajó en frío originalmente y por lo tanto era de grano altamente alargado, la zona afectada por el calor presentará recristaliza-

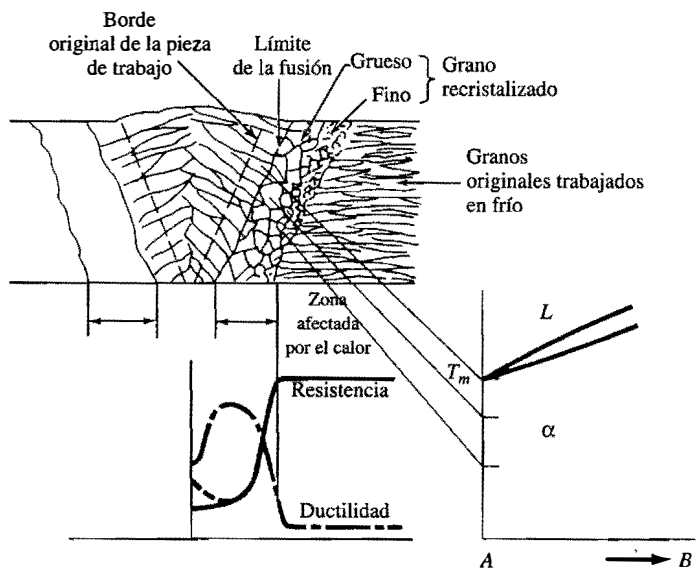


Figura 18-9 La fusión de un metal puro o de una aleación de solución sólida trabajados en frío resulta en disminución de la resistencia en la zona afectada por el calor.

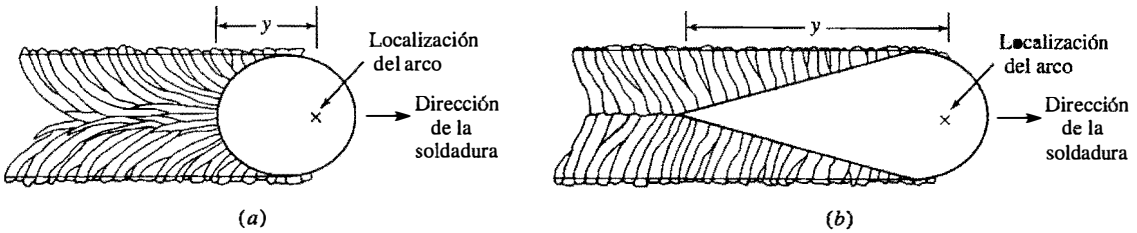


Figura 18-10 Al hacer soldaduras en línea, la entrada de calor por unidad de longitud determina la forma del charco de soldadura y la estructura del cordón soldado solidificado: (a) a velocidades de viaje bajas los granos están entretejidos, pero (*b*) a altas velocidades a menudo se forma un plano central débil si están presentes constituyentes de bajo punto de fusión.

ción. Para un trabajo en frío dado, el tamaño de grano aumenta con mayor tiempo a alta temperatura (Fig. 8-10); de esta forma, los granos muy gruesos que se encuentran en el límite de la fusión cambian gradualmente a finos, hasta que en el borde la zona afectado por el calor sólo es evidente la recristalización parcial. Si la pieza de trabajo era de material recocido, la entrada de calor adicional durante la soldadura sólo engruesa los granos. En cualquier caso, una estructura de grano grueso de menor resistencia (Secc. 6-3-6) existe en el límite de la fusión. La solidificación comienza en este límite a través del *crecimiento epitaxial*, es decir, por la deposición de átomos en la misma orientación cristalina que la de los cristales superficiales (del griego *epi* = en, *teinen* = arreglados y eje). Esto conduce al desarrollo de granos columnares gruesos en el material de la soldadura.

Visto de arriba, hay un charco de soldadura en el punto de entrada máxima de calor (Fig. 18-10). Cuando se hace una soldadura en línea, la fuente de calor se mueve a una velocidad de viaje fija. En un metal puro o en una aleación diluida, a baja velocidad del viaje, los granos que se solidifican empiezan a seguir la fuente de calor, y el centro del cordón de soldadura a menudo tiene granos independientemente nucleados, en especial en presencia de agentes de nucleación (Fig. 18-10*a*). A altas velocidades de viaje, el charco de la soldadura se torna alargado y la solidificación comienza casi perpendicular al límite de la fusión hacia el centro (Fig. 18-10*b*). Si hay constituyentes de bajo punto de fusión, se segregan en los límites de los granos fundidos y puede presentarse el agrietamiento en caliente.

Factores complejos entran en los materiales altamente aleados. Se forman dendritas en el metal fundido, al igual que lo hacen en una fundición (Secc. 6-1-2) pero, como resultado del enfriamiento más rápido, el espaciamiento de los brazos secundarios de las dendritas es menor. Además, la nucleación de nuevos granos con frecuencia conduce a una transición columnar o equiaxial en el centro del cordón. Como la fusión ocurre en el rango de temperatura $T_L - T_S$ (Fig. 6.4), habrá una zona parcialmente fundida y esponjosa en el límite de la fusión. Las concentraciones menores de elementos de aleación o contaminantes de bajo punto de fusión pueden migrar a este límite para causar fragilidad en caliente y agrietamiento durante el enfriamiento.

Materiales de dos fases La mayoría de las aleaciones técnicamente importantes tiene una estructura de dos fases o de fases múltiples, y su adecuación para la soldadura

está determinada por los eventos que ocurren tanto en el estado líquido como en el sólido.

1. Los materiales de composición eutéctica representan poco problema debido a su modo favorable de solidificación (Secc. 6-1-3).

2. Las aleaciones de endurecimiento por precipitación (Secc. 6-4-2) se pueden soldar fácilmente en el estado recocido; si su rango de congelamiento es corto, la mayoría de los efectos de la soldadura se desalojan en el subsecuente tratamiento por solución y envejecimiento de toda la soldadura. Si ésta es demasiado grande para ello, la soldadura por fusión es posible ya sea en la condición de solución tratada o en la envejecida, pero entonces las ventajas de la resistencia del tratamiento térmico se pierden en la zona de la soldadura (Fig. 18-11). La soldadura en sí puede contener el constituyente intermetálico en forma gruesa, que resulta en baja resistencia y ductilidad. La zona adyacente afectada por el calor se calienta y enfría rápidamente; de esta manera, está en la condición tratada por solución, aunque el calor conducido desde la zona de la soldadura durante el enfriamiento puede causar sobreenvejecimiento. Por lo tanto, la zona afectada por el calor ha sido totalmente tratada térmicamente pero su grano es grueso, con alta resistencia y moderada ductilidad. Más lejos, la estructura original se encuentra sobreenvejecida y suave. Además de la baja resistencia de la unión, la composición localmente variable también puede producir corrosión, por ejemplo, en las aleaciones de aluminio y magnesio. Algunas veces una solución es utilizar una varilla de aporte diferente para evitar el agrietamiento por calor o problemas de corrosión.

3. Las transformaciones de fase de estado sólido originan cambios complejos. Tomando como ejemplo un acero al medio carbono en estado recocido (Fig. 18-12), el metal base tiene una microestructura consistente en colonias de perlita que alternan con granos de ferrita. La soldadura en sí tiene la estructura usual gruesa y fundida. Próxima a ésta, el material se calienta profundamente dentro del rango de temperatura austenítica y luego se enfría, provocando en granos gruesos. Al disminuir la temperatura, los granos de la austenita se vuelven más finos; así, normalmente se encuentran ferrita y perlita de grano más fino en la estructura transformada, aunque la alta rapidez de enfriamiento puede producir bainita o martensita. El borde de la zona afectada por el calor es calentado un poco por encima de la temperatura eutectoide. La elevada rapidez de enfriamiento convertirá cualquier austenita en martensita y puede originar una gran reducción de la ductilidad. Con mayor contenido de carbono (por encima de aproximadamente 0.5%), inevitablemente se formará la martensita, como también ocurre en los aceros aleados.

Materiales disímiles La situación se complica aún más cuando se emplean dos o más materiales disímiles, ya sea en la pieza de trabajo o en el material de aporte. Con frecuencia éste es el caso, debido a que los materiales de aporte desiguales facilitan la obtención de soldaduras libres de grietas. La historia de calentamiento y enfriamiento se complica debido a los efectos de la aleación, mientras que los eventos en la zona de soldadura se determinan por medio de los diagramas de equilibrio relacionados con ambos materiales. La solidificación no equilibrada complica todavía más el asunto.

Como se podría esperar, las aleaciones que forman soluciones sólidas presentan pocos problemas. Las eutécticas tienden a ser más frágiles, aunque son favorables cuando

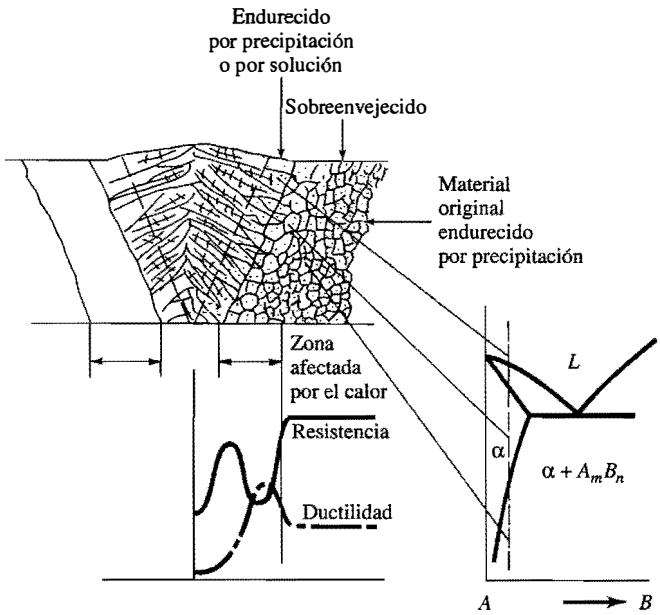


Figura 18-11 Al soldar un material endurecido por precipitación, el cordón de soldadura es más débil y menos dúctil.

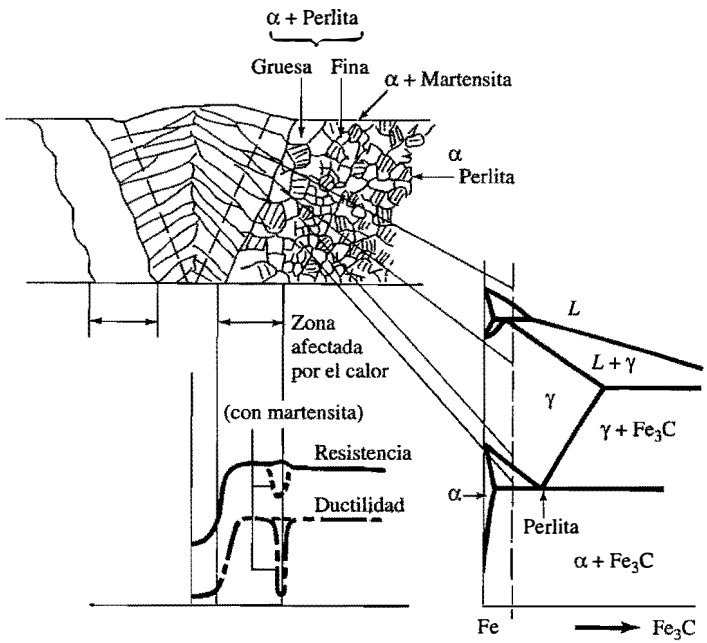


Figura 18-12 El calentamiento hasta el rango de temperatura austenítica puede conducir a la formación de martensita y resultar en pérdida de ductilidad al soldar aceros al carbono.

ambas fases del eutéctico son dúctiles. Los compuestos intermetálicos invariablemente fragilizan la estructura hasta inutilizarla; así por ejemplo, el cobre no se puede unir con el hierro. Sin embargo, es posible usar una interfase mutuamente compatible, en este caso níquel, que forma soluciones sólidas con el cobre y con el hierro.

En muchos casos, la diferencia entre los puntos de fusión es muy amplia, de manera que el metal base no se funde, por lo que se acostumbra clasificar al proceso como soldadura fuerte o suave (Secc. 18-8).

18-4-2 Soldabilidad y calidad de la soldadura

A partir de lo anterior, es obvio que el término *soldabilidad* denota un grupo extremadamente complejo de propiedades tecnológicas y también es una función del proceso.

Defectos en la soldadura Si no se cumple alguno de los requerimientos para producir una buena unión, pueden surgir varios defectos. Éstos pueden existir en soldaduras de cualquier geometría y origen, pero para propósitos ilustrativos se hace referencia a una soldadura por fusión con metal de aporte (Fig. 18-13*a*).

1. La soldadura por fusión es un proceso de fusión y se debe controlar como corresponde (Secc. 7-4). La temperatura de fusión determina, junto con el calor específico y el calor latente de fusión, la cantidad de calor que es necesario añadir. La alta conductividad térmica de los metales base permite que el calor se disipe y por lo tanto requiere de una rapidez mayor de entrada de calor y conduce a un enfriamiento más rápido. Para cualquier material base, la rapidez de entrada de calor (usualmente expresada como entrada de calor por longitud unitaria) se debe acoplar con el espesor de las piezas de trabajo, con la rapidez de deposición del metal soldado y con la velocidad del viaje (la velocidad de movimiento a lo largo del cordón de soldadura). La adición insuficiente de calor causa *falta de fusión* y, en secciones transversales gruesas, *penetración incompleta* (Fig. 18-13*b*); entonces, el espacio restante se convierte en una grieta incipiente. La rapidez deficiente de la deposición de metal soldado provoca falta de llenado. La

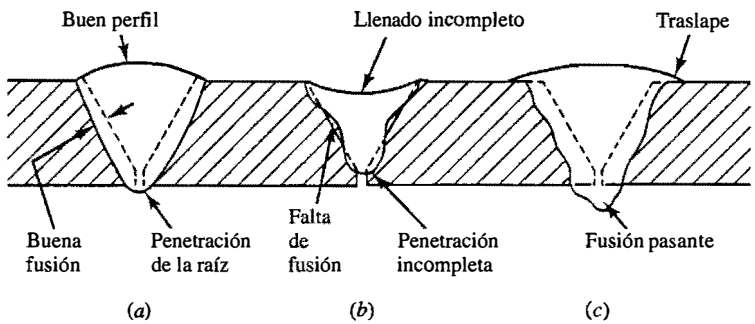


Figura 18-13 Las soldaduras por fusión con metal de aporte pueden mostrar varias características: (a) un cordón bien formado; (b) falta de fusión, falta de penetración, llenado incompleto; o (c) fusión pasante, traslape.

entrada de calor excesiva puede originar *quemado* (agujerado del material) y la rapidez de deposición alta resulta en el *traslape* (Fig. 18-13*c*), cuyos bordes dan un efecto de muesca con reducida resistencia a la fatiga.

2. Los contaminantes superficiales, incluyendo óxidos, aceites, suciedad, pintura, chapados de metal y recubrimientos incompatibles con el material de la pieza de trabajo, provocan *falta de enlace* o conducen a *porosidad por gas* y se deben mantener alejadas por medio de la preparación mecánica y/o química de las superficies.

3. Las reacciones indeseables con los contaminantes superficiales y con la atmósfera se evitan sellando la zona de fusión con un vacío, una atmósfera protectora (inerte) o una escoria. Igual que en la fusión para fundición, la escoria se forma al disolver óxidos en un fundente. Se debe tener cuidado de minimizar el *atrampamiento de escoria*, que reduce la ductilidad de la soldadura.

4. Los gases liberados o formados durante la soldadura (por ejemplo, CO) pueden producir porosidad, que debilita la unión y actúa como un concentrador de esfuerzos. La alta fluidez de la fusión es útil al permitir que la escoria y los gases se eleven a la superficie. Particularmente peligroso es el hidrógeno que se origina de la humedad atmosférica o de un fundente húmedo. Cuando se combina en forma molecular, causa porosidad en las aleaciones de aluminio. En la forma atómica se difunde en las puntas de las grietas y provoca *fragilidad por hidrógeno* de aceros en que se forma martensita al enfriarse.

5. Las *grietas de solidificación* aparecen bajo la influencia de esfuerzos en la soldadura cuando un líquido de bajo punto de fusión es expulsado durante la solidificación dendrítica. Las *grietas de licuación* a lo largo de las fronteras de grano se deben a la segregación de estado sólido de elementos de bajo punto de fusión.

6. La contracción por solidificación junto con la contracción sólida impone esfuerzos internos de tensión en la estructura (Fig. 18-14) y puede originar *distorsión* y *agrietamiento*. El problema se magnifica cuando la estructura no es libre de contraerse, en otras palabras, cuando se imponen restricciones mecánicas. Las propiedades de los materiales base y de aporte son importantes. La alta dilatación térmica resulta en mayor distorsión y en esfuerzos residuales. El peligro de agrietamiento es mayor en las aleaciones que presentan una composición que proporciona el máximo rango de congelamiento en un sistema. El problema se puede aliviar con un material de aporte menos aleado y más dúctil que reduzca la fragilidad por calor (o un material de aporte más aleado que evite el máximo rango de congelamiento). Con frecuencia, el diseño se basa en el enfoque de la mecánica de la fractura (Secc. 4-2) y el tamaño permisible del defecto se determina experimental o teóricamente. Los esfuerzos residuales también pueden conducir al agrietamiento de corrosión por esfuerzo.

7. Las transformaciones metalúrgicas, analizadas anteriormente, son de gran importancia, especialmente cuando provocan a la formación de fases frágiles como la martensita. Entonces, es esencial precalentar el metal base. El material de la soldadura se somete a un tratamiento térmico adicional si es depositado en más de una pasada (*soldadura de pasadas múltiples*).

8. El espesor absoluto y relativo de las partes que se van a unir y el diseño de la unión tienen una influencia poderosa sobre el calentamiento y en el enfriamiento, y por consiguiente sobre la soldabilidad.

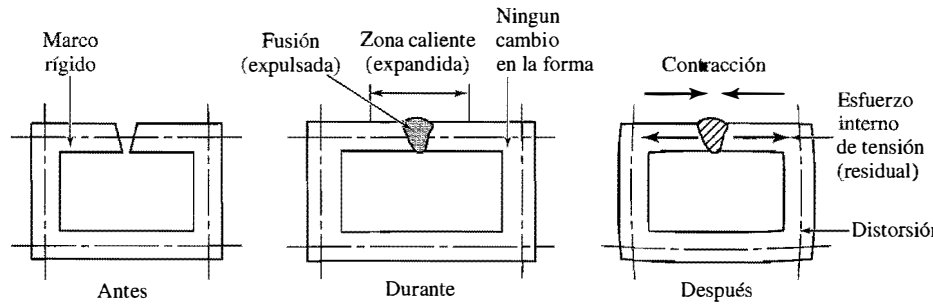


Figura 18-14 La expansión durante la soldadura seguida por contracción al enfriamiento puede provocar distorsión y esfuerzos residuales.

Tratamiento del metal Algunas de las dificultades antes mencionadas se pueden salvar por medio de diversas medidas:

1. El *precalentamiento* de la zona soldada o de toda la estructura reduce la entrada de energía necesaria para completar la soldadura (importante para materiales de alta difusividad, como el aluminio o el cobre); reduce la rapidez de enfriamiento en la soldadura y en la zona afectada por el calor (permitiendo la soldadura de aceros endurecibles y de otros materiales en que el enfriamiento rápido produce fases frágiles); ayuda a dispersar el hidrógeno, y reduce la contracción diferencial, la distorsión y los esfuerzos residuales.

2. El *granallado* (martillado o laminado) del cordón de soldadura mejora la resistencia de las soldaduras. En la soldadura de pasadas múltiples, el granallado entre pasadas remueve la escoria que se podría atrapar e induce la recristalización de las primeras capas (sin embargo, la última pasada no se granalla porque se perdería la ductilidad).

3. El *tratamiento térmico posterior a la soldadura* de toda la estructura a menudo es esencial por varias razones:

a. El recocido de alivio de esfuerzos (Secc. 6-4-1) reduce los esfuerzos residuales a niveles aceptables, haciendo a la estructura dimensionalmente estable y no susceptible al agrietamiento debido a la corrosión por esfuerzos. Templa la martensita y elimina el peligro de agrietamiento en frío en aceros. De esta manera, también tiende a incrementar la ductilidad y la resistencia a la fatiga con sólo una pérdida menor de resistencia. No obstante, puede ocasionar sobreenvejecimiento en materiales endurecidos por precipitación.

b. Normalizando el acero (Secc. 6-4-3) se elimina la mayoría de los efectos indeseables de la soldadura. La recristalización de la soldadura y del material base en el rango de temperatura austenítica es seguida por un enfriamiento controlado para dar una estructura consistente de ferrita y perlita.

c. El tratamiento térmico completo (temple y revenido de aceros, tratamiento por solución y envejecimiento de aleaciones endurecibles por precipitación) proporciona las mejores propiedades en toda la estructura, pero puede originar distorsión.

d. Un tratamiento de envejecimiento de un material de endurecimiento por precipitación es suficiente si el cordón de soldadura termina en condición de solución, debido a una rapidez de enfriamiento muy elevada (como en la soldadura por haz de electrones).

El control de la calidad es vital en todos los procesos de soldadura. Las técnicas destructivas son útiles para establecer los parámetros del proceso, pero la calidad de la producción suele ser controlada sólo mediante inspección no destructiva. La inspección visual siempre es obligatoria y se complementa con todo el arsenal de técnicas NDT (Secc. 4-8). Las soldaduras más críticas con frecuencia se inspeccionan al 100% por radiografía.

Factores de proceso El calor necesario para la fusión puede suministrarse por medio de diversas fuentes de calor. La forma de la zona de la soldadura y el ancho de la zona afectada por el calor dependen de la intensidad de esta fuente de calor. Para una potencia dada, la intensidad del calor se eleva con el decremento en el tamaño de la fuente de calor, y su orden de magnitud varía. A una baja intensidad de calor, el tiempo requerido para alcanzar la temperatura de fusión es largo, el calor se pierde en el entorno y gran parte del calor que alcanza la pieza de trabajo se disipa en el metal circundante. Así, en la soldadura con oxígeno y gas combustible (con una intensidad calorífica de 1 a 10 W/mm^2) sólo 10% del calor alcanza al metal y sólo un quinto de éste realiza la fusión real. En consecuencia, la eficiencia es baja, la zona soldada es varias veces más ancha que su profundidad y la zona afectada por el calor es amplia. A intensidades caloríficas entre 10 y 1 000 W/mm^2, típicas de los procesos de la soldadura con arco eléctrico, más o menos la mitad del calor total alcanza el metal y cerca de 40% de éste se usa para fundirlo; el charco de soldadura y la zona afectada por el calor tienen la forma que se muestra en las figuras 18-9 a la 18-12. La alta intensidad energética (10^3 a 10^5 W/mm^2) del rayo láser y de la soldadura por EB proporcionan alta eficiencia y el charco de soldadura en forma de *agujero de cerradura*, cilíndrico y profundo, es varias veces más hondo que ancho. Como la tasa de calentamiento es tan elevada, los cambios metalúrgicos ocurren principalmente durante el enfriamiento, y la zona afectada por el calor equivale a prácticamente el ancho del haz.

En muchos procesos, el calor se genera por medio de potencia eléctrica. El éxito depende del voltaje, corriente y polaridad apropiados y de la variación correcta de éstos con el tiempo. La selección de la *fuente de potencia* más adecuada es una precondición del éxito. La fuente de potencia puede ser tan sencilla como un transformador, pero fuentes de potencia altamente sofisticadas —a menudo basadas en dispositivos electrónicos de estado sólido— se usan cada vez más. Entonces es posible el uso de lazo cerrado en el control de los parámetros de proceso.

18-4-3 Materiales soldables

Las generalizaciones son más peligrosas para la soldadura que para otros procesos, pero se pueden formular algunas directrices. En las situaciones reales de producción se deberán consultar volúmenes de referencia especializados, bases de datos computarizadas y normas de la industria.

Materiales ferrosos

Aceros ferríticos. Se sueldan fácilmente, pero la formación de martensita es un riesgo en los aceros perlíticos. En general, un incremento en la endurecibilidad significa que la martensita se forma una rapidez de enfriamiento crítica menor; por lo tanto indica un aumento del riesgo de formación de martensita y un decremento de la soldabilidad. La martensita no sólo es dura y frágil, sino que su formación procede con un incremento del volumen que impone esfuerzos adicionales en la estructura, reduciendo la resistencia de la soldadura. El *precalentamiento* y, si es posible, el *postcalentamiento* son necesarios cuando la formación de martensita o de bainita son inevitables.

Alternativamente, la estructura puede calentarse dentro del rango austenítico, enfriarse por arriba de la temperatura M_S (Fig. 6-20) y soldarse antes que comience la transformación. Entonces, la estructura completa se enfría. Esa *soldadura por pasos* hace incluso a los aceros de herramienta receptivos a la soldadura. Se debe notar que los aceros de aleación completamente tratados térmicamente son soldables, pero la soldadura se debe enfriar rápidamente para obtener un martensita templada.

Ya se mencionó el riesgo de la fragilidad debida al hidrógeno. El azufre crea porosidad y fragilidad, y, aunque es posible la soldadura de los aceros resulfurados de maquinado libre, a menudo se prefiere soldarlos con latón.

Láminas recubiertas. La gran difusión del uso de lámina recubierta (principalmente galvanizada, pero también prelubricada) ha impuesto nuevos retos. En la soldadura por resistencia, el zinc se evapora, crea un plasma y origina erosión y porosidad, además, la vida de los electrodos de cobre se reduce al alearse con el zinc. El espesor del recubrimiento no debe ser excesivo y las densidades caloríficas se deben ajustar. Algunos procesos son inaplicables.

Aceros inoxidables. Estos aceros siempre contienen cromo, que forma una película extremadamente densa de Cr_2O_3. Las condiciones de la soldadura se deben elegir para evitar su formación. Asimismo, los aceros austeníticos (que contienen tanto Cr como Ni) son soldables, aunque los carburos de cromo formados a altas temperaturas reducen el contenido de cromo disuelto por debajo del nivel necesario para la protección contra la corrosión, y la corrosión subsecuente (*falla por descomposición de la soldadura*) representa un riesgo. Para evitar esto, el contenido de carbono debe ser muy bajo, o debe estabilizarse el acero (Ti, Mo o Nb agregado para formar carburos estables), o la estructura debe calentarse por arriba de 1 000°C después de la soldadura y luego enfriarse rápidamente para retener el carbono redisuelto y el cromo en solución.

Los aceros inoxidables que sólo contienen cromo son ferríticos o martensíticos en estructura. Los aceros ferríticos (más de 16% de Cr) se pueden soldar, pero el grano grueso debilitará la unión. Los aceros martensíticos forman martensita con una dureza que depende del contenido de carbono; el precalentamiento cuidadoso es seguido de un postcalentamiento por arriba de 700°C para transformar la martensita en ferrita dúctil con precipitados embebidos de carburo de cromo.

Hierro fundido. La soldabilidad de los hierros fundidos (Secc. 7-3-1) varía en gran medida, pero muchos de ellos se sueldan, especialmente mediante soldadura por arco.

Frecuentemente se emplea un metal de aporte al alto níquel para estabilizar la forma grafítica. El precalentamiento y el enfriamiento lento también son útiles. Al soldar hierro gris, la varilla de soldadura se enriquece con silicio y, para asegurar la formación de grafito esferoidal, se le incorpora Mg para soldar hierro fundido nodular. El hierro maleable se revierte a hierro blanco frágil, reduciendo la tenacidad de la soldadura. Cuando la tenacidad es importante, la soldadura es tratada térmicamente o la unión se realiza con soldadura fuerte.

Materiales no ferrosos

Materiales de bajo punto de fusión. El estaño y el plomo se sueldan fácilmente, a condición que la entrada de calor se mantenga suficientemente baja para evitar el sobrecalentamiento. El zinc, por otro lado, es uno de los materiales más difíciles de soldar, porque se oxida fácilmente y también se vaporiza a baja temperatura (a 906°C). Se puede soldar por resistencia y por espárrago, aunque es más común soldarlo con soldadura blanda.

Aluminio y magnesio. Estos materiales comparten una variedad de características. La mayoría de las aleaciones se sueldan fácilmente, particularmente con una envolvente de gas inerte. De otra manera, la película de óxido debe ser removida con un fundente poderoso, que a su vez puede requerir eliminarse después de la soldadura para evitar la corrosión. La humedad (H_2O) se debe evitar, ya que reacciona y produce un óxido e hidrógeno (que vuelve frágil la unión al causar porosidad).

La alta conductividad térmica y el elevado calor específico, aunque con un bajo punto de fusión de estas aleaciones, requieren de una entrada de calor y de precauciones adecuadas contra el sobrecalentamiento. El alto coeficiente de dilatación térmica exige el precalentamiento de los materiales que son frágiles en caliente. Debido a las dificultades encontradas con los materiales endurecidos por precipitación, las aleaciones a menudo son tratadas térmicamente después de la soldadura o, si esto no es posible, se utiliza un material de aporte diferente (con frecuencia, Al-Si para aleaciones de aluminio).

Aleaciones con base de cobre. El cobre desoxidado se suelda de manera sencilla, especialmente si el material de aporte contiene fósforo para proporcionar una desoxidación instantánea. El cobre bien refinado no se puede soldar porque su contenido de oxígeno (típicamente 0.15%) reacciona con el hidrógeno y con el CO para formar agua y CO_2, respectivamente, que hacen frágil a la unión, al generar porosidad. Los latones se pueden soldar pero las pérdidas de zinc son inevitables; por lo tanto, o el metal de aporte se enriquece en zinc, o se agrega Al o Si para formar un óxido que reduzca la evaporación. El bronce al estaño tiene un rango de solidificación muy amplio, así que es extremadamente frágil en caliente. El fósforo en la varilla de soldadura evita la oxidación, en tanto que el postcalentamiento es necesario para disolver la fase intermetálica frágil no equilibrada. Los bronces al aluminio no representan problema, aunque el óxido formado se debe desalojar, igual que con el aluminio puro.

Níquel. Este metal y sus aleaciones de solución sólida se sueldan fácilmente. Las superaleaciones de endurecimiento por precipitación contienen Cr, Al, Al y Ti, y se debe desalojar contundente o evitar la formación de óxido. Todas las aleaciones de níquel son muy sensibles incluso a la cantidad más pequeña de azufre, que forma un eutéctico de bajo punto de fusión y provoca agrietamiento por calor. Algunas aleaciones de endurecimiento por precipitación tienen un rango de temperatura de baja ductilidad y también se pueden agrietar.

Titanio y zirconio. Las aleaciones también son soldables, pero una atmósfera inerte es esencial para evitar la oxidación; por lo tanto, a menudo se encierran en cámaras de soldadura de atmósfera inerte o se sueldan con un haz de electrones.

Aleaciones de metal refractario. El W, el Mo y el Nb se pueden soldar, aunque la volatilidad de los óxidos hace obligatorio el uso de técnicas especiales (por ejemplo, soldadura por haz de electrones).

18-5 SOLDADURA POR RESISTENCIA

La *soldadura por resistencia* representa, de alguna forma, una transición de la soldadura en estado sólido a soldadura por fusión. Las dos piezas por unirse se prensan en conjunto y se pasa una corriente alterna por la zona de contacto. Si se aplica la presión correcta, esta zona presentará la mayor resistencia en el circuito eléctrico, y allí se concentrarán las pérdidas de potencia. La energía se convierte en calor. La corriente se deja activa hasta que ocurre la fusión en la interfase entre las dos piezas, y la presión se mantiene hasta que la soldadura solidifica. De acuerdo con la ley de Joule, el calor generado (en joules) es

$$J = I^2Rt \qquad \textbf{(18-1)}$$

donde I es la corriente (A), R la resistencia (Ω) y t la duración de la aplicación de la corriente en segundos. El voltaje puede ser bajo, típicamente de 0.5 a 10 V, pero las corrientes pueden ser muy altas (como ejemplos, véase la Fig. 18-15).

Como el calor se debe concentrar en la zona de soldadura, la resistencia fuera de ella debe ser baja, especialmente en los puntos donde la corriente es suministrada a las piezas de trabajo por medio de electrodos. Los materiales de alta conductividad térmica y alto calor específico (como el aluminio o el cobre) exigen corrientes muy elevadas para evitar la disipación del calor.

La limpieza de la superficie es importante, pero no tan vital como en las uniones de estado sólido, pues los contaminantes son expulsados de la fusión. No obstante, las escamas, las películas gruesas de aceite y la pintura deben ser eliminados, aunque una preparación de la superficie relativamente sencilla es adecuada y también es factible soldar el acero recubierto de zinc. El control de la calidad es sumamente importante. Las soldaduras se prueban destructivamente para establecer los parámetros óptimos del proceso; después, la inspección incluye técnicas de medición de la temperatura de la

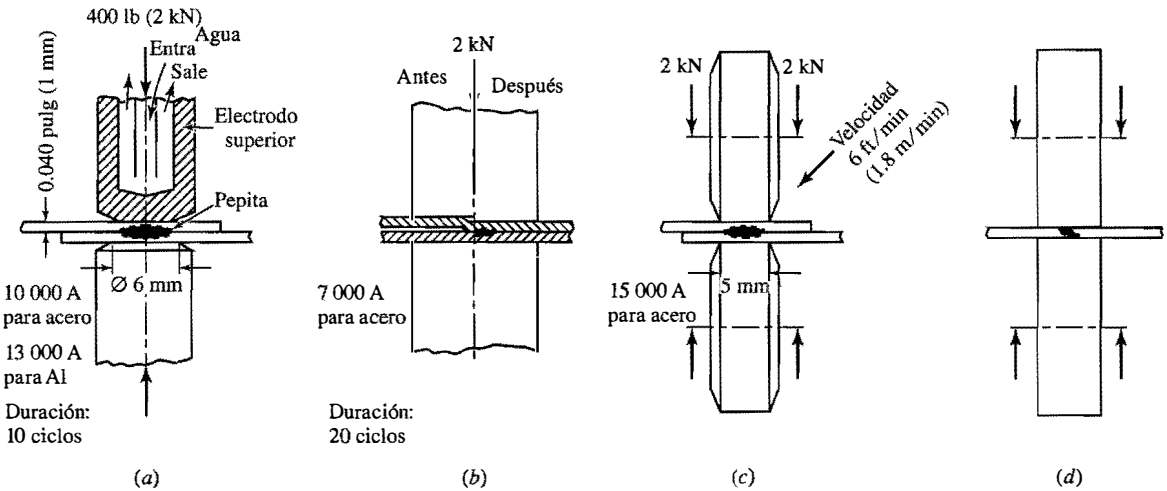


Figura 18-15 La fusión parcial es el objetivo en la soldadura (a) de puntos por resistencia, (*b*) por proyección, (c) de costura por resistencia y (*d*) de costura con presión. (Para propósitos de ilustración, las condiciones del proceso se dan para una lámina de acero al bajo carbono de 1 mm de espesor.)

superficie (a partir de la cual se extrapolan las temperaturas de la zona de soldadura), ultrasónicas y de emisión acústica. Son posibles el control de circuito cerrado y el adaptivo.

Soldadura de puntos por resistencia (RSW) Debido a la amplia difusión de la aplicación de piezas de lámina metálica, la *soldadura de puntos por resistencia* ha adquirido una posición prominente, desde la sujeción de asas de artículos de cocina hasta el ensamble de carrocerías completas de automóviles (hay varios miles de soldaduras de punto por cada automóvil). Dos electrodos, normalmente enfriados por agua, presionan juntas dos láminas (Fig. 18-15*a*). Los electrodos están hechos de materiales de alta conductividad y elevada resistencia en caliente, como el cobre, con algunas adiciones de Cd, Cr o Be, o aleaciones de cobre-tungsteno o molibdeno. Entonces, la corriente se aplica durante un número predeterminado de ciclos (en la industria automotriz, 10 a 30 ciclos para una corriente de 60 Hz), después de lo cual la interfaz se calienta y en una fracción de segundo se forma una zona fundida (*pepita de soldadura*). La presión se libera sólo después que la corriente ha sido desconectada y que la pepita ha solidificado. La superficie de la lámina presenta una ligera depresión y decoloración.

Los electrodos pueden incorporarse en una máquina fija o en una pistola portátil de soldador. Se emplean electrodos múltiples (algunas veces cientos) para la soldadura de ensambles grandes, con grupos de electrodos puestos en contacto en una secuencia programada. Una serie de soldaduras puede realizarse con precisión y en una rápida sucesión mediante robots soldadores. La calidad de la soldadura se asegura con mediciones durante el proceso basadas, por ejemplo, en el cambio de la resistencia, mientras se forma la pepita, o en la emisión acústica que ocurre durante la expulsión de metal.

Ejemplo 18-6 Dos láminas de acero al bajo carbono de 0.5 mm de espesor se unen por medio de soldadura de puntos. Los electrodos de 5 mm de diámetro de cara se prensan con una fuerza de 2 kN. La soldadura utiliza una corriente de 8 500 A durante 7 ciclos a partir de un transformador de potencia de 60 Hz. La resistencia de la unión es de 100 μΩ. ¿Cuánto calor se genera?

De la ecuación (18-1), calor = $(8\ 500^2)(0.0001)(7/60) = 843$ J.

Soldadura por proyección (RPW) La extensión de la zona soldada se controla mejor y se realizan varias soldaduras simultáneamente con sólo un electrodo cuando pequeños se estampan (Secc. 10-5-1) o acuñan (Secc. 9-3-2) hoyuelos o *proyecciones* en una de las láminas. Cuando se aplica la corriente, las proyecciones se suavizan y se empujan de regreso a su lugar con la presión del electrodo, a medida que se forma la pepita de soldadura (Fig. 18-15*b*). Las proyecciones forjadas o maquinadas en cuerpos sólidos permiten soldarlos a una lámina o a otro cuerpo sólido. Una forma de la soldadura por proyección se practica cuando se sueldan por resistencia mallas formadas con alambres cruzados.

Soldadura de costura por resistencia (RSEW) Una serie de soldaduras de punto se hace mucho más rápido a lo largo de una línea si los electrodos tienen forma de rodillos (Fig. 18-15*c*). La corriente se enciende y se apaga en una sucesión planeada, proporcionando espaciamiento uniforme de los puntos. Cuando una corriente alterua permanece activa, se realiza la soldadura de un punto cada vez que la corriente alcanza su valor pico, y las soldaduras se espacian suficientemente cerca para producir una unión hermética a gas y líquido. La *soldadura de costura por resistencia* es uno de los métodos para producir el cuerpo de una lata, y se usa para la manufactura secciones de vigas y de cajas. En la *soldadura de costura aplastada* (Fig. 18-15*d*), el traslape sólo es 1 o 2 veces el espesor de la lámina, y los rodillos soldadores aplican suficiente presión para reducir la costura cerca de 10% sobre los espesores de la lámina base. Éste es uno de los procesos que se emplean para fabricar blancos a la medida (Secc. 10-7).

Soldadura por resistencia de alta frecuencia (HFRW) Una aplicación importante de la soldadura por resistencia es en la manufactura de tubos, tuberías, miembros estructurales y rines de ruedas. Los tubos se forman con rodillo (Secc. 10-4-4), y entonces la costura longitudinal se realiza mediante *soldadura por resistencia de alta frecuencia* (HFRW), en la que la corriente eléctrica se aplica por medio de electrodos deslizantes o rodantes (Fig. 18-16*a*). En la *soldadura por inducción de alta frecuencia* (HFIW, por sus siglas en inglés), el tubo es rodeado por una bobina de inducción y la frecuencia de operación se elige para obtener la penetración óptima; las frecuencias mayores penetran a una profundidad menor. En ambas, HFRW y FFIW, existe una zona fundida y localizada formada que luego se expulsa inmediatamente a través de compresión. Usualmente se recorta el exceso de metal.

Soldadura por chispas y recalcado La soldadura por recalcado, en general, significa la unión de dos cuerpos al prensarlos juntos con una fuerza suficiente para causar deformación. En el sentido más particular, el término se aplica a la soldadura por resis-

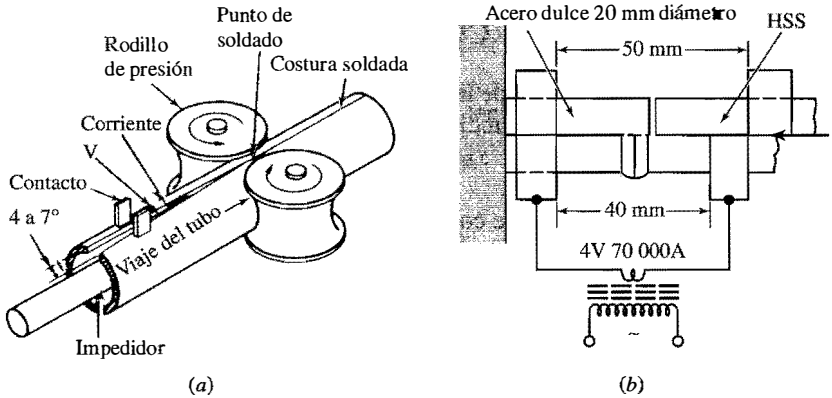


Figura 18-16 (a) Soldadura por resistencia a alta frecuencia (costura longitudinal a tope). (*b*) Soldadura a tope por presión, ilustrando los parámetros críticos del proceso. *[Inciso (a) de Metals Handbook, 9a. ed., vol. 6, Welding, Brazing and Soldering, p. 760, ASM International, 1983. Con permiso.]*

tencia en la que, igual que en la soldadura de puntos, la presión es aplicada antes de activar la corriente (Secc. 18-3-3). En la actualidad está mucho más difundida la *soldadura a tope por chispas* o *soldadura por chispas* (FW), en que la corriente se aplica durante la aproximación de las dos partes; de esta manera, ocurre un calentamiento extremadamente rápido cuando hacen contacto primero las irregularidades superficiales. El metal fundido se expulsa violentamente y se quema en el aire, produciendo algún arqueo; de ahí el nombre de *chispas*. Se puede quemar una longitud sustancial para asegurar una buena soldadura, pero todo el metal líquido es expulsado y la soldadura se forma recalcando las superficies calientes sólidas de metal (Fig. 18-16*b*) (*soldadura por recalcado*, UW). Así, la resistencia de la unión no es afectada por la presencia de residuos de metal de soldadura fundido. Por lo tanto, el proceso se considera como una transición entre los procesos de fase líquida y los de fase sólida. Se producirá una buena soldadura sólo si la rapidez de aproximación, la corriente y el voltaje, el viaje total y la presión de recalcado son controlados cuidadosamente. Actualmente, el control manual es reemplazado por el control adaptivo automático.

El desplazamiento de metal crea una rebaba que debe eliminarse. Las caras extremas que se van a unir a menudo se achaflanan, de manera que la fusión se mueva desde el centro hacia fuera para expulsar los contaminantes en la rebaba. El precalentamiento es posible al activar la corriente después que las caras fueron prensadas juntas, pero luego éstas se separan ligeramente para inducir chispas. Para el calentamiento uniforme, ambas partes deben tener áreas iguales de sección transversal, aunque su composición puede ser diferente, por ejemplo, en la unión de un vástago de acero al bajo carbono con una broca de una herramienta de HSS. Las barras y secciones dobladas en forma de anillos (Secc. 10-15*b*), los tubos y las estructuras de lámina con frecuencia se sueldan extremo con extremo; este método se usa ampliamente para unir las puntas de alambre y rollos de lámina para permitir la operación continua de las líneas de procesamiento.

18-6 SOLDADURA CON ARCO ELÉCTRICO

La *soldadura con arco eléctrico* difiere de la soldadura por resistencia eléctrica en que un arco sostenido genera el calor para fundir el material de la pieza de trabajo (y si se utiliza, la varilla de aporte). Los eventos se muestran mejor en el ejemplo de la soldadura con arco de tungsteno y gas (GTAW).

Cuando el electrodo de tungsteno se conecta a la terminal negativa de una fuente de poder (en modo de *polaridad directa* o de *corriente directa de electrodo negativo*, DCEN), se convierte en el cátodo; la pieza de trabajo, conectada a la terminal positiva se transforma en el ánodo (Fig. 18-17*a*). Un gas inerte protege a ambos electrodos. El cátodo se calienta con la corriente de soldado hasta que se alcanza la *función de trabajo* (la energía necesaria para desalojar los electrones) del tungsteno. La emisión inducida térmicamente (*termoiónica*) crea una *carga espacial* (una nube de electrones) en la que los electrones fluyen a la pieza de trabajo (ánodo), donde se genera la mayoría del calor (el flujo de electrones es responsable de 85% de la transferencia calorífica). En el espacio entre la punta del electrodo y la pieza de trabajo, la alta temperatura ioniza un poco del gas: los electrones son desalojados y se forma un *plasma* conductor de la electricidad (una mezcla neutra de electrones e iones positivos). La energía de los electrones incidentes calienta la pieza de trabajo. La zona de la soldadura a menudo es profunda y angosta (Fig. 18-17*b*).

Cuando la polaridad se invierte, con el electrodo conectado a la terminal positiva (modo de *polaridad invertida de* o *corriente directa de electrodo positivo*, DCEP), la pieza de trabajo se convierte en el cátodo. La zona de la soldadura es más amplia y menos profunda (Fig. 18-17*c*); por lo tanto, este modo de operación es más adecuado para material de calibre delgado, que se quemaría completamente en el modo DCEN. La polaridad inversa tiene un efecto adicional: las películas de óxido en las superficies

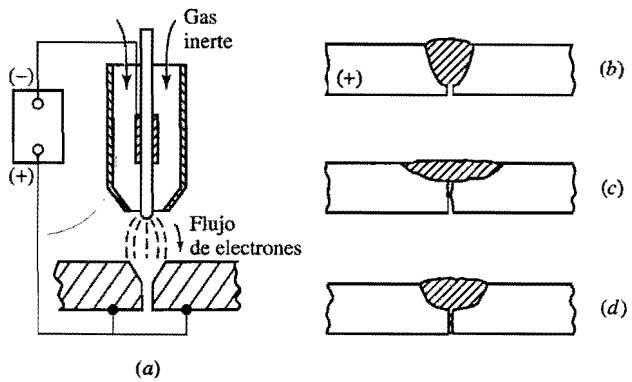


Figura 18-17 Soldadura con arco eléctrico de tungsteno y gas (a) y la forma del charco de soldadura con corriente cd de polaridad directa (*b*) e inversa (*c*) y con corriente ca (*d*).

de piezas de trabajo de Al y Mg son desalojadas; de esta manera, la superficie se puede limpiar, ya sea invirtiendo la polaridad brevemente en el modo DCEN o usando una corriente CA (Fig. 18-17*d*).

La entrada nominal de calor H es la potencia dividida entre la velocidad de viaje v; para una arco eléctrico, potencia = $E \times I$, donde E es el voltaje (V) e I la corriente (A). Así,

$$H = \frac{EI}{v}\left(\frac{\text{J}}{\text{mm}}\right) \qquad \textbf{(18-2)}$$

Como se indicó en la sección 18-4-2, no todo este calor alcanza la pieza de trabajo (la *eficiencia del arco* es menor que 1) y más calor se pierde en la zona adyacente a la soldadura. La entrada permisible de calor se limita por consideraciones metalúrgicas, y es menor cuando la pieza de trabajo es precalentada. Las altas temperaturas se mantienen por algún tiempo; por lo tanto, es esencial tener protección completa contra la atmósfera. En algunos procesos y con algunos materiales, también ha y necesidad de un fundente que disuelva óxidos y los retire de la zona fundida. En forma muy general, los procesos de soldadura con arco incluyen métodos de electrodo consumible y no consumible.

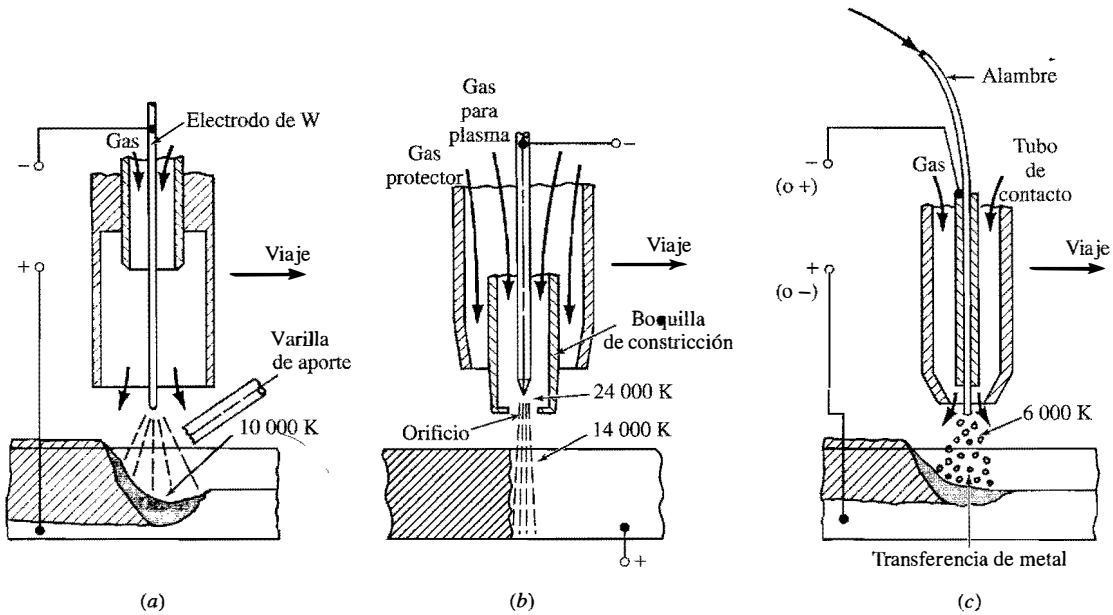


Figura 18-18 El arco se protege con gas en los procesos de soldadura (*a*) con arco de tungsteno y gas inerte, (*b*) arco de plasma, y (*c*) arco metálico y gas inerte. Note que la profundidad de la penetración se incrementa al elevar la temperatura del arco.

18-6-1 Soldadura con electrodo no consumible

En estos procesos, el electrodo no se funde y el metal de la soldadura es suministrado por el flujo del metal base (*soldadura autógena*) o, para lámina gruesa (> 3 mm de espesor), por medio de una varilla separada de material de aporte.

Soldadura de tungsteno con arco eléctrico y gas (GTAW) Como se indicó, el arco se mantiene entre la pieza de trabajo y el electrodo de tungsteno protegido por un gas inerte (de ahí el antiguo nombre de *soldadura de tungsteno con gas inerte* o *soldadura* TIG, Fig. 18-18*a*). La atmósfera protectora es provista por el argón, el cual tiene un potencial de ionización menor y por ello precisa menos voltaje (alrededor de 10 V), pero proporciona un arco eléctrico menos caliente y una penetración menos profunda que el helio. La polaridad es DCEN excepto para Al y Mg, donde la CA es útil para quitar el óxido.

Para producir el arco eléctrico, la emisión de electrones y la ionización del gas se inician retirando el electrodo de la superficie de trabajo de manera controlada, o con la ayuda de un arco iniciador. Una corriente de alta frecuencia, superpuesta a la corriente alterna o directa de soldado, ayuda a comenzar el arco y también lo estabiliza.

Las operaciones tanto manuales como automáticas son posibles. El proceso exige una habilidad considerable, pero produce soldaduras de muy alta calidad en casi cualquier material, en cualquier posición de soldado y también en calibres delgados (menores de 6 mm). La zona de la soldadura es visible y no hay chisporroteo de soldadura o formación de escoria, aunque las partículas del electrodo pueden entrar a la soldadura si el electrodo se sobrecalienta o toca el baño de soldadura.

Soldadura con arco de plasma (PAW) Si el arco y, dentro de él, el plasma es restringido por un orificio, la intensidad calorífica se eleva (Fig. 18-18*b*). Primero, el arco se produce entre el electrodo y la boquilla aplicando un voltaje de alta frecuencia. Luego se acerca el soplete a la pieza de trabajo (método de operación de *arco de plasma transferido*). A densidades bajas de corriente, en el *modo fusión interna*, la zona de la soldadura es similar en forma a la soldadura con arco; a altas densidades de corriente, el *modo de agujero de cerradura* (Fig. 18-18*b*) prevalece y el metal resolidifica atrás del haz de plasma móvil. En la técnica de *arco no transferido*, la boquilla de constricción es conectada a la terminal positiva; el arco se produce entre el electrodo y la boquilla y calienta la pieza de trabajo por radiación. Esta técnica también se utiliza para el rocío de plasma (recubrimiento de superficies, Secc. 19-4-4). La PAW es particularmente útil para la soldadura de láminas delgadas. El tamaño pequeño de la zona requiere control cuidadoso de la trayectoria. Se practican las formas manual y mecánica, y el metal de aporte se puede usar si se necesita un suministro extra de material.

La soldadura con arco de carbono (CAW) Fue la precursora de los procesos actuales de electrodo no consumible. El arco es producido entre la pieza de trabajo y un electrodo de carbono o entre dos electrodos de carbono.

18-6-2 Soldadura con electrodo consumible

En este grupo de procesos el *electrodo consumible* es un metal que se funde para hacerse parte del cordón de soldadura. A menudo su composición es diferente de la de los metales base y se pueden encontrar recomendaciones en los trabajos de referencia citados al final de este capítulo. La zona de la soldadura está protegida por un gas o un fundente.

Soldadura con arco metálico y gas (GMAW) El electrodo metálico consumible, alimentado por medio de la pistola para soldar, está protegido por un gas inerte, de ahí el viejo acrónimo soldadura MIG (*metal-gas inerte*)(Fig. 18-18*c*). Es adecuada para la mayoría de los metales. Igual que con la GTAW, no se forma escoria y se pueden acumular varias capas con poca o ninguna limpieza intermedia. El argón es un gas adecuado para todos los materiales; algunas veces se prefiere helio —debido a su mayor potencial de ionización y, por lo tanto, mayor rapidez de generación de calor— para la soldadura de aluminio y cobre; el Ar con entre 2 y 30% de CO_2 o CO_2 puro generalmente se emplea para aceros al carbono; también se están introduciendo los gases especiales, adaptados para tareas específicas.

Normalmente, el electrodo se conecta a la terminal positiva (DCEP o polaridad invertida). La densidad de corriente es el determinante principal del modo de transferencia de metal. Para una baja corriente de soldado, ocurre una transferencia por *cortocircuito*: el electrodo toca la pieza de trabajo, la corriente aumenta, la punta del alambre se funde y se transfiere una gotita. El gas protector es elegido para minimizar la salpicadura (CO_2 para el acero, Ar-He para metales no ferrosos). A mayores intensidades de corriente (y con CO_2 casi siempre) prevalece la *transferencia globular*: las partículas más grandes que el electrodo caen por gravedad. La gota se debe separar antes que llegue al charco de soldadura y sólo es posible la soldadura horizontal. Por encima de una densidad crítica de corriente, el metal es transferido en un rocío fino (*transferencia por rocío*) mediante las fuerzas del arco, de ahí que se puedan utilizar todas las posiciones de soldadura. Se obtienen soldaduras más consistentes con el uso de corriente pulsante de soldadura: una corriente baja de fondo mantiene el arco, y la transferencia de metal ocurre cuando los impulsos de la corriente exceden el nivel requerido para la transferencia por rocío. El gas de protección es Ar o una mezcla de él. En una variante, se alimenta alambre en un soplete de plasma (*soldadura* MIG *de plasma*).

El electrodo de alambre se suministra en longitudes grandes enrolladas que permiten soldaduras continuas en cualquier posición de soldado. En la soldadura semiautomática, el soldador guía la pistola y ajusta los parámetros del proceso; en la soldadura automática, todas las funciones son asumidas por la máquina de soldar o robot. La soldadura en el sitio puede ser difícil porque las corrientes de aire soplan el gas protector lejos de la zona de soldadura.

Ejemplo 18-7

Se producen uniones a tope con GMAW en modo DCEP por cortocircuito entre dos láminas de acero inoxidable de 2 mm de espesor. El electrodo de alambre de 1.1 mm de diámetro es alimentado a una rapidez de 4.4 m/min. La corriente es de 140 A, el voltaje del arco eléctrico es de 21

V. Calcule la (*a*) potencia (kW) suponiendo una eficiencia del arco de 0.85, la (*b*) rapidez de deposición (mm^3/s) y la (*c*) velocidad de viaje si el ancho promedio de la zona de la soldadura es 2.4 mm y la mitad de ésta proviene del metal base.

(*a*) Potencia = $E \times I \times \eta = (21)(140)(0.85) = 2.5$ kW.

(*b*) Rapidez de deposición = $(1.1^2\pi/4)4\ 400/60 = 70\ mm^3/s$.

(*c*) Velocidad de viaje = $70/[(2 \times 2.4)/2] = 29$ mm/s.

Soldadura con arco metólico protegido (SMAW) De nuevo, el arco se produce entre el alambre o varilla de aporte y las piezas que se van a unir (Fig. 18-19*a*), pero ahora la protección es suministrada por un recubrimiento aplicado al exterior del alambre de aporte (*electrodo recubierto*). El recubrimiento cumple varias funciones: su combustión y descomposición con el calor del arco crea una atmósfera protectora; la fusión del recubrimiento proporciona una cubierta de escoria fundida sobre la soldadura; el contenido de Na o K del recubrimiento se ioniza fácilmente para estabilizar el arco. También se pueden introducir elementos aleantes desde el recubrimiento. La elección del electrodo (que también determina la polaridad) es crítica para el éxito. Durante la soldadura, el electrodo se funde a una rapidez de aproximadamente 250 mm/min, mientras que el recubrimiento se funde para formar una escoria que se debe eliminar si se requiere más de una pasada para acumular el espesor completo de la soldadura.

Como el recubrimiento es frágil, se usan varillas rectas típicamente de 450 mm de longitud, haciendo a este proceso adecuado sólo para la operación manual, con una rapidez relativamente lenta, pero aún a bajo costo. El proceso es versátil y adecuado para la aplicación en campo, aunque precisa de una habilidad considerable. Es posible el soldado en todas las posiciones, incluyendo el realizado por arriba de la cabeza si el metal y la escoria solidifican suficientemente rápido.

Soldadura de arco con núcleo fundente (FCAW) Básicamente, se obtiene el mismo resultado pero una penetración más profunda con el fundente dentro de un tubo. El alambre para soldar ahora se puede enrollar y es factible la soldadura automática continua. Algunas veces se proporciona una protección adicional con un gas, entonces el proceso se parece a la soldadura con arco metálico y gas.

Soldadura de arco sumergido (SAW) Ahora el electrodo consumible es alambre de aporte sin recubrimiento y la zona de la soldadura está protegida por un fundente granular, suministrado independientemente desde un alimentador (Fig. 18-19*b*) en una capa gruesa que cubre el arco. El fundente protege el arco, permite alta corriente y gran profundidad de penetración, asegura alta eficiencia, actúa como desoxidante y depurador y puede contener elementos aleantes de polvo de metal. La SAW es primordialmente un proceso automático de soldadura con elevada rapidez de deposición. Los electrodos en tandem sirven para depositar grandes cantidades de material de aporte.

La posición de la soldadura debe ser horizontal; de esta manera es adecuada para tuberías de acero, cilindros y también para soldaduras circulares si se gira la pieza de trabajo. La soldadura de arco sumergido doble (con una soldadura desde el interior y otra desde el exterior) se emplea para fabricar tuberías soldadas en espiral. También se

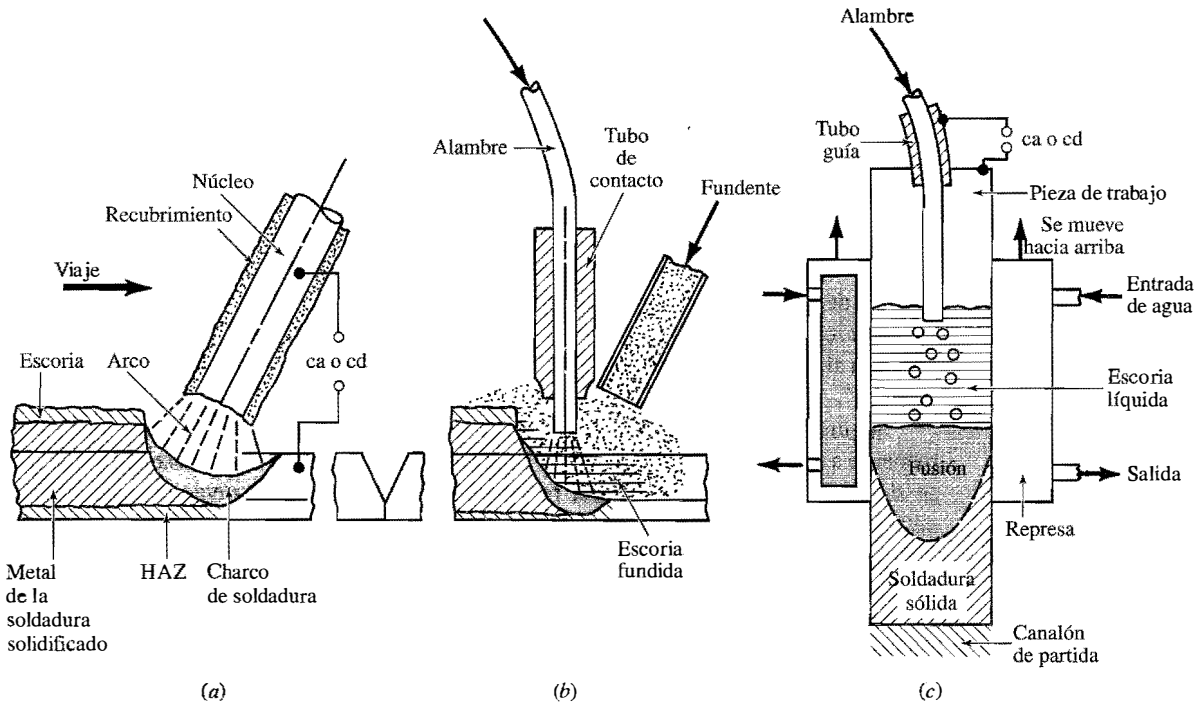


Figura 18-19 Un arco sostenido, protegido por escoria fundida, se mantiene en la soldadura con electrodo consumible por los métodos de (*a*) arco metálico protegido, (*b*) arco sumergido y (*c*) electroescoria.

puede usar con robots soldadores, con la pieza de trabajo manipulada en posiciones apropiadas.

Soldadura con electroescoria (ESW) El proceso se utiliza ampliamente para soldar uniones verticales en placas y estructuras gruesas (25 mm o más), como plataformas de perforación de petróleo, puentes, barcos y marcos de prensas y molinos de laminación. El alambre del electrodo es alimentado a un baño de escoria fundida (Fig. 18-19*c*); inicialmente, se produce un arco pero luego se apaga debido a la escoria, y el calor de la fusión es suministrado por el calentamiento por resistencia en la escoria. *Zapatas* (represas) de cobre enfriados con agua cierran el espacio entre las piezas que se van a soldar para evitar que la fusión y la escoria escurran. La cabeza de soldadura se debe elevar a medida que aumenta el depósito de soldadura. En una variante del proceso, un tubo guía de acero consumible se funde en el baño de soldadura; así que no es preciso mover la cabeza soldadora. Si la pieza es girada, también se pueden realizar soldaduras circunferenciales.

Soldadura con electrogás (EGW) Es una consecuencia de la soldadura con electroescoria, pero está relacionada con la hecha con arco metálico y gas. El alambre del

electrodo es sólido o está cubierto con fundente; y la protección es proporcionada por un gas (típicamente 80% Ar, 20% CO_2). El baño fundido es nuevamente retenido con represas de cobre.

Automatización de los procesos de soldado Ya se comentaron las posibilidades de la mecanización y de la automatización para varios procesos de soldado con arco. Los avances han tomado dos direcciones.

Primero, el proceso mismo es controlado automáticamente cada vez más. La forma de los pulsos de corriente es controlada con dispositivos electrónicos. La corriente, la rapidez de viaje, la rapidez de alimentación del electrodo, etc., óptima son fijados y controlados y se introducen el control CNC y el adaptivo, utilizando detectores de temperatura sin contacto, detectores de la distancia entre el electrodo y la pieza de trabajo, etc.

Segundo, la manipulación de la pieza de trabajo y/o de la pistola para soldar una respecto a la otra se automatiza cada vez más. La tarea es relativamente sencilla cuando se suelda a lo largo de una línea recta, de una espiral u otra trayectoria fácilmente definida, y a menudo es posible la mecanización. Son prerrequisitos la preparación apropiada del borde, el ajuste y la fijación de las piezas, de manera que se logre un buen cordón de soldadura en la ubicación correcta. La soldadura a lo largo de líneas espaciales complejas es factible sólo con la aparición de robots de ejes programables múltiples. Los robots soldadores logran un tiempo de arco de 80%, en tanto que un soldador manual raramente mantiene 30%. La repetibilidad también es mucho mayor y no es sorprendente que la soldadura sea el mayor campo de aplicación de los robots.

Idealmente, la preparación de la costura y la localización exacta por dispositivos de sujeción deberá permitir que el soplete de soldadura siga una trayectoria predeterminada. Si esto no es posible, es necesaria alguna forma de *seguimiento de la costura*. En la forma más sencilla, una sonda o rueda está enfrente del soplete y lo guía en la ranura. El seguimiento a través del arco depende de la detección del cambio en la corriente cuando la distancia de la ranura al soplete cambia. Para una mejor definición de la ranura, el soplete se mueve en un patrón ondulado u orbital. El más sofisticado es el seguimiento láser, en el que la localización de la ranura se determina por triangulación. Esos sistemas de visión se pueden desarrollar aún más para ayudar a planear y a programar la secuencia de soldado, para localizar la unión, posicionar el electrodo, iniciar el ciclo, controlar el electrodo durante el soldado, detener el ciclo e inspeccionar la soldadura resultante.

18-6-3 Soldadura de pieza de trabajo consumible

En algunos casos especiales de soldadura autógena, la pieza de trabajo se convierte en el electrodo.

Soldadura de arco con espárrago o soldadura de espárrago (SW) El arco se mantiene entre una *proyección* (sección transversal reducida) en un *espárrago* (típicamente, una varilla roscada o lisa) y la superficie de la pieza de trabajo (usualmente, una placa, Fig. 18-20*a*). Cuando la proyección y la superficie de la placa se funden, se

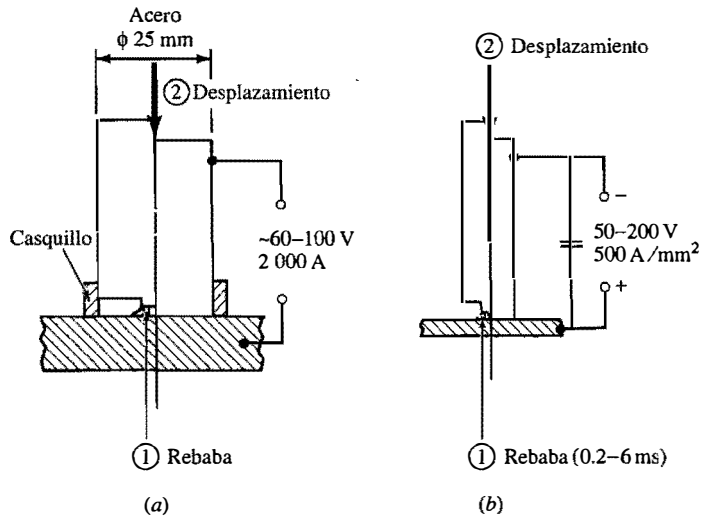


Figura 18-20 Se produce un arco en la soldadura (*a*) de espárrago y (*b*) por percusión.

aplica presión para unir el espárrago a esta última. Normalmente, la polaridad es DCEN para acero y DCEP para aluminio. Un *casquillo* cerámico desechable *de protección* concentra el calor del arco, protege de la oxidación y confina la fusión. Se puede utilizar un fundente embebido en el espárrago. El diámetro del espárrago se elige de manera que la unión falle en el espárrago y no en la lámina. Millones de espárragos, a menudo roscados, se emplean en la construcción de edificios, de barcos; en la industria automotriz, en la construcción de tableros eléctricos y para la colocación de manijas y patas en los aparatos electrodomésticos.

Soldadura de espárrago con descarga de capacitor Al colocar espárragos pequeños (de 2 a 6 mm de diámetro), la energía almacenada en un condensador se usa para calentar (Fig. 18-20*b*). La descarga ocurre justo antes o durante la aproximación a la superficie. El calor intenso y localizado permite la unión de secciones transversales ampliamente diferentes y también de materiales disímiles. El control del tiempo y del movimiento son críticos. Los espárragos se pueden soldar a láminas delgadas, incluso a las recubiertas con pintura o PTFE en el otro lado, permitiendo la sujeción de tableros de instrumentos, placas indicadoras y la decoración automotriz.

El término *soldadura por percusión* (PEW) describe la soldadura con descarga del capacitor aplicada para unir alambres a terminales y otras superficies planas. Como las dos terminales deben estar separadas antes del impacto, no es posible soldar anillos.

18-7 OTROS PROCESOS DE SOLDADURA Y DE CORTE

Hay varios de procesos de soldadura que no pertenecen en las clases anteriores.

18-7-1 Fuentes químicas de calor

El calor necesario para la fusión puede ser provisto por una fuente química de calor.

Soldadura con gas La *soldadura con oxígeno y gas combustible* (OFW) es la forma más difundida de soldadura con gas. El calor es producido por medio de la combustión de acetileno (C_2H_2) con oxígeno (*soldadura con oxígeno y acetileno*, OAW). Ambos se almacenan a alta presión en tanques de gas y se unen en el soplete. Después de la ignición, en la flama se genera una temperatura de aproximadamente 3 700 K (3 400°C). Se pueden distinguir tres zonas (Fig. 18-21*a*). La combustión primaria se origina en la *zona interna* y genera dos tercios del calor mediante la reacción

$$2C_2H_2 + 2O_2 \rightarrow 4CO + 2H_2 \qquad \textbf{(18-3)}$$

Estos productos de la reacción predominan en la *segunda zona*, y así proporcionan una atmósfera reductora favorable para la soldadura de acero. La combustión completa sucede en la *envolvente exterior* a través de las reacciones

$$4CO + 2O_2 \rightarrow 4CO_2 \qquad \textbf{(18-4)}$$

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O \qquad \textbf{(18-5)}$$

La flama protege suficientemente a los aceros al bajo carbono, al plomo y al zinc, pero se necesita un fundente para la mayoría de los otros materiales. La temperatura relativamente baja de la flama, la habilidad para cambiar la flama de oxidante a neutra e incluso a reductora, y la flexibilidad del control manual adecuan al proceso a todos los

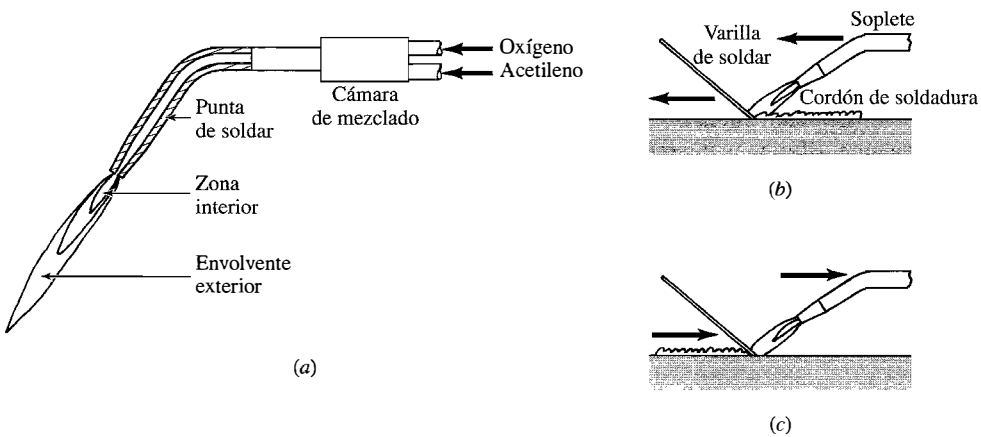


Figura 18-21 Una fuente de calor térmica se emplea en (*a*) la soldadura con oxígeno y gas combustible. Se produce un cordón más amplio en la (*b*) soldadura hacia delante que en la realizada (*c*) hacia atrás.

metales menos los refractarios y los reactivos, como el titanio y el zirconio. El proceso tiene la ventaja de la portabilidad y es utilizable en todas las posiciones de soldado.

El soldador (suponiendo que es diestro) sostiene el soplete en un ángulo determinado respecto a la superficie, y puede mover la varilla de metal de aporte (con su recubrimiento de fundente) fuera del *charco de soldadura* en la *soldadura hacia la izquierda* o *hacia adelante* (Fig. 18-21*b*), precalentando de esta manera el área de la unión y obteniendo una unión relativamente amplia. Cuando el material de aporte se mueve arriba del cordón de soldadura (*soldadura hacia la derecha* o *hacia atrás*, Fig. 18-21*c*), el charco se mantiene caliente por un tiempo mayor y resulta una soldadura más angosta, a menudo de mejor calidad.

Otros gases, incluyendo el propano, el gas natural y el hidrógeno, también se utilizan como fuente de calor, particularmente para el aluminio y los metales de bajo punto de fusión.

Soldadura termita (TW) Cuando un óxido metálico de baja energía libre de formación está en contacto íntimo con un metal de mayor energía libre de formación de óxido, el óxido metálico se reduce en una reacción exotérmica, genéricamente llamada termita. El *polvo Thermit* (una marca registrada de Th. Goldschmidt AG, Essen, Alemania) es una mezcla de un metal y un óxido, por ejemplo, aluminio y óxido de hierro. La reacción, iniciada con un polvo de ignición especial, libera hierro

$$3Fe_3O_4 + 8Al \rightarrow 4Al_2O_3 \text{ (escoria)} + 9Fe \qquad \textbf{(18-6)}$$

Se agregan bolitas de aleación de hierro para reducir la temperatura de reacción hasta alrededor de 2 500°C.

El proceso se aplica para unir secciones pesadas (área mínima de 60 cm^2), como rieles o varillas de refuerzo en el campo. Se construye un molde de arena o semipermanente—completo, con bebedero, compuerta y mazarota—alrededor del área de la unión, el polvo de termita se enciende en un crisol colocado arriba del molde, y el hierro resultante se sangra a través de un agujero en el fondo del crisol, directamente hacia el molde. Después de la solidificación, el molde es destruido y el acero en exceso aún caliente es cortado con cincel. Las barras colectoras eléctricas grandes se sueldan de manera similar, con aluminio y Cu_2O.

18-7-2 Soldadura con haz de alta energía

El calor de la fusión se proporciona al convertir la energía de los electrones o haces de luz incidentes en calor; ya se ha estudiado la aplicación de estos procesos al corte (Secc. 17-5). El mismo procedimiento se emplea para unir, a menos que las densidades de energía sean raramente de más de 10 kW/mm^2, ya que la vaporización y el quemado (agujerado) arruinan la soldadura.

Soldadura por haz de electrones (EBW) El cañón de electrones (Fig. 17-4) ahora funde el metal base (Secc. 17-5-1); el metal fundido delante del agujero de vapor fluye alrededor para llenar la separación, de esta manera se pueden soldar separaciones an-

gostas sin un metal de aporte (aunque se pueden usar varillas de metal de aporte). La zona afectada por el calor es muy estrecha. La mayoría de la soldadura se realiza al alto vacío (EBW-HV) o medio vacío (EBW-MV), pero la operación sin vacío (EBW-NV) también produce soldaduras de alta calidad en muchos materiales. Los procesos son extremadamente adaptables y sobresalen para soldar tanto calibres delgados como secciones gruesas, piezas con espesor disímil, materiales endurecidos o de alta temperatura y materiales distintos. La EBW es propicia para el control automático.

Ejemplo 18-8

Una placa de aluminio 2219 de 12.7 mm de espesor se soldó con haz de electrones y con arco de tungsteno y gas inerte. El cordón de soldadura fue de casi 1.3 mm de ancho en la soldadura EB, y de 7 mm en promedio en la unión GTAW; esta última se hizo en dos pasadas. Se aplicaron las siguientes condiciones:

		GTAW	
	Soldadura EB	**1ª pasada**	**2ª pasada**
Voltaje, V	30 000	11.7	13.0
Corriente, A	0.2	270	270
Velocidad de soldado, mm/s	40	2.75	3,18

Calcule la potencia, energía/mm, y la entrada total de calor para ambos procesos.

		GTAW	
	Soldadura EB	**1ª pasada**	**2ª pasada**
Potencia, kW	6	3.16	3.51
Energía, kJ/mm	0.15	1.15	1.10
Entrada de calor, J/mm	150	1 149	1 104
Entrada total de calor, J/mm	150	2 253	

Así, se necesitó 15 veces más calor para soldar mediante GTAW que con EBW. En GTAW se fundió 5 veces más metal, por lo que la eficiencia fue de alrededor de un tercio de la soldadura EB. Esto demuestra la importancia de la transferencia rápida de calor, que minimiza las pérdidas de calor hacia el entorno y hacia el metal circundante. (Datos de W.J. Farrel, *ASTME Paper SP 63-208.*)

Soldadura por rayo láser (LBW) La energía de un láser (Secc. 17-5-2) se puede emplear para calentar la superficie del material (*modo de conducción limitada*) o para penetrar la profundidad completa de la unión (*modo de penetración profunda* o *soldadura en forma de agujero de cerradura*). Como el calentamiento es una función de la emisividad de la superficie, los láser Nd:YAG de onda más corta son más adecuados

para materiales altamente reflectantes, aunque no se pueden utilizar en vidrio o en polímeros. El láser tiene la ventaja de no precisar vacío. Normalmente, la pieza de trabajo necesita la protección de un gas, excepto para la soldadura de puntos, en la que el tiempo de exposición es muy corto. El oxígeno soplado en la superficie reduce la reflexión de la luz e incrementa la rapidez de remoción para el acero; el gas inerte (N_2 para aluminio, Ar o Ar-He para el titanio) aumenta la transferencia de calor para los metales no ferrosos.

El láser tiene una aplicación creciente, particularmente para metales de calibre delgado. Se logran velocidades de soldado de cerca de 7 m/min en lámina metálica de 1.5 mm de espesor. El proceso es adecuado para la automatización, y ya sea la pieza de trabajo, el láser o el haz, se pueden mover a lo largo de trayectorias prescritas (Fig. 18-22). En relación con la soldadura por resistencia, la posibilidad de acceso desde un solo lado es una ventaja, por ejemplo, en el soldado de tubos hidroformados. Éste es uno de los métodos principales para producir blancos a la medida (Secc. 10-7).

Ejemplo 18-9

En el ejemplo 5-1 se indicó que la carrocería ULSAB tiene una estructura completamente soldada. El número de soldaduras de puntos se reduce en gran medida mediante el uso de blancos hechos a la medida soldados con láser. Seis nodos altamente esforzados, donde los elementos vitales se unen, también se soldaron con láser.



Figura 18-22 Al soldar un miembro de soporte automotor recubierto de zinc, el rayo láser Nd:YAG de onda continua de 2 kW se suministra por medio de una fibra óptica manipulada por un robot. [*Cortesía de Lumonics, Livonia, Michigan.*]

18-7-3 Corte

Una aplicación muy importante de los procesos de soldadura por fusión logra una función exactamente opuesta: se eliminan cabezales, mazarotas y rebabas de las fundiciones, forjas o molduras; pueden cortarse piezas de trabajo de lámina, placa e incluso de secciones pesadas de forma diversa. Hay otras aplicaciones además de las que se muestran en la sección 17-5.

1. Los aceros, precalentados a 850°C, se queman si se les sopla oxígeno. El *corte con oxígeno* está muy difundido en molinos de acero para limpiar superficies (*empalmes*) y cortar palanquillas mientras que el acero aún está caliente.

2. Para aplicaciones generales de corte, primero se precalienta el acero con una flama de oxígeno y gas combustible, y entonces se dirige una corriente de oxígeno a alta presión hacia la zona calentada. La oxidación genera más calor, fundiendo el acero. La fusión es desalojada por la flama y el oxígeno (*corte con flama* o *corte con oxígeno y gas combustible*, OFC). Se cortan placas de 5 a 1 500 mm de espesor. Cuando se agrega polvo de hierro a la corriente de gas (*corte con polvo y oxígeno y combustible* o *corte con polvo de metal*, POC), la oxidación del polvo proporciona el calor requerido para fundir materiales resistentes a la oxidación.

3. En general, se producen cortes de mejor calidad superficial por medio de variantes de los procesos de soldadura. El *corte con arco de plasma* (PAC) con un arco transferido ha adquirido gran importancia para todos los metales, en espesores incluso de más de 25 mm. La calidad del borde cortado es mejor que en el corte con flama, aunque no tan buena como en el EB o con rayo láser (tabla 17-3).

18-8 UNIÓN EN ESTADO LÍQUIDO-SÓLIDO

Cuando la unión se establece sin fusión del metal base, la fuente principal de resistencia es la adhesión entre el material de aporte y el metal base, desarrollada en ausencia de películas superficiales contaminantes. La resistencia de la unión es mayor que la resistencia del material de aporte. Se pueden unir materiales distintos, así como piezas con espesores de pared enormemente diferentes. Una gran ventaja es que no es necesario acceder a todas las partes de la unión; así que se pueden unir simultáneamente ensambles complicados, incluyendo los que consisten de muchas partes. Las técnicas se aplican a la manufactura de millones de radiadores para automóvil, cambiadores de calor de placa y tubo, impulsores, ventiladores y partes de artículos electrodomésticos, y para la unión de tuberías y alambres. Los procesos se dividen un tanto arbitrariamente en *soldadura fuerte* y *soldadura suave*: cuando el *metal de aporte* se funde por debajo de 425°C (800°F), se habla de soldadura suave. En ambos procesos, el metal de aporte penetra la unión por acción capilar (Fig. 18-23) y a ambos se les aplican algunos principios básicos.

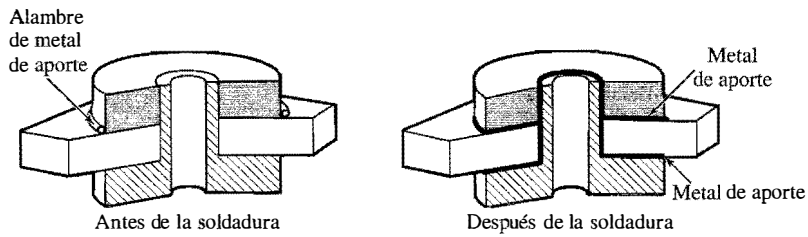


Figura 18-23 Varios componentes se unen simultáneamente al utilizar soldadura fuerte; el metal de aporte se distribuye mediante acción capilar. (*De Metals Handbook, 8a. ed., vol. 6, AMS International, 1971, p. 607. Con permiso.*)

18-8-1 Enlace

El enlace líquido-sólido tiene, en muchas formas, propiedades únicas que se pueden desarrollar sólo si se satisface una variedad de condiciones. Frecuentemente, el metal de aporte es sustancialmente más débil que el metal base, y la junta deriva su resistencia del soporte que recibe de este metal. Para esto, se deben cumplir dos criterios:

1. *Espesor de la unión.* En una capa gruesa, dominarían las propiedades volumétricas del material de aporte. Para mayor resistencia, la capa debe ser tan delgada que la restricción proporcionada por el metal base evite la estricción en tensión. La unión es más débil al corte, pero aún más resistente que el material de aporte ya que la capa delgada se somete a un esfuerzo cortante muy alto.

2. *Enlace.* Se desarrolla una resistencia completa únicamente si existe un enlace interatómico perfecto entre el metal base y el de aporte. Como se analizó en la sección 4-9-2, las superficies suelen estar cubiertas con óxidos y capas adsorbidas de la atmósfera, y también pueden estar presentes residuos de lubricantes de etapas de procesamiento previas. Para asegurar el enlace, las superficies se deben humedecer con el material de aporte (Secc. 6-3-2); de otra manera, la unión se convierte en una grieta que fallaría a cargas muy bajas.

Estas dos condiciones gobiernan la práctica de la soldadura fuerte y de la suave.

Separación La separación entre las superficies de acoplamiento es crítica. Si es demasiado pequeña, el material de aporte no puede penetrar y se forman uniones imperfectas; si es demasiado grande, el soporte recibido del metal base se pierde gradualmente. Sólo dentro de un rango estrecho de separaciones se desarrollan las máximas propiedades (Fig. 18-24). Esta separación debe existir a la temperatura de unión; por lo tanto, la dilatación diferencial se debe tomar en cuenta cuando se unen materiales disímiles. Con la separación óptima, el material de aporte penetra en la separación por *acción capilar* (Fig. 18-23). También se debe controlar la rugosidad superficial; una rugosidad ligera abre pasajes para la fusión, pero en una superficie muy rugosa únicamente se unirían las asperezas.

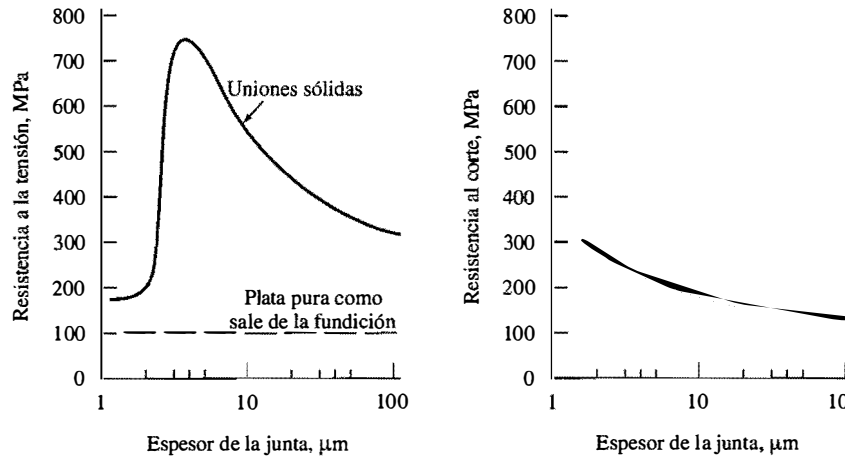


Figura 18-24 La resistencia (a) a la tensión y (b) la resistencia al cortante de las uniones unidas por soldadura fuerte depende críticamente del espesor de la unión. (Unión a tope soldada con plata en varillas de acero de 12.7 mm de diámetro; datos de *Brazing Handbook, 4a. ed., American Welding Society, 1991.*)

Metal de aporte La acción capilar es factible solamente si el material de aporte humedece al metal base [típicamente, el ángulo de contacto en la ecuación (6-6) debe estar entre 15° y 45°]. El metal de aporte debe tener alta fluidez para penetrar las hendiduras (pero no tan elevada que lo haga escurrir fuera de la unión) y preferiblemente un rango estrecho de fusión (metal puro o eutéctico). En aleaciones de amplio rango de solidificación, la fase de bajo punto de fusión puede fundirse prematuramente, y tal *licuación* puede relegar al constituyente de punto de fusión más alto. En general, las aleaciones con un mayor rango de temperatura de fusión requieren un claro mayor. El material de aporte se aplica en forma de alambre, cinta, preformas, polvo o pasta al área de la unión, que luego se calienta localmente o calentando todo el ensamble. Se puede colocar fuera de la futura unión (*local*, Fig. 18-23*a*) o dentro de ella (*precolocada*). Alternativamente, el metal de aporte se aplica previamente a la superficie de una de las piezas en contacto como un recubrimiento (revestimiento), con frecuencia mediante el laminado, Fig. 18-4*c*), deposición electrolítica o inmersión en un baño caliente. Al elegir el metal de aporte, se consideran las condiciones de servicio. En particular, el metal de aporte no debe causar corrosión galvánica.

Fundente Las películas superficiales que evitarían la humectación deben ser eliminadas desengrasando; los óxidos pesados se retiran por medios mecánicos o químicos. Para evitar la oxidación durante la unión, se aplica una atmósfera protectora o vacío, o el calentamiento a la temperatura de fusión se mantiene muy corto. En muchos casos todo esto es insuficiente para asegurar la humectación; entonces se emplean fundentes. Un buen fundente se funde a una temperatura suficientemente baja para evitar la oxidación de los materiales de base y de aporte; tiene baja viscosidad, de manera que es reemplazado por el metal de aporte fundido; puede reaccionar con las superficies para

facilitar la humectación; protege la unión mientras el material de aporte aún está líquido, y es relativamente fácil de quitar después de la solidificación del material de aporte. Los fundentes se encuentran en forma de polvo, pasta o lechada. En general, se necesitan atmósferas fuertemente reductoras o fundentes más activos cuando se forman óxidos estables, como en aluminio, el magnesio, las aleaciones resistentes al calor y los aceros inoxidables. Idealmente, se pueden dejar residuos en el ensamble terminado. Si causaran corrosión, se tienen que eliminar, una tarea que puede ser difícil si hay espacios estrechos en el ensamble.

Calentamiento Muy frecuentemente las partes que se van a unir se fabrican de lámina metálica, aunque también pueden ser componentes forjados, extruidos o fundidos. Se ensamblan y se mantienen unidos temporalmente en la posición correcta por medio de aditamentos o por sujeción mecánica como expansión, estacado, estampado, etcétera. El diseño de algunos ensambles asegura el posicionamiento correcto y los hace autofijantes. Es factible emplear una gran variedad de técnicas de calentamiento, cada una con ventajas especiales. La mayoría de las técnicas se mecanizan o automatizan fácilmente.

1. El *calentamiento en horno* es un proceso para producción en masa, con ensambles colocados en un horno de caja o, para una rapidez de producción mayor, transportados a través de un horno continuo en bandas, transportadores de rodillos o ganchos de suspensión. Se puede aplicar una atmósfera protectora.

2. El *calentamiento con soplete* permite el calentamiento selectivo del área de la unión con una flama de acetileno, propano o de gas natural. Es adecuado para la operación manual, pero se mecaniza fácilmente.

3. En el *calentamiento por resistencia* se utiliza el mismo equipo que en la soldadura por resistencia (Secc. 18-5), aunque se coloca un material de aporte en la unión. El calentamiento rápido minimiza la oxidación.

4. El *calentamiento por inducción* con una fuente de poder típicamente de 10 a 460 KHz tiene las mismas ventajas que el realizado por resistencia.

5. El *calentamiento infrarrojo* con lámparas de cuarzo de alta intensidad es adecuado para la operación del tipo de banda transportadora pero, si se requiere, el calor se puede concentrar en el área que se va a calentar. Esto también se aplica al *calentamiento por microondas*.

6. El *calentamiento con rayo láser o con haz de electrones* se justifican mayormente para ensambles de precisión de alto valor, para materiales de temperatura relativamente alta.

18-8-2 Soldadura fuerte

Los metales de aporte comunes se listan en la tabla 18-1 para varias clases de metales base. En general, los metales de aporte de punto de fusión más alto proporcionan mayor resistencia, pero la temperatura elevada de soldado puede afectar la resistencia del me-

Tabla 18-1 Metales de aporte usados para la soldadura fuerte*

	Metal de aporte para soldadura fuerte		
Designación AWS	**Composición, % peso**	**Temperatura para soldadura, °C**	**Metal base**
BCu-1	99.9Cu-0.075P	1 100-1 150	Acero (< 0.3% C); acero de baja aleación
BCuP-2	92.75Cu-7.25P	820-870	Aleaciones de cobre
BAg-1	45Ag-15Cu-16Zn-24Cd	620-760	Acero al carbono; acero de baja aleación; hierro fundido; acero inoxidable; aleaciones de cobre
BAg-5	45Ag-30Cu-25Zn	735-845	
RBCuZn-D	48Cu-42Zn-10Ni	950-970	Acero al bajo carbono; acero de baja aleación; WC
BNi-2	74Ni-3B-7Cr-4.5Si-3Fe-0.06C	1 010-1 175	Acero inoxidable, acero de baja aleación; acero de herramienta
BAu-1	37Au-63Cu	1 015-1 090	Acero inoxidable, acero de baja aleación; acero de herramienta
BA1Si-3	Al-10Si-4Cu-0.15Cr-0.2Zn-0.15Mg	570-605	Aleaciones de aluminio (soldadura fuerte con fundente)
BA1Si-7	Al-10Si-0.25Cu-0.2Zn-1.5Mg	590-605	Aleaciones de aluminio (soldadura fuerte al vacío)

*Compilada de *ASM Handbook*, vol. 6, *Welding, Brazing, and Soldering*, ASM International, 1993.

tal base. Al soldar acero con cobre, la separación es cero o incluso negativo; con otros materiales, la soldadura procede con una separación que es comúnmente pequeña y positiva. Con aleaciones de aluminio o magnesio, el punto de fusión del metal de aporte es cercano al del metal base, de ahí que no se utilice el calentamiento por inducción. Pequeñas adiciones de Mg a las aleaciones de aluminio son benéficas, ya que el Mg actúa como un reductor (captura el oxígeno) y modifica la película de óxido. A menudo el material de aporte se aplica como un revestimiento de 5 a 10% del espesor a uno o ambos lados de una lámina (una aleación de Al-Si para aluminio, Cu para acero y acero inoxidable). El carbono superficial evitaría la humectación de los hierros fundidos y se debe eliminar mediante un tratamiento electrolítico o por un baño de las piezas en sal fundida.

Las temperaturas mayores aceleran la oxidación; por lo tanto, los fundentes tienen que ser más agresivos. Éstos se componen de boratos, fluoruros, cloruros y materiales similares en varias proporciones. Hechos a la medida para aplicaciones específicas, aseguran uniones perfectamente humectadas (Fig. 18-25). En la *soldadura al vacío*, la presión en el horno se reduce para evitar la oxidación y, en algunos casos, no se necesita fundente. Hornos especialmente construidos permiten el desengrasado por vaporización previo a la iniciación del proceso de soldadura al vacío.

La *soldadura por inmersión* deriva el calor de la inmersión del ensamble en sal fundida. La rapidez de calentamiento es alta y la sal puede realizar la función fundente. La *soldadura fuerte amplia* difiere de la soldadura fuerte normal en que una separación mucho más ancha se rellena con el metal de aporte (principalmente latón) con la ayuda de un soplete, y así la acción capilar no tiene ninguna función. Además del ensamble, también se usa para reparaciones de fundiciones de acero e hierro. La *soldadura fuerte por difusión* difiere de la soldadura por difusión en que una capa líquida se forma mientras ocurre la difusión.

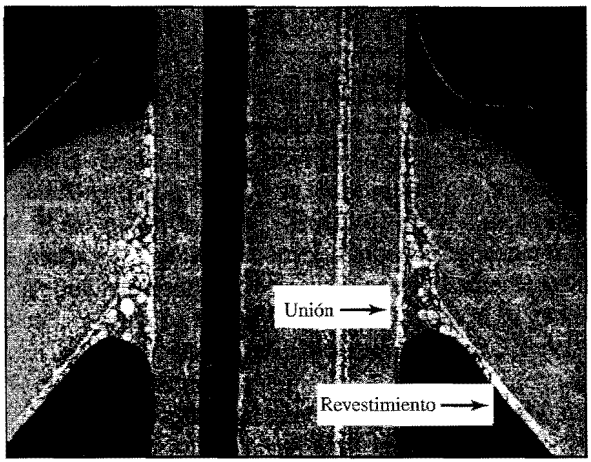


Figura 18-25 Con la ayuda de un fundente especial, el metal de la soldadura fuerte fluye del revestimiento al metal base para rellenar la unión en un cambiador de calor de aluminio.

El *enfriamiento controlado* de los ensambles soldados con soldadura fuerte es necesario para asegurar la rápida solidificación, pero sin causar la distorsión del ensamble o el agrietamiento de la unión.

18-8-3 Soldadura blanda

Las uniones realizadas con *soldadura blanda* son de menor resistencia que las hechas con soldadura fuerte, pero las piezas se pueden unir sin exponerlas a calor excesivo. La temperatura menor hace una buena humectación más crítica que en la soldadura fuerte. Por lo tanto, la preparación superficial por medios mecánicos y químicos y el uso de fundentes son esenciales.

El metal de aporte (*soldadura*) se elige en referencia a los diagramas relevantes de fase. La solubilidad sólida es un signo de buena humectación, aunque la presencia de películas superficiales modifica en gran medida el comportamiento. Una superficie que aparenta estar recubierta uniformemente por la soldadura aún se puede deshumectar al recalentar. Así, la *soldabilidad* es una propiedad tecnológica que sólo se puede determinar experimentalmente. Los metales preciosos y el cobre se sueldan fácilmente; el hierro y el níquel requieren fundentes más agresivos; los óxidos tenaces de aluminio y cromo dificultan la soldadura de las aleaciones de aluminio y de los aceros al alto cromo. El hierro fundido, el titanio, el magnesio y los cerámicos (incluyendo el grafito) requieren prechapado.

Las soldaduras más ampliamente usadas eran las aleaciones de estaño-plomo (tabla 18-2). Un contenido bajo de estaño (<5%) proporciona mayor resistencia y todavía se utiliza extensamente para radiadores automotrices y tubos fabricados de hojalata. El amplio rango de congelamiento de la aleación de 35% Sn la hace ideal como soldadura de frotamiento para la unión de tubos de cobre. La composición eutéctica (63% Sn) tiene, por definición, el punto de fusión más bajo y solidifica a una temperatura constante, por lo que es la indicada para conexiones eléctricas. La toxicidad del plomo ha

Tabla 18-2 Soldaduras blandas selectas*

Composición	Rango de fusión	
	Liquidus, °C	Solidus, °C
Sn-5Pb	240	233
Sn-30Pb	193	183
Sn-37Pb	183	183
Sn-50Pb	216	183
Sn-58Pb-2Sb	231	185
Sn-95Pb	312	308
Pb-5.5Ag-0.25Sn	380	304
Sn-4Ag	221	221
Sn-5Sb	240	233
Sn-9Zn	199	199
Sn-50In	125	117
Zn-5Al	382	382

*Compilada de *ASM Handbook*, vol. 6, *Welding, Brazing, and Soldering*, ASM International, 1993.

apresurado su completa eliminación de las uniones de tuberías de agua domésticas, del equipo de preparación de alimentos y de recipientes para productos alimenticios; las soldaduras de Sn-Ag y Sn-Sb se emplean para aplicaciones de alimentos y para acero inoxidable. Debido al peligro para los operadores, las soldaduras de plomo se han reemplazado o están siendo reemplazadas con soldaduras libres de plomo en muchas otras aplicaciones. Los metales recubiertos, especialmente la hojalata, facilitan la soldadura. Una gran variedad de otras soldaduras sirven para aplicaciones específicas. En particular, las aleaciones de Sn-Zn y Zn-Al fueron desarrolladas para la soldadura de aluminio en conjunto con fundentes especiales.

Para trabajo general con soldaduras con base de estaño, el *fundente* es una solución acuosa de cloruro de zinc (o de cloruro de Zn + Na + amoniaco) y se debe desalojar para evitar la corrosión. Las resinas orgánicas no corrosivas son esenciales para conexiones eléctricas donde la corrosión crearía alta resistencia local e incluso pérdida de conducción.

La soldadura se puede llevar a cabo por medio de todas las técnicas previamente descritas en la sección 18-8-1. Debido a las bajas temperaturas implicadas, se usa ampliamente una punta de cobre calentado o de cobre chapado en hierro (*cautín*). Las soldaduras de baja temperatura son *bombeadas* para inundar el área de la unión. La agitación del baño de soldadura fundida por medio de ondas ultrasónicas mejora la humectación en la *soldadura por inmersión*, una técnica particularmente útil en la soldadura de aluminio, al igual que lo son las técnicas en que la superficie que se va a unir se frota (por ejemplo, por un transductor ultrasónico) mientras la soldadura se fluye hacia ella. Se emplean métodos especiales en la industria electrónica (Secc. 20-4-3).

18-9 UNIONES ADHESIVAS

Todos los procesos que se han analizado hasta este punto utilizan un metal para establecer la unión entre dos piezas metálicas o cerámicas. El *enlace adhesivo* se distingue porque el material de la unión es un polímero o, con menor frecuencia, un cerámico. La aleación no es posible, y la resistencia de la unión se basa completamente en la adhesión del adhesivo con el sustrato de metal o de polímero, y en la resistencia misma del adhesivo. La adhesión entre las superficies de metal y de polímero no se ha comprendido completamente, pero es claro que únicamente las fuerzas secundarias de enlace tienen una función. La resistencia a la unión es, en general, menor que cuando se establecen enlaces primarios (metálicos, covalentes o iónicos,) y esto debe ser considerado en el diseño de las uniones.

La unión adhesiva tiene muchas ventajas: sólo implica bajas temperaturas, así que no ocurren cambios indeseables en la mayoría de los materiales de los sustratos; la superficie exterior permanece lisa; se pueden unir materiales disímiles y calibres delgados; el adhesivo contribuye a la adsorción de energía en las cargas de impacto y en la presencia de vibraciones, y es posible realizar ensambles complejos a bajo costo.

La tecnología de las uniones adhesivas ha avanzado hasta el punto donde se pueden construir confiablemente estructuras de soporte de carga. Las aplicaciones incluyen estructuras críticas como las superficies de control y fuselajes completos de aeronaves, además de un sinnúmero de aplicaciones en los campos automotriz, de artículos electrodomésticos y de consumo. Asimismo, los adhesivos se usan también para sellar, amortiguar vibraciones, aislar y para otras aplicaciones no estructurales. Aquí nuestro interés son las aplicaciones de soporte de carga, para las que se emplea una clase de adhesivos denominada *adhesivos estructurales.*

18-9-1 Características de los adhesivos estructurales

La terminología es un poco imprecisa, pero un adhesivo estructural es el que establece una *unión permanente* entre dos partes de mayor resistencia (*adherendos*). Se espera que la unión retenga su capacidad de soporte de carga durante un largo periodo, bajo una gran variedad de condiciones ambientales, a menudo hostiles. De esta manera, un adhesivo estructural debe poseer un número de atributos deseables; muchos de éstos están ligados a las propiedades de los polímeros, y un repaso del capítulo 13 puede ser útil en este punto.

1. El adhesivo debe tener suficiente *resistencia cohesiva* a la temperatura de servicio. La resistencia al corte está gobernada por la composición (Fig. 18-26) aunque, para aplicaciones a largo plazo, la resistencia a la termofluencia —que generalmente es menor que la resistencia a corto plazo— es de gran interés. Muchos adhesivos son termofijos y en ellos el grado de enlazamiento cruzado se puede incrementar para elevar la resistencia a la termofluencia, aunque normalmente a costa de la flexibilidad del enlace. Por ejemplo, en los epóxicos una separación promedio de los enlaces cruzados de < 2 nm proporciona un enlace fuerte pero frágil; se obtiene alguna tenacidad aumentando la

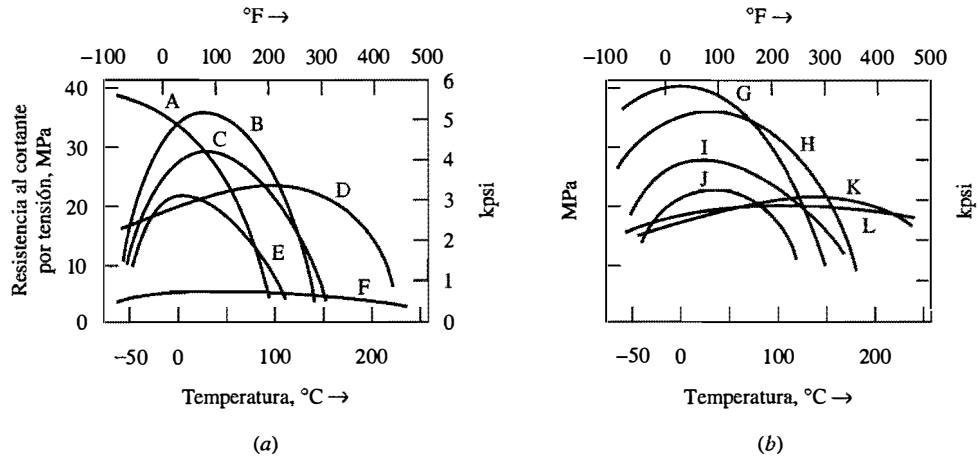


Figura 18-26 La resistencia al cortante de los adhesivos declina rápidamente a una temperatura que depende de la composición, y limita su rango de aplicación. (a) Adhesivos en pasta y líquidos, (b) adhesivos en cinta, película, y con base de solventes. A: uretano + amina de dos componentes; B: epóxico de un componente modificado con caucho; C: una parte de epoxi, del tipo de propósito general; D: epóxico de un componente, tipo resistente al calor, E: epóxico-poliamida de dos componentes curados a temperatura ambiente; F: sellador de silicón; G: nylon-epóxico; H: nitrilo-epóxico; I: nitrilo-fenólico; J: vinilo-fenólico; K: epóxico-fenólico; L: polimida. (*Reimpresa de J.C. Bolger, en Adhesives in Manufacturing, Dekker, 1983, p. 142, por cortesía de Marcel Dekker Inc.*)

separación hasta aproximadamente 3 nm, y a > 3 nm el enlace se vuelve suave y flexible. La resistencia a la termofluencia también se incrementa al agregar rellenos. Éstos son particularmente importantes en los termoplásticos, pero también se usan para mejorar las propiedades de impacto de los termoestables.

2. El adhesivo debe ser capaz de *distribuir los esfuerzos* impuestos en el servicio. La flexibilidad ayuda a reducir las concentraciones de esfuerzos que se originan de las cargas mecánicas, da mayor resistencia a la fatiga a la unión adhesiva y evita la separación catastrófica repentina en el caso de la falla de la unión. Aun en ausencia de cargas mecánicas, los esfuerzos se generan durante el ciclo térmico porque los polímeros tienen, en general, coeficientes de dilatación térmica mayores que los metales (tabla 4-1). De nuevo la flexibilidad es útil y los rellenos se emplean para reducir la dilatación térmica hasta en 75%.

3. El adhesivo no debe sufrir *degradación* como la división de las cadenas mediante agua (hidrólisis) o por la radiación ultravioleta, oxidación, quemado, agrietamiento, pérdida de coherencia a la temperatura de operación (degradación térmica) o agrietamiento por corrosión con esfuerzo o disolución en ciertos medios.

4. Muchos adhesivos se aplican como líquidos, por lo que deben tener una *viscosidad* suficientemente baja para fluir dentro de las áreas de unión, pero no tanto que se pierdan. Con los termoplásticos se requiere calentamiento por arriba de la T_g; con los

termofijos se emplea un prepolímero que forma enlaces cruzados y polimeriza después de la aplicación. Resulta útil una disminución temporal de la viscosidad en el cortante (*tixotropía*).

5. El desarrollo de los enlaces adhesivos requiere *humectación* de las superficies adheridas. La humectación es un fenómeno superficial, que depende en gran medida de la naturaleza de la superficie adherida, de la presencia de películas superficiales adsorbidas y de la migración de ciertos componentes del adhesivo a la superficie. En algunos casos, puede ocurrir una pérdida de adhesión repentina y catastrófica después de algún tiempo.

18-9-2 Tipos de adhesivos y su aplicación

Las uniones estructurales de alta calidad se establecen solamente si todas las fases del proceso están completamente controladas.

1. El *diseño de la unión* debe reconocer las limitaciones del enlace adhesivo (Secc. 18-11).

2. La *preparación superficial* es crucial. Las películas orgánicas superficiales son dañinas con la mayoría de (pero no con todos) los adhesivos. Las películas de óxido son perjudiciales si se encuentran unidas débilmente, en tanto que una película porosa de óxido o un recubrimiento de conversión fuertemente enlazados son útiles. Se han desarrollado técnicas especiales de preparación superficial para evitar la adhesión y para prevenir reacciones indeseables que originen la separación del enlace a largo plazo. Los imprimadores y los promotores de la adhesión son necesarios cuando existe un retraso entre la preparación de la superficie y la aplicación del adhesivo.

3. La *rugosidad superficial* puede ser deseable porque proporciona un área mayor de contacto y un entrelazado mecánico. Sin embargo, es difícil eliminar las películas superficiales de los valles; también se puede atrapar aire, y entonces el enlace está limitado a las asperezas.

Los adhesivos a menudo se clasifican por su modo de acción o agrupamiento químico; para nuestro propósito, es más relevante la clasificación según el método de aplicación.

Métodos de aplicación Un buen enlace adhesivo es, en general, más fuerte que la resistencia (de cohesión) del cuerpo más débil, que puede ser uno de los adherendos o el adhesivo mismo. Por lo tanto, normalmente se obtiene la resistencia máxima con películas adhesivas muy delgadas, aunque no demasiado. Esto se asegura al utilizar método de aplicación adecuado.

1. Los *adhesivos de fusión caliente* son polímeros termoplásticos. Para asegurar humectación y alta fluidez, el polímero se calienta muy por encima de su T_g y se aplica en cordones o redes, con el equipo apropiado, a las superficies que se van a unir. El enfriamiento rápido establece un enlace. La flexibilidad de la unión es controlada eligiendo un polímero adecuado. La resistencia al agua es alta, pero la resistencia al calor

y a la termofluencia tienden a ser bajas; las poliamidas y los poliésteres son adecuados para aplicaciones de alta temperatura. Hay muchas aplicaciones en las industrias de la construcción, empaque, mobiliario y del calzado.

2. Las *cintas y las películas* de polímeros termofijos se aplican a temperatura ambiente y se curan a temperatura elevada. Se componen de un polímero central de alto peso molecular como el vinilo flexible, el neopreno o el caucho nitrilo, y de una resina de encadenamiento de bajo peso molecular como un epóxico o un fenólico curados con un catalizador. Para evitar la falta de adhesivo, se utiliza una malla de soporte del material de refuerzo, como la fibra de vidrio. Se aplica presión y se producen uniones confiables de buena tenacidad. Varios miles de kilogramos de esos adhesivos se emplean en la construcción de una aeronave grande. La técnica también se aplica a la unión de recubrimientos de frenos, laminación de vidrio de parabrisas y para una variedad de aplicaciones en la construcción.

3. Las *pastas* consisten de polímero y con frecuencia también contienen rellenos. Las clases que se encuentran más frecuentemente son epóxicos de dos componentes con curado a temperatura ambiente, epóxicos de un componente, acrílicos o poliuretanos flexibles para curado con calor, a los que se les agrega el catalizador justo antes de la aplicación. A menudo se emplean para unir elastómeros, fibras, telas y plásticos reforzados con fibra a acero en las industrias automotriz y de artículos electrodomésticos, así como para pegar metal con metal. Se aplican mediante sistemas diseñados para manejar fluidos de alta viscosidad.

4. Los *adhesivos anaeróbicos* son líquidos monoméricos que tienen la propiedad inusual de curado en la exclusión de aire. Se almacenan en recipientes permeables al aire y curan cuando se aplican a una separación mínima que excluye oxígeno. De ahí que se usen ampliamente como selladores y para sostener roscas y otros sujetadores (por ejemplo, Loctite, una marca registrada de la Loctite Corporation).

5. Los *adhesivos de curado por humedad* incluyen los cianocrilatos, que son fluidos de baja viscosidad que curan en contacto con superficies húmedas u oxidadas (por lo que se pegan instantáneamente a la piel humana). Tienen baja resistencia al desprendimiento y a la temperatura, pero son útiles en la industria electrónica y para pegar caucho o plástico a metal. Algunos poliuretanos y siliconas también se curan con humedad.

6. Los adhesivos *líquidos* suelen contener un solvente. Así, los plastisoles de PVC, algunas veces fortificados con un epóxico, se usan para ensamblar cofres de automóviles, tapas de cajuelas, techos, mobiliario y gabinetes de artículos electrodomésticos. Se pueden aplicar por medio de una brocha, por rocío, impresión, etcétera, pero el solvente puede crear un problema ambiental.

7. Las *emulsiones acuosas* de polímeros, como el acetato de polivinilo (pegamento blanco) necesita un sustrato poroso para permitir la remoción del agua.

8. Los *adhesivos conductores* representan una clase separada. Para la conducción eléctrica, el plástico (normalmente epóxico) se rellena con hasta 85% de hojuelas de plata; para conducción térmica, se agrega hasta 75% de polvo de cerámico (alúmina).

A partir del análisis anterior, resulta evidente que la unión adhesiva es un sistema compuesto por adherentes, óxido de metal, imprimador, adhesivo y el entorno. Por lo

tanto, en todos los casos es crucial el control total de la aplicación. En aplicaciones críticas, como en la construcción de aeronaves, la presencia y continuidad de los enlaces es verificada por medio de técnicas NDT.

18-10 UNIÓN DE PLÁSTICOS Y CERÁMICOS

En muchos casos se aplican consideraciones especiales cuando se van a unir piezas no metálicas.

18-10-1 Unión de plásticos

Las partes hechas de plástico se unen una a la otra o a metales por medio de variantes de las técnicas ya analizadas.

1. En la *sujeción mecánica* se emplean tornillos plásticos o metálicos, colocados en protuberancias o agujeros moldeados (algunas veces cortados) en la pieza, o en insertos metálicos moldeados dentro de la pieza plástica. La unión se diseña para minimizar los efectos de la termofluencia; de esta manera, por ejemplo, deben evitarse los tornillos avellanados. Los ajustes elásticos se usan ampliamente.

2. El *sellado y unión térmicos* de los polímeros termoplásticos se basan en calor y en la presión. Igual que en la soldadura a presión de metales, las superficies deben estar limpias, y es útil la deformación localizada que rompe las películas superficiales adsorbidas. Sin embargo, en contraste con los metales, el polímero suele fundirse. Se emplean varias técnicas:

a. La *soldadura con herramienta* o *con rodillo caliente* es adecuada principalmente para piezas delgadas, puesto que los polímeros son malos conductores de calor. Por ejemplo, el LDPE se sella por calor con herramientas recubiertas de PTFE, calentadas eléctricamente.

b. La *unión por fricción* se basa en la generación de calor en la interfase, ya sea por rotación (*soldadura girada*, como en la Fig. 18-8*a*) o por *vibración*. Ésta puede ser una *oscilación de baja frecuencia* (de 100 a 500 Hz) impuesta por medios mecánicos, o *ultrasónica* (de 20 a 40 kHz, como en la Fig. 18-5*c*).

c. La *soldadura por alambre caliente* proporciona calentamiento localizado al incorporar un alambre de resistencia en el área de la unión. Los extremos del alambre deben sobresalir de manera que se pueda pasar corriente. Una espira cerrada de alambre puede calentarse inductivamente (como en la unión de las hojas de cuchillos a los mangos). Una vez que el polímero se funde, las partes son presionadas conjuntamente.

d. La *soldadura con gas caliente* es el equivalente a la hecha con soldadura con oxígeno y gas combustible (Fig. 18-21), excepto que la fuente de calor es aire (o gas inerte) caliente. La unión se prepara, se bisela como en los metales y se usa una varilla de material de aporte del mismo termoplástico que las piezas.

e. La *soldadura infrarroja enfocada* se basa en el calor de una lámpara infrarroja orientada mediante reflectores para formar un haz angosto (1.5 a 3 mm).

f. El *calentamiento dieléctrico* surge cuando los polímeros, que son aislantes, se colocan en un campo electromagnético. Se utilizan frecuencias de 13 a 100 MHz (más frecuentemente, 27.12 MHz, la frecuencia designada por la Federal Communications Commission); en consecuencia, también se habla de calentamiento de *radiofrecuencia* (rf) o *alta frecuencia* (hf). Los polímeros con un factor de pérdida dieléctrica alta, como PVC, ABS, nylon, poliuretano y caucho, se calientan completamente y son los más adecuados.

g. El enlace *electromagnético* y el *sellado térmico magnético* son posibles al embeber partículas magnéticas muy pequeñas (de cerca de 1 μm de diámetro) en el polímero. Cuando se aplica un campo de alta frecuencia, el polímero se calienta y funde debido al calentamiento por inducción de las partículas. Éstas suelen limitarse a un cordón de termoplástico, colocada en la futura unión.

3. La unión *adhesiva* es el más versátil de todos los métodos de unión, adecuado para termoplásticos, termofijos, materiales disímiles, combinaciones polímero-metal y cerámico-metal, e incluso para la unión de estructuras manufacturadas y naturales (por ejemplo, coronas metálicas o cerámicas en dientes, o implantes en hueso). El cemento puede ser un monómero (como para el PMMA), un elastómero o un termofijo. Entonces se elige el adhesivo óptimo en consideración a los requerimientos de servicio y el método de aplicación (brocha, rodillo, estarcido, rocío, etcétera) según las necesidades de manufactura. La preparación superficial es crítica.

4. La *soldadura con solventes* proporciona un enlace fuerte cuando un polímero termoplástico (especialmente uno amorfo) tiene un solvente específico como, por ejemplo, el ABS, PVC, PMMA, el policarbonato y el poliestireno.

5. El *cocurado* establece la unión al mismo tiempo que cuando las piezas plásticas (o un compuesto con base de polímero) se curan.

Los métodos anteriores, con algunas modificaciones, también se aplican a la unión de compuestos con base de polímeros.

18-10-2 Unión de cerámicos

Un campo importante y de desarrollo rápido es la unión de cerámicos entre sí y a metales. Se originan problemas especiales a partir de la estructura, la inercia química y el punto de fusión muy alto de muchos cerámicos.

Los carburos o, más exactamente, los carburos sinterizados se sueldan con soldadura fuerte rutinariamente con un metal de aporte Ag, Cu o Ag-Ni, ya que la presencia de un aglutinante de Co o Ni permite que se forme esencialmente una unión metal-metal.

Los vidrios se pegan fácilmente unos con otros simplemente calentándolos a la temperatura de suavizado y luego aplicando presión, como en la soldadura de estado sólido de metales. Los sellos vidrio-metal son posibles porque los iones metálicos pe-

netran a la red cristalina del vidrio; la preocupación principal es un acoplamiento del coeficiente de dilatación térmica (de ahí el uso de Invar o Kovar, tabla 4-1).

Los cerámicos se pueden unir a los metales después de *metalizarlos*. Para la alúmina, el *proceso moly-manganeso* (Mo-Mn) es el más común. Una lechada de Mo, MoO_3, Mn, MnO_2 y compuestos formadores de vidrio se aplican a la superficie. Hornear a cerca de 1 500°C provoca la formación de una capa vítrea unida con la fase vítrea de la frontera de grano en la alúmina. Después del chapado con Ni, es posible la soldadura fuerte con metales de aporte. En la *soldadura fuerte activa*, el material de aporte contiene elementos químicamente reactivos, principalmente Ti, y se aplica directamente al cerámico. El *enlace por difusión* también es aplicable a las uniones metal-cerámico y cerámico-cerámico, algunas veces con una entrecapa metálica. Muchos procesos son altamente especializados y más allá del alcance de nuestros análisis.

18-11 CAPACIDADES DEL PROCESO Y ASPECTOS DEL DISEÑO

Como en cualquier diseño, los potenciales y limitaciones de los procesos de unión se deben tomar en cuenta junto con los requisitos de servicio. Las limitaciones impuestas por el proceso elegido se detectarán a partir del entendimiento de los procesos mismos, en la tabla 18-3 se proporciona una guía general. Las uniones mecánicas se analizan en la sección 18-2; aquí los comentarios están limitados a las soldaduras por fusión y a las uniones con soldadura fuerte, suave y a los enlaces adhesivos que, como un grupo, están sujetos a condiciones similares.

Modos de carga En el servicio, los ensambles comúnmente se exponen a patrones complejos de carga pero, desde el punto de vista del diseño y de la prueba, se pueden reconocer varios modos básicos de carga:

1. *Carga normal.* La unión es sometida a carga de tensión o de compresión puras (Fig. 18-27*a*).

2. *Carga cortante.* La unión se somete a cortante puro. Esto sólo es posible en una unión doble de traslapo (Fig. 18-27*b*). La resistencia del traslapo es la fuerza soportada por una unión de ancho unitario (N/mm). Una unión de traslapo sencillo se somete a un momento que, si es suficientemente grande, causa deformación (Fig. 18-27*c*), que a su vez conduce a un estado de esfuerzos más complejo, en particular, a un incremento en el esfuerzo en los extremos de la unión. La resistencia del traslapo no aumenta más allá de una cierta longitud de traslapo L, y la resistencia del ensamble solamente se eleva incrementando el ancho de la unión de solapa.

3. *Escición.* La unión se somete a fuerzas equilibradas de tensión que la abren perpendicularmente a su plano (Fig. 18-27*d*). La resistencia a la escisión es la fuerza necesaria para separar una probeta de ancho unitario (N/mm).

4. *Desprendimiento.* La unión es separada por una fuerza de tensión que dobla y separa progresivamente uno de los adherendos (el flexible, Fig. 18-27*e*). La resistencia

Tabla 18-3 Características generales de los procesos de soldadura

	Proceso de soldadura							
	Soldadura con arco							
Características	**W y gas**	**Gas y metal**	**Metal protegido**	**Núcleo fundente**	**Sumergida**	**Oxiacetileno**	**Haz de electrones**	**Rayo láser**
Pieza (ensamble)								
Material	Todos excepto Zn	Todos excepto Zn	Todos excepto Zn	Todos los aceros	Todos los aceros	Todos excepto metales refractarios	Todos excepto Zn	Todos excepto Zn
Preferido	Todos excepto Zn	Aceros; Cu; Al no tratado térmicamente	Aceros	Aceros al bajo C	Aceros al bajo C	Hierro fundido; aceros	Todos excepto Zn	Todos excepto Zn
Espesor mín., mm	0.2	0.5	(1.5) 3	1.5	5	0.6	0.05	0.05
Una pasada, máx	5	5	8-10	3-6	40	10	75	25 (acero) 12 (Al)
Pasadas múltiples, máx	> 6	> 25	> 25	> 15	> 200	> 20		
Distorsión*	B-C	B-C	A-B	A-C	A-B	B-D	C-E	C-E
Posicionamiento necesario	Variable	Variable	Mínimo	Mínimo	Completo	Mínimo	Completo	Completo
Remoción de escoria para pasadas múltiples	No	No	Sí	Sí	Sí	No		
Corriente								
Tipo	DCEN, ca para Al	DCEP	ca o cd	DCEP	ac o dc			
Volts	60-150	20-40 o 70	40 o 70	40-70	25-55		30-175 kV	
Amperes	100-500	70-700	30-800	30-800	300-2 500		0.05-1	
Costo*								
Equipo	B-C	B-C	C-D	B-D	B-C	D-E	A	A-B
Mano de obra	A-C	A-C	A	A-D	B-D	A	A-D	A-D
Acabado	B-E	B-D	A-B	A-C	A-C	A	C-E	C-E
Producción								
Habilidad del operador*	A-D	A-D	A	A-D	C-D	A	A-D	A-D
Rapidez de soldado, m/min	0.2-1.5	0.2-1.5	(1-6 kg/h)	0.02-1.5	0.1-5	(0.3-0.6 kg/h)	0.2-2.5	0.2-10
Operación	Todas	Todas	Manual	Todas	Automática	Manual	Automática	Automática

*Clasificaciones comparativas, con A indicando el mayor valor de la variable, E el menor. Por ejemplo, la soldadura con arco metálico revestido resulta en distorsión muy alta, tiene costo muy bajo del equipo, precios altos de trabajo y acabado, y requiere alta habilidad del operador.

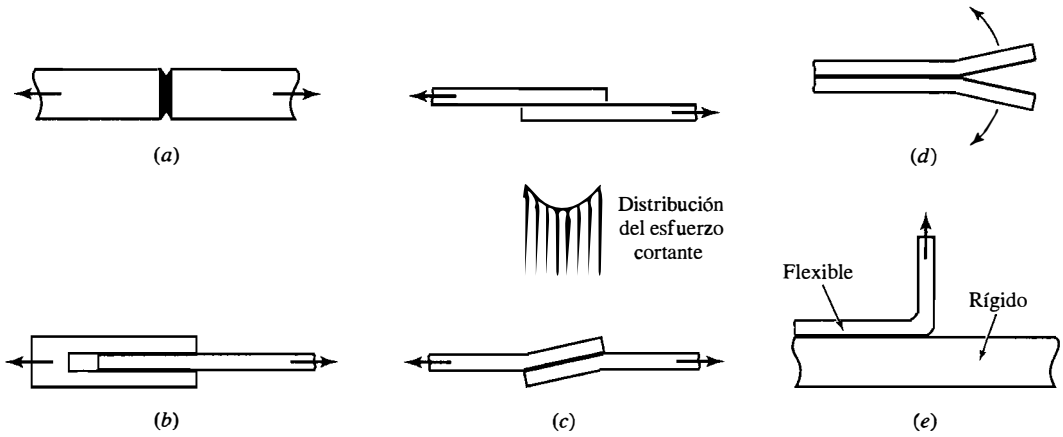


Figura 18-27 Modos básicos de carga en juntas: (a) tensión pura, (*b*) cortante puro, (c) cortante no balanceado y deformación resultante, (*d*) escición, y (e) desprendimiento.

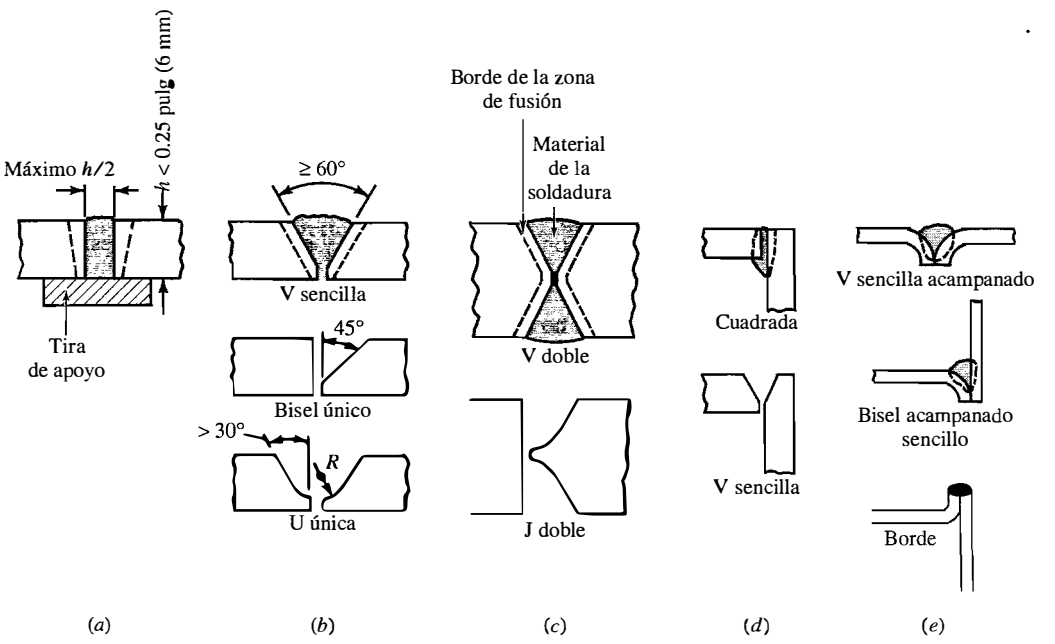


Figura 18-28 Preparación de las uniones para la soldadura de arco y gas que proporciona ranuras (a) cuadradas, (*b*) de V sencilla, (c) de V doble, (*d*) en esquina, o (e) en el borde.

al desprendimiento es la fuerza promedio requerida para separar una unión de ancho unitario a una rapidez de 2.5 mm/s, con un ángulo de desprendimiento de 180°. Las uniones por soldadura fuerte, soldadura blanda y, en particular, las adhesivas son las más vulnerables. Por ejemplo, un epóxico rígido puede tener una resistencia de traslapo a corte de 21 MPa, pero una resistencia al desprendimiento de sólo 3N por milímetro de ancho del traslapo.

Diseño de la unión Hay pocas limitaciones en el tamaño de los ensambles, pero sí las puede haber en el material y en su espesor. Por ejemplo, las secciones trasversales que se van a unir deben ser iguales cuando la generación de calor es una función del espesor, como en la soldadura a tope y en la soldadura a tope por chispas, en tanto que pueden ser muy distintas en la soldadura de proyección, en la soldadura por arco eléctrico, en la soldadura fuerte, en la soldadura blanda y en la unión adhesiva. La configuración de la unión está regida por varias consideraciones:

1. Las *uniones a tope* producen la menor área de la junta entre dos piezas, así que son las más débiles en tensión. No obstante, son completamente adecuadas cuando la junta misma es fuerte, como en la soldadura de estado sólido y por fusión. En la soldadura por fusión la solidez de la soldadura se asegura por medio de la preparación adecuada (Fig. 18-28), que afecta vitalmente el desempeño de la junta ante la fatiga.

a. Las ranuras cuadradas están indicadas para material delgado (Fig. 18-28*a*), pero las ranuras conformadas para mayor penetración de la soldadura y formación controlada del cordón son esenciales para la soldadura con gas y arco eléctrico de calibres más gruesos (Fig. 18-28*b* y *c*). Para la soldadura con haz de electrones no se necesita ranura (preparación cuadrada).

b. Las uniones en esquina con ranura cuadrada (esencialmente una unión a tope) sólo son adecuadas para material delgado; para calibres más gruesos, la preparación de la ranura es esencial (Fig. 18-28*d*). La fractura por escisión puede ocurrir en uniones realizadas con soldadura fuerte, con soldadura blanda, y en las uniones adhesivas; así que es necesario el refuerzo.

2. La soldadura a tope puede no proporcionar suficiente resistencia en lámina delgada. Se dispone de varias soluciones:

a. Las *uniones acampanadas* proporcionan un área superficial mayor (Fig. 18-28*e*). En la soldadura por fusión, el cordón de soldadura suministra la resistencia; en otros procesos, incluyendo la soldadura fuerte y la unión adhesiva, el área de la unión se incrementa doblando la lámina. Sin embargo, tales uniones son susceptibles a la falla mediante la separación por desprendimiento.

b. Una mejor unión normalmente se obtiene en los procesos sin fusión, al crear una gran área de contacto cargada en cortante (*unión tralapada*, Fig. 18-29*a*). Al desplazar el traslape (Fig. 18-29*b*) o ahusando las láminas (Fig. 18-29*c*) se logra una distribución de esfuerzos más adecuada en el área de la unión. Las uniones de traslapo se refuerzan con *fajas* (Fig. 18-29*d*). Si se requiere una superficie lisa, se deben preparar los bordes (Fig. 18-29*e*) o hacer una *unión oblicua* (Fig. 18-29*f*). Una configuración machihem-

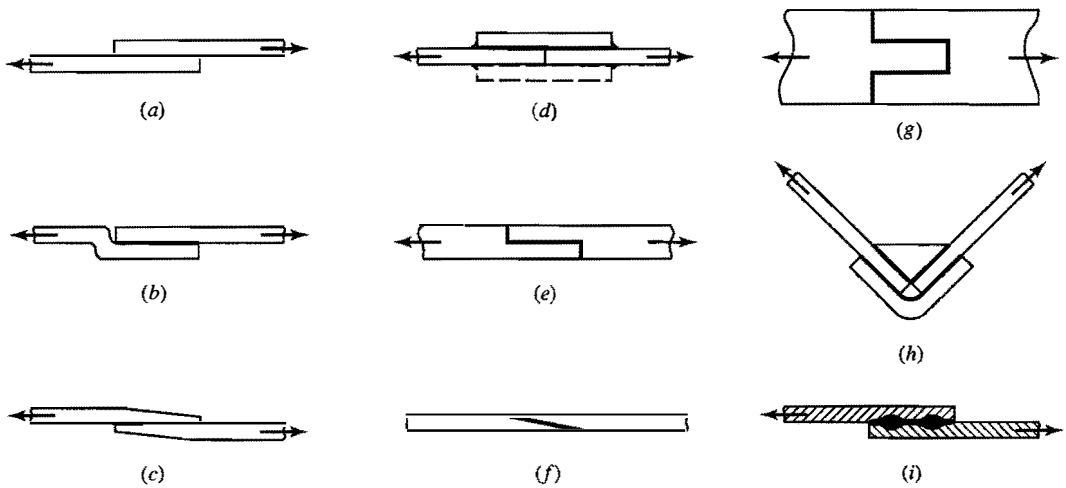


Figura 18-29 Las uniones unidas con soldadura fuerte, con soldadura blanda, y las adhesivas se diseñan para proporcionar un área máxima para la unión adhesiva: (a) junta sencilla de traslapo, (*b*) unión de traslapo desplazada, (*c*) unión de traslapo ahusada, (*d*) unión de traslapo reforzada, (e) unión de traslapo de superficie lisa, (*f*)unión oblicua, (*g*) unión a tope machihembrada, (*h*) unión en esquina con insertos e (*i*) unión soldada-pegada.

brada convierte a las uniones a tope en uniones traslapadas de mayor resistencia (Fig. 18-29*g*). En las uniones en esquina o en *T*, la superficie de contacto se puede incrementar con rellenos y cubiertas (Fig. 18-29*h*).

c. Para obtener la máxima resistencia, una unión mecánica (remachada o engargolada) se une con soldadura fuerte, con soldadura blanda o adhesivamente. En el proceso de *adhesión soldada*, las láminas ya recubiertas con un adhesivo se sueldan por puntos a través de éste (Fig. 18-29*i*), el cual se cura posteriormente. Alternativamente, una unión soldada por puntos se infiltra con el adhesivo líquido, que luego es curado. La soldadura por puntos incrementa la resistencia al cortante y el adhesivo incrementa la resistencia a la fatiga.

Un aspecto crítico de los procesos de unión es la aseguración de la calidad. Las condiciones del proceso se deben monitorear y documentar estrictamente. Las pruebas destructivas periódicas garantizan que el proceso esté bajo control. La resistencia de las uniones se prueba en tensión, y la de las uniones traslapadas, también en pruebas de desprendimiento. Además, las técnicas NDT se emplean para verificar la solidez de las uniones. Las técnicas ultrasónicas, por corrientes parásitas y por rayos x son de aplicación general. En los procesos donde se puedan formar grietas, las superficies son inspeccionadas por medio de penetración de tinte y de detección magnética de defectos. Muchos productos se someten a un servicio crítico (por ejemplo, recipientes nucleares, barcos, calderas, etcétera), y entonces se aplican códigos y técnicas especiales de inspección.

18-12 LAMINADOS

Los *laminados* representan una clase especial de productos. Como su nombre lo implica, dos o más *láminas* (láminas delgadas o placas) se unen sobre toda su superficie. El producto es un material compuesto, pero no en el sentido que se definió en el capítulo 15, porque no hay una matriz continua en que se contenga la otra fase. Los laminados también difieren de los recubrimientos en que se realizan uniendo láminas sólidas una con otra. Una de las láminas puede ser mucho más delgada, por lo que es usual hablar de productos revestidos.

Ya se han establecido métodos para realizar laminados, como el calandrado para papel y tela recubiertos de plástico, la coextrusión de película de plástico (Secc. 14-3-2), el refuerzo con fibra (Secc. 15-1-2), y la difusión, explosión y soldadura con rodillos para cinta bimetálica y revestimiento metálico (Secc. 18-3). El soldado fuerte, soldado blando y la unión adhesiva también se emplean en una gran variedad de productos.

Ejemplo 18-10 Los parabrisas de automóviles deben proteger a los ocupantes de su eventual desintegración en un accidente, pero no deben ser tan fuertes como para lastimar, posiblemente fatalmente, a un ocupante lanzado contra ellos. Por lo tanto, se fabrican como laminados: se unen dos piezas de vidrio recocido previamente curvado con una capa central de termoplástico de polivinilo butiral. Al impactarse, el vidrio se rompe en fragmentos pequeños, pero la mayoría de ellos son retenidos por el plástico, que es capaz de soportar una gran deformación. Se puede agregar una capa adicional de plástico a la superficie interna para evitar la laceración. (El vidrio a prueba de balas es un laminado de capas de vidrio templado.)

Ejemplo 18-11 Un laminado que consiste en una capa de plástico colocada entre dos láminas delgadas de metal (acero o aluminio) pegadas adhesivamente tiene varias ventajas. Las láminas de cubierta de metal hacen al compuesto más resistente a la termofluencia y mucho más fuerte en la flexión que un plástico; éste lo vuelve mucho más ligero que una lámina sólida de metal; la formabilidad es comparable con un metal dúctil, y el compuesto tiene excelentes propiedades de amortiguamiento del sonido. En el ejemplo 10-16 se vio que en el diseño ULSAB se usan aceros de alta resistencia para gran parte de la estructura. La cavidad profunda de la llanta de repuesto en la cajuela no se puede formar en dicho acero. Los diseñadores eligieron un inserto, fabricado por embutido profundo, hecho de un laminado acero/PP. Como este inserto no se puede soldar, se pegó adhesivamente en un corte en la cajuela.

Los *panales* forman una clase especial de laminados. Son excepcionalmente ligeros para su resistencia: las placas de cubierta (*placas de las caras*) proporcionan resistencia a la tensión y a la compresión, y el *núcleo* proporciona resistencia al cortante y a la compresión a través del espesor (Fig. 18-30*a*). Como su nombre lo sugiere, la configuración básica del núcleo es hexagonal (Fig. 18-30*b*), pero también se usan otros pa-

trones; en particular, un *núcleo flexible* (Fig. 18-30*c*) que permite que se le conforme en forma tridimensional. El núcleo se produce aplicando adhesivo a una hoja de plástico o de metal colocado en un patrón para construir un bloque (Fig. 18-31*a*). Después del curado, el bloque se expande (Fig. 18-31*b*). En este punto, un núcleo de metal está listo, pero un núcleo de polímero no mantendría su forma, por lo que se sumerge en un termofijo que, al curar, fijan la forma. Entonces, las láminas de las caras se unen con adhesivos.

Para la aplicación a alta temperatura de panales de metal, las juntas adhesivas se reemplazan por uniones hechas con soldadura fuerte. Los núcleos de metal también se fabrican de tiras corrugadas entre rodillos similares a engranes; el núcleo se construye mediante soldadura fuerte o soldadura por fusión.

Los panales tienen muchas aplicaciones estructurales, para aspas para rotores de helicópteros, en las superficies de control de aeronaves y para todas las aplicaciones en las que se desea una alta razón de la resistencia a la flexión respecto a la masa. Además, los núcleos se colocan en conductos para enderezar el flujo del aire, se emplean como coraza contra radiofrecuencia, o se rellenan con fieltro de fibra de vidrio para proporcionar excepcional aislamiento sonoro. Las estructuras de panal ofrecen absorción eficiente de la energía.

18-13 FABRICACIÓN DE FORMAS SÓLIDAS LIBRES

En todos nuestros análisis hasta este punto, las formas se desarrollaron por solidificación, deformación o consolidación sobre una matriz, o eliminando material de una forma previamente producida. La alternativa es construir una forma de manera gradual, libre de los confines de una matriz. Desde mediados de la década de los 80 se han

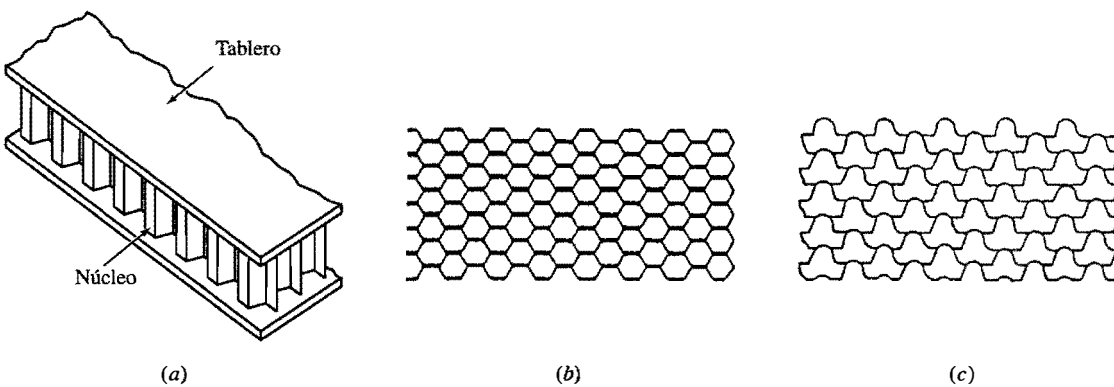


Figura 18-30 Los panales son estructuras de peso ligero pero fuertes (*a*); entre las configuraciones del núcleo, frecuentemente se usan la (*b*) hexagonal y (c) de núcleo flexible. (*Adaptada de Engineered Materials Handbook, Desk Edition, ASM International, 1995, pp. 546 y 547. Con permiso.*)

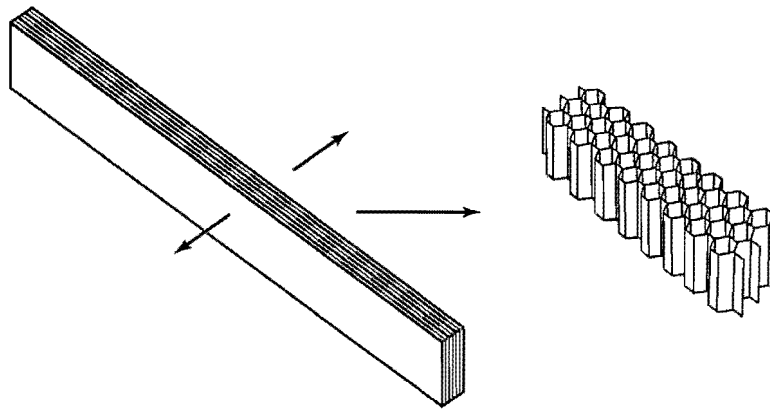


Figura 18-31 Fabricación del núcleo del panal: (*a*) ensamble de un bloque y (*b*) expansión del núcleo. (Como en la Fig. 18-30.)

desarrollado muchos procesos que emplean este principio, y no hay duda de que muchos otros están por venir. La terminología no está completamente establecida, pero el término *fabricación de formas sólidas libres* parece estar teniendo mejor aceptación general. Es útil porque expresa la principal característica física de los procesos sin referencia a su propósito o uso propuesto.

La tecnología que permite esto es el modelado sólido: el modelo sólido creado en el archivo CAD se "rebana" en la computadora en capas delgadas 2D y luego se construye la pieza física, capa por capa, de varios materiales por medio de diversas técnicas. El espesor de las capas es típicamente de 0.1 a 0.5 mm, pero puede ser hasta de 2.5 mm. En cierta forma, el proceso es una versión automatizada de la actividad del diseñador de patrones, quien a menudo construye sus modelos a partir de capas delgadas de madera, pegadas. Una vez alisado mediante el lijado, el cuerpo tridimensional se encontraba listo para inspección y eventualmente se podía moldear en arena. Similarmente, una pieza construida de capas 2D presentará escalones. Las capas más delgadas necesitan menos alisado pero toma más tiempo hacerlas. Como se verá, una alternativa es construir un cuerpo colocando rollos de material en un patrón helicoidal, espiral o con otra forma adecuada. Esto también tiene su precedente en el proceso de formado por espirales usado antiguamente para productos cerámicos, y en ocasiones en la actualidad. El campo completo aún está en desarrollo, aunque varias tendencias ya pueden ser discernidas.

18-13-1 Propósitos de la fabricación de formas libres

La adopción más amplia de la ingeniería concurrente dio el ímpetu para la fabricación de formas libres: si se va a reducir el tiempo para la puesta en el mercado y se van a evitar errores costosos, la viabilidad del diseño se debe probar en una etapa temprana, con el uso completo de las oportunidades ofrecidas por CAD/CAM.

Prototipos rápidos La primera aplicación de la fabricación de formas libres fue en la construcción de prototipos físicos por las razones clásicas: proporcionan una mejor apreciación de la forma y del atractivo estético. Si las dimensiones y las tolerancias se controlan dentro del rango de los productos reales, los ajustes y los ensambles también se verifican. Para estos propósitos, el prototipo se construye de cualquier material con estabilidad dimensional como un plástico o incluso papel. El proceso también es una poderosa herramienta en la ingeniería inversa; el archivo de computadora necesario ya se encuentra disponible a partir de las mediciones hechas por CMM. Irónicamente, los avances en el modelado sólido han limitado la tasa de crecimiento predicha para estas aplicaciones.

Modelos funcionales El paso siguiente es la construcción de modelos funcionales. Si el propósito es sólo verificar las funciones cinemáticas, el material de nuevo puede ser un plástico. Como la fabricación capa por capa permite la existencia de piezas dentro de otras piezas (una esfera en una jaula, o engranes en un bastidor), se pueden construir modelos activos. Si además se va a verificar el desempeño, el modelo se debe hacer del material real, muy frecuente de metal o de cerámico, y esto presenta retos adicionales.

Prototipos de herramental Las herramientas y las matrices para la fundición, deformación de metal y moldeo de cerámicos y plásticos son costosas y puede implicar varios meses construirlas. En la sección 10-7 se vio que las aleaciones fundibles de zinc se utilizan para las pruebas de las matrices en las industrias de trabajo de lámina de metal, pero incluso la fabricación de éstas, así como su prueba y corrección, lleva meses. La fabricación de formas libres puede reducir los tiempos de entrega por medio de varias rutas. Se puede usar directamente un modelo de cera como patrón para la fundición a la cera perdida (Secc. 7-5-5). Si se necesitan más patrones, el modelo se fabrica de plástico; luego se produce un molde de caucho silicónico curado a temperatura ambiente en el que se pueden moldear patrones de cera. Puede hacerse conductor el modelo y entonces se crea por electrodeposición un molde cóncavo de níquel, adecuado para RTM o SRIM. Si el modelo tiene una capacidad mayor de temperatura, se le puede rociar una aleación de Al-Zn de bajo punto de fusión. La computadora es capaz de generar el negativo de la pieza y la fabricación libre de sólido puede producir directamente un molde.

Fabricación automatizada El término algunas veces incluye los propósitos de fabricación de formas libres pero, en el sentido más general, se aplica a todos los procesos que no requieren intervención humana para la manufactura de piezas una vez que fue creado el programa de computadora pertinente. Esto incluye, por supuesto, tanto el maquinado con luces apagadas (*procesos sustractivos*) y la fabricación de formas libres (*procesos aditivos*). Los dos pueden competir aún para lograr un prototipo rápido: con el desarrollo continuo del maquinado CNC, los prototipos a menudo se pueden producir, especialmente con aleaciones de Al de maquinado libre, con competitividad mediante los procesos de formas sólidas libres. El término *manufactura arriba del escritorio* algunas veces se aplica a los procesos de fabricación de formas sólidas libres cuando, en realidad, las únicas máquinas que caben en un escritorio son las fresadoras CNC construidas especialmente para la producción de prototipos.

18-13-2 Procesos de fabricación de formas sólidas libres

Como se indicó, en la mayoría de los procesos se construye una pieza capa por capa. Las diferencias son en los enfoques a menudo patentados, para lograr este objetivo.

1. Fabricación con fotopolímeros. Se han desarrollado polímeros líquidos especialmente formulados que pueden formar enlaces cruzados hasta una profundidad controlada bajo la influencia de luz UV (o, algunas veces, visible). El polímero se encuentra en una tina que tiene una plataforma verticalmente móvil (Fig. 18-32). Para comenzar, la plataforma se encuentra debajo de la superficie del líquido por el espesor de una rebanada, y la primera rebanada se solidifica por medio de la exposición controlada a la luz. Los procesos difieren en la manera en que se aplica la luz.

a. La luz es generada por un láser y el haz se barre en toda la superficie. Luego la plataforma se deja caer y el proceso se repite hasta que se producen todas las rebanadas. Las partes sobresalientes necesitan soporte (Fig. 18-32).

b. La capa de polímero se expone a luz UV a través de una plantilla de vidrio en la que el patrón se fabrica por medio de técnicas como las de una máquina copiadora fotostática. El líquido no expuesto es expulsado por vacío y reemplazado con cera, la capa se aplana con fresa y se baja la plataforma para la repetición de la secuencia. La cera proporciona soporte y, una vez terminada la pieza, se elimina a través de fusión o disolución.

2. Sinterizado selectivo por láser. En principio, se usa cualquier polvo que se pueda sinterizar. Una capa delgada de polvo se extiende y sinteriza con la pasada de un rayo láser, se baja la plataforma, se extiende una nueva capa, etcétera. El polvo no sinterizado provee soporte a la estructura y cae cuando la pieza es removida.

a. Cuando el polvo es una cera de fundición por cáscara, la pieza que se forma de esta manera se convierte en un patrón para la fundición a la cera perdida.

b. Con los polímeros termoplásticos o con los polímeros termofijos en etapa B se pueden crear prototipos o moldes para patrones de cera. Si se fabrican con paredes huecas, sirven como patrones para la fundición a la cera perdida.

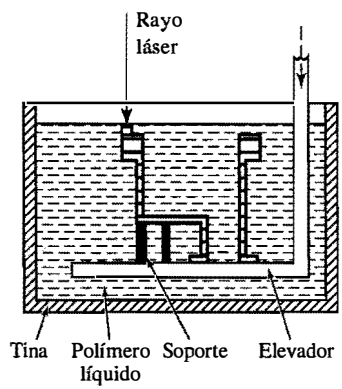


Figura 18-32 Fabricación de prototipos rápidos por fotopolimerización. Note los soportes necesarios para las partes colgantes.

c. Los polvos de metal, recubiertos con un polímero, se pueden sinterizar para establecer enlaces poliméricos. El aglutinante se elimina y la pieza es sinterizada como en el moldeo por inyección de metal (Secc. 11-3-2).

d. Los polvos cerámicos recubiertos de polímero pueden tratarse de forma similar para producir piezas o moldes cerámicos para la fundición a la cera perdida.

e. Con intensidades mayores de energía, los polvos de metal se pueden sinterizar directamente, pero la pieza quizá necesite de un sinterizado final o HIP para desarrollar propiedades mecánicas aceptables.

3. Impresión tridimensional. El polvo metálico o cerámico se deposita en capas y una impresora por chorro de tinta rocía un aglutinante líquido en el patrón definido por la computadora. El tratamiento posterior es como en el moldeo por inyección de polvo.

4. Deposición de estado líquido. El material se calienta hasta el régimen de fusión y se deposita en un patrón por medio de varias técnicas.

a. Un filamento de polímero termoplástico o de cera se calienta y extruye a través de una boquilla, cuyo movimiento se controla en coordenadas x-y. La mesa baja cuando se completa una capa. La solidificación rápida proporciona suficiente resistencia para evitar la necesidad de soporte exterior.

b. En la sección 11-5 se hizo referencia a la deposición por rocío directo de metal atomizado. Al rociar a través de protectores cortados por láser, se puede construir una pieza formada en capas. En una variante, un rayo láser es dirigido a través del centro de una boquilla de suministro de polvo; de esta manera, la pieza es construida directamente por medio de capas fusionadas.

c. Cuando a la plataforma (o a la boquilla) se le proporciona un movimiento programado sobre el eje z, se producen formas tridimensionales directamente a través del método de construcción de bobina. La pieza también se puede crear como un cordón de soldadura continua. La calidad superficial se tendrá que mejorar antes de que estos procesos sean utilizados para partes funcionales.

5. Manufactura de objetos laminados. El término se emplea para un proceso en el que un papel recubierto con polímero se fusiona en capas. En cada una, el contorno de una rebanada del modelo sólido se corta con láser, y las áreas circundantes y las cavidades internas se cortan en cuadrados. Al terminar la pieza, los cubos pequeños se desprenden. La pieza también puede servir como un núcleo para la fundición a la cera perdida. Esto es, en sentido estricto, no hay una fabricación de formas sólidas libres, sino un caso especial de manufactura sustractiva.

6. Fabricación laminada. El principio de construir una pieza en varias capas se puede llevar aún más adelante. El modelo sólido se divide en la computadora en rebanadas relativamente gruesas que se fabrican rápidamente por medio del maquinado CNC de 3 ejes relativamente sencillo. Luego, las partes se juntan por medio de algún proceso de unión.

Ejemplo 18-12

El prototipo de la cabeza de un cilindro de cinco válvulas se produjo por medio de la soldadura fuerte al vacío de seis planchas maquinadas por medio de fresado de tres ejes. Este proceso,

llamado *maquinado estratiforme de precisión*, permitió la terminación de un prototipo funcional en 3 meses, cerca de un tercio del tiempo que hubiera tomado por medio de métodos convencionales. [Fuente: *Adv. Mater. Proc.*, 1995 (1): 16.]

18-14 RESUMEN

La unión expande el alcance de todos los procesos de manufactura; fundiciones, forjas, extrusiones, placas, lámina de metal y piezas maquinadas se pueden unir para producir formas más complejas o estructuras más grandes. Los largueros soldados para construcción, los bastidores de máquinas, las carrocerías de automóviles, los tubos y las tuberías de todos tamaños, los recipientes y las latas, todos estos productos se encuentran a nuestro alrededor. La soldadura a menudo es la reparación más económica y práctica para maquinaria averiada. Los bastidores para bicicletas, soldados con soldadura fuerte, los cambiadores de calor, los radiadores soldados y las juntas de plomería abundan. La unión adhesiva se usa cada vez más en las industrias aérea, automotriz, de artículos electrodomésticos y otras.

Las uniones, dada su definición misma, proporcionan una transición entre dos materiales no necesariamente similares. El control de calidad es aún más importante que en otros procesos porque la oxidación, las películas superficiales, las inclusiones de escoria, la porosidad, las separaciones, cortes socavados, las grietas por calor, el agrietado en frío (*fragilización*) y los esfuerzos residuales podrían causar fallas retrasadas peligrosas. No obstante, se pueden obtener juntas de buena calidad, algunas veces de igual resistencia al del material base (pieza de trabajo), a través de varios medios:

1. La soldadura en estado sólido se basa completamente en la adhesión; aunque es extremadamente sensible a los contaminantes superficiales, permite la unión de un rango amplio de materiales similares y disímbolos.
2. La fusión altamente localizada en la soldadura por resistencia representa una transición de los procesos de fase sólida a líquida; aun es sensible a los contaminantes, pero la zona afectada por el calor es pequeña.
3. La fusión profunda o a través del espesor en los procesos de soldadura por fusión amplía la zona afectada por el calor en el metal base en todos los procesos, excepto en el de haz de alta energía (EB y láser). La preparación superficial, la geometría de la soldadura, las atmósferas protectoras y/o escoria o fundentes y la rapidez de calentamiento y enfriamiento se deben controlar simultáneamente. El calentamiento y el enfriamiento localizados hacen a las estructuras soldadas susceptibles a la distorsión y al agrietamiento bajo la influencia de esfuerzos internos.
4. Con la soldadura fuerte y en la soldadura blanda se unen piezas de trabajo sólidas —sin la fusión del metal base— con un metal de menor punto de fusión. La unión de nuevo se basa en la adhesión, haciendo a la limpieza superficial y al ajuste los factores críticos.
5. Los polímeros se pueden formular para ajustarse a la tarea particular en la unión adhesiva. El control de la preparación superficial y la aplicación del adhesivo son cruciales para el éxito.

6. Los procesos de unión son aditivos: construyen un cuerpo a partir de unidades menores. Este principio también se puede aplicar para fabricar piezas por medio de la fabricación de formas libres. Estos procesos han hecho posibles los prototipos rápidos; progresos adicionales han reducido el tiempo necesario para la construcción de moldes y matrices. Con los más recientes adelantos, las técnicas pueden conducir a la producción de lotes pequeños de artículos de uso final.
7. Los procesos de unión ofrecen un campo amplio para la mecanización, la automatización y la aplicación de la robótica. El modelado matemático ha conseguido grandes avances y se aplica la inteligencia artificial.
8. Muchas técnicas de unión presentan riesgos considerables. La luz emitida por los arcos de alta temperatura y por los rayos láser exige protección ocular o confinamiento total; el calor, el metal fundido y las chispas que vuelan de una zona de soldadura requieren protección facial, protección ocular, guantes y otra ropa protectora; los humos irritantes o tóxicos que emanan de solventes, monómeros y de las operaciones de soldadura común, fuerte y blanda, y de la unión adhesiva necesitan sistemas de escape, además de otras medidas de seguridad e higiene.

PROBLEMAS 18A

18A-1 (*a*) Dibuje un boceto de la unión por rodillos. (*b*) Liste (o marque en el dibujo) tres condiciones esenciales para lograr una buena unión.

18A-2 (*a*) Realice un bosquejo que muestre la soldadura por fricción de dos barras en sus caras extremas. (*b*) Indique (o marque en el dibujo) las condiciones esenciales para obtener una buena junta.

18A-3 (*a*) Dibuje un boceto que indique la estructura de una soldadura por fusión a tope entre dos placas de cobre laminadas en frío hasta 50% de reducción. (*b*) Debajo, en otro bosquejo, establezca la resistencia y la ductilidad relativas de las diferentes zonas.

18A-4 (*a*) Haga un bosquejo de la sección transversal de una unión soldada por fusión entre un acero al bajo carbono y una placa de acero normalizado con 0.8% C. (*b*) Suponiendo que no hubo precalentamiento y un enfriamiento rápido, muestre los rasgos característicos de la microestructura, identificando las diversas fases que se deben esperar.

18A-5 Defina (*a*) soldadura de espárrago y (*b*) soldadura por percusión (utilice dibujos si lo desea).

18A-6 Indique cuál es el principal medio de transferencia de energía en la soldadura (*a*) por arco de plasma y (*b*) por electroescoria.

18A-7 Realice bocetos simples para mostrar los rasgos principales de (*a*) la soldadura de costura por resistencia y (*b*) de la soldadura de costura con presión (incluyendo la fuente de energía).

18A-8 Haga dibujos que establezcan los elementos esenciales de la soldadura (*a*) de arco de tungsteno y gas, (*b*) metálica con arco y gas y (*c*) con arco metálico protegido.

18A-9 Dos placas de acero al bajo carbono de 10 mm de espesor se unen a tope con soldadura por fusión. Haga bocetos para mostrar la geometría del cordón de soldadura que se espera y el ancho de la zona afectada por el calor con soldadura (*a*) con oxígeno y acetileno, (*b*) con haz de electrones, (*c*) con arco metálico protegido y (*d*) con arco de plasma.

18A-10 Indique las características comunes de la soldadura (*a*) fuerte, (*b*) blanda y (*c*) fuerte amplia, y defina la principal diferencia entre las tres.

18A-11 Dibuje un boceto que ejemplifique el diseño básico para preparar los bordes de las dos placas de 20 mm de espesor que se van a unir a tope mediante una soldadura de arco metálico protegida con acceso (*a*) desde un lado y (*b*) desde ambos lados. (*c*) ¿Cuál de los dos estará libre de distorsión?

18A-12 Dibuje bosquejos para mostrar al menos dos diseños de uniones que incrementan la resistencia de una unión traslapada adhesiva.

PROBLEMAS 18B

18B-1 Su compañía produce lámina de acero revestida de cobre mediante adhesión por rodillo caliente. Un cliente se queja de que el revestimiento se separó durante embutido profundo. Se le pide investigar el procedimiento de su compañía para fabricar la lámina e identificar las dificultades posibles. Liste los pasos del proceso probables y las áreas problema.

18B-2 Se afirma que una temperatura elevada es esencial para crear un enlace metálico en el laminado de una placa de metal base y dos de cubierta. ¿Está de acuerdo? Justifique su respuesta.

18B-3 Un diseño requiere que dos láminas de acero inoxidable austenítico (304) de 0.6 mm de espesor se unan a tope en sus bordes en línea recta. (*a*) Establezca los procesos que se podrían considerar. (*b*) Determine procesos adicionales que serían factibles si a las láminas se les permitiera que se traslapen.

18B-4 (*a*) Realice un bosquejo que muestre la forma de un buen cordón de soldadura producido al soldar por arco metálico y gas dos placas de acero de 20 mm de espesor. (*b*) Sugiera métodos de inspección para corroborar la calidad de la soldadura.

18B-5 Una broca helicoidal de HSS se va a unir a una barra de acero de baja aleación. Sugiera procesos que se pueden aplicar si el acero de broca HSS ya fue tratado térmicamente por completo y no debe suavizarse en los bordes de corte.

18B-6 Explique por qué una soldadura no eutéctica a menudo es preferible a una eutéctica.

18B-7 Cuando los cuerpos de las latas de acero de tres piezas se sueldan con costura, la corriente de soldado se apaga justo antes que se alcance el final de la costura. Sugiera una razón, teniendo en cuenta las operaciones subsecuentes.

18B-8 Muchos marcos de bicicletas se construyen con tubos de acero unidos a acoplamientos huecos. (*a*) Sugiera una manera de unión, (*b*) defina el proceso, (*c*) haga un boceto de una unión indicando los rasgos críticos.

18B-9 Las latas de tres piezas se fabrican de dos tapas y un cuerpo (la parte cilíndrica, formada en redondo a partir de lámina y unida en la superficie cilíndrica). (*a*) Realice los bosquejos de procesos que usted sugiera para fabricar el cuerpo, luego juzgue su aplicación a (*b*) hojalata, (*c*) lámina negra (lámina delgada de acero, no recubierta), y (*d*) aleación de aluminio.

18B-10 Los anillos de acero de 1.2 m de diámetro exterior, de la configuración que se muestra en la figura del ejemplo 7-9*a*, se fabrican doblando una sección en ángulo en rodillos piramidales (Fig. 10-15*b*). Juzgue si los procesos siguientes son posibles para establecer una junta de igual resistencia al metal base: (*a*) soldadura forjada, (*b*) soldadura por fricción, (*c*) soldadura a tope por chispas, (*d*) soldadura fuerte, (*e*) soldadura con arco protegido, (*f*) soldadura blanda y (*g*) soldadura con arco metálico y gas. Brevemente, justifique cada juicio.

18B-11 Las vías modernas de ferrocarril se fabrican soldando rieles laminados para formar grandes longitudes. (*a*) Sugiera un método para producir juntas en el campo. (*b*) En clima caliente, los rieles se expanden. Partiendo de consideraciones básicas, plantee una forma de minimizar las consecuencias para prevenir el pandeo.

18B-12 Inspeccione tantos recipientes a presión construidos de dos piezas como pueda identificar (cilindro de gas propano para parrillas, de oxígeno para equipo de buceo, desechable para soplete de remoción de pintura, etcétera) para detectar rastros de sus métodos de manufactura, incluyendo los métodos que se emplean para producir los semirrecipientes y el método de unión.

PROBLEMAS 18C

18C-1 Las piezas del fuselaje de un aeroplano se unen con remaches de aleación de aluminio 2024. El operador de una máquina remachadora reporta que muchos remaches se agrietan; la fuerza de remachado también parece ser inadecuada de acuerdo con el veredicto de las muchas cabezas de remaches formadas incompletamente. Los remaches están en la condición de tratamiento por solución sólida, para obtener su resistencia completa por envejecimiento natural (temperatura ambiente) después del remachado. (*a*) Determine qué podría haber salido mal y (*b*) sugiera, paso a paso, qué acción se debe tomar.

18C-2 Una pieza pequeña y compleja de una aeronave se va a manufacturar de una aleación de aluminio 6061. La resistencia máxima obtenible con esta aleación se debe mantener en toda la pieza. (*a*) Verifique (en la tabla 8-2 o, preferiblemente, en libros de referencia como el *Metals Handbook*) qué condición metalúrgica proporcionará la mayor resistencia. (*b*) Determine si dos piezas fabricadas de material en esta condición se podrían soldar sin gran menoscabo de sus propiedades. (*c*) Si encuentra un proceso de unión, especifique el mejor proceso para soldado (al justificar su elección, trabaje por medio de la eliminación). (*d*) Sugiera un material pertinente de aporte, si es preciso, y (*e*) describa qué tratamiento posterior al soldado sería eventualmente necesario.

18C-3 Se ha propuesto unir aluminio a acero al bajo carbono. Después de revisar el diagrama de equilibrio, considere la posibilidad de establecer una unión razonablemente dúctil por medio de: (*a*) soldadura fría, (*b*) enlace por difusión, (*c*) soldadura por explosión, (*d*) soldadura de puntos, (*e*) soldadura por fricción, y (*f*) soldadura a tope por chispas. Justifique sus juicios.

18C-4 Una máquina monofásica de soldadura por resistencia se emplea para unir dos piezas de lámina de acero con 20 soldaduras de proyección fabricadas simultáneamente. Se une un ensamble cada 10 s. Si las láminas de acero son de 1 mm de espesor y las soldaduras de proyección individuales son similares a las mostradas en la figura 18-15*b*, calcule (*a*) la corriente de soldado requerida; (*b*) el ciclo de trabajo, expresado como la fracción (o porcentaje) del tiempo que la corriente está accionada; (*c*) los kVA necesarios para cada ciclo de soldado, si la corriente deseada se consigue a un voltaje de 4 V; (*d*) la potencia nominal en kVA del transformador, tomando en cuenta el ciclo de trabajo; (*e*) la potencia nominal en kW, considerando un factor de la potencia de 0.5 (por el desfasamiento debido a las cargas inductivas en el transformador); (*f*) el consumo de energía eléctrica para cada soldadura en kWh, y (*g*) el requerimiento de fuerza.

18C-5 Placas de una aleación de Al 5052 de 3.2 mm de espesor se unen a tope por GMAW DCEP usando un alambre de electrodo de 1 mm de diámetro. La corriente es 120 A, el voltaje del arco de 18 V, y la velocidad del viaje del arco de 14 mm/s. El ancho promedio de la unión es de 2 mm. Calcule la (*a*) potencia (kW), (*b*) la tasa de deposición (mm^3/s) y (*c*) la rapidez de avance del electrodo (mm/s).

18C-6 El diseño de la charola del piso de un automóvil requiere la unión de dos láminas de aleación de Al 5052 de 1 mm de espesor por medio de soldadura por puntos. (*a*) Revise el diagrama de fase apropiado y deduzca si la operación es posible. (*b*) Si la respuesta al inciso (*a*) es sí, calcule la potencia nominal del transformador y el consumo de potencia

como en el problema 10C-4, pero con una soldadura por puntos (8 ciclos a 30 000 A por electrodo) realizada cada 2 s. (*c*) Sugiera un proceso de soldadura apropiado si el diseño se cambia a soldadura a tope en los bordes.

18C-7 Dos placas de acero al carbono de 0.25 pulg (6.35 mm) de espesor se van a unir por medio de soldadura oxiacetilénica en un surco único en V (Fig. 18-28*b*). Empleando los datos de la tabla 18-3, determine (*a*) si esto es posible, y si la respuesta es sí, (*b*) qué rapidez de soldadura (mm/min o pulg/min) se podría esperar a la rapidez máxima de deposición de metal de 0.6 kg/h.

18C-8 Un tubo de acero de 25 mm de diámetro exterior se va a unir por adhesión a otro de 25 mm de diámetro interior con un epóxico de propósito general. El ensamble operará a temperatura ambiente (de 15 a 30°C) y deberá ser soportada una carga axial de tensión de 12 kN con factor de seguridad de 2. Calcule la longitud mínima L de la unión de traslapo (es decir, la profundidad de interpenetración de los tubos).

18C-9 Una barra de cobre puro laminada en frío y una de níquel puro recocida de 10 mm de espesor y 20 mm de ancho se van a unir a tope sin un metal de aporte. La unión debe ser dúctil y libre de inclusiones. (*a*) Repase el diagrama de fase relevante para determinar si esto es factible. (*b*) Si la respuesta es sí, utilice la figura 18-1 para sugerir al menos dos procesos adecuados, usando el proceso de eliminación. (*c*) Haga un dibujo de la estructura de la unión resultante, indicando la forma y el tamaño de grano, y la composición. (*d*) Establezca, en términos relativos, el ancho de la zona afectada por el calor para los dos procesos.

18C-10 Los transformadores de soldado que se emplean para la soldadura por puntos normalmente se clasifican en kVA para un ciclo de trabajo de 50%. Esto significa que el transformador está diseñado para soportar el calor que se genera cuando se enciende durante 50% del tiempo base del ciclo (usualmente 1 min). Como la generación de calor es proporcional al tiempo —ecuación (18-1)—, se pueden obtener más kVA si el ciclo de trabajo es menor. Calcule la carga permisible para ciclos de trabajo de 1, 5, 10, 20, 30, 40, 70 y 100%.

18C-11 En la sección 18-4-3 se indicó que el hierro gris se suelda con un material de aporte rico en silicio. Explique las razones para esto, obteniendo información del capítulo 6.

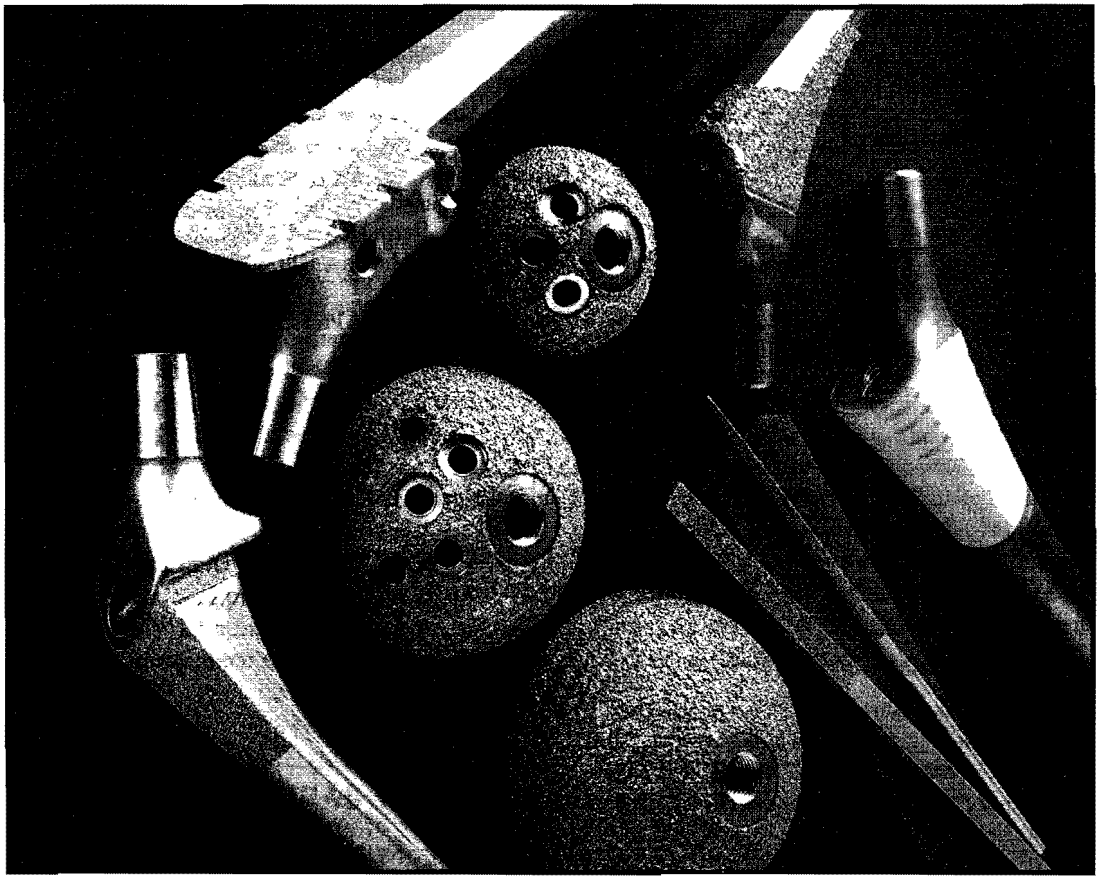
LECTURAS ADICIONALES

ASM Handbook, vol. 6, *Welding, Brazing, and Soldering*, ASM International, 1993.
Engineered Materials Handbook, vol. 3, *Adhesives and Sealants*, ASM International, 1990.
Brazing Handbook, 4a. ed., American Welding Society, 1991.
Welding Handbook, 8a. ed. (4 vols.), American Welding Society, 1987-1998.
Handbook of Plastics Joining: A Practical Guide, Plastics Design Library, 1996.
Bickford, J.H. y S. Nassar, *Handbook of Bolts and Bolted Joints*, Dekker, 1998.
Blodgett, O.W.: *Design of Welded Structures*, James F. Lincoln Arc Welding Foundation, Cleveland, OH, 1982.
Blodgett, O.W.: *Design of Weldments*, James F. Lincoln Arc Welding Foundation, Cleveland, OH, 1982.
Cary, H.B.: *Modern Welding Technology*, 4a. ed., Prentice Hall, 1998.
Davies, A.C.: *The Science and Practice of Welding*, 10a. ed., Cambridge University Press, 1993.
Dawes, C.T.: *Laser Welding*, Woodhead, Cambridge, 1992.
Evans, G.M. y N. Bailey: *Metallurgy of Basic Weld Metal*, Woodhead, 1997.

Grong, O.: *Metallurgical Modeling of Welding*, The Institute of Materials, London, 1994.
Halmshaw, R. (ed.): *Introduction to the Nondestructive Testing of Welded Joints*, Woodhead, 1997.
Hicks, J.G.: *Welded Joint Design*, 2a. ed., Abington, 1997.
Humpston, J. y D.M. Jacobson: *Principles of Soldering and Brazing*, ASM, 1993.
Karlsson, L. (ed.): *Modeling in Welding, Hot Powder Forming and Casting*, ASM International, 1997.
Lancaster, J.: *Handbook of Structural Welding*, Woodhead, 1992.
Lancaster, J.F.: *The Metallurgy of Welding*, Allen and Unwin, 1986.
Linnert, J.E.: *Welding Metallurgy*, 4a. ed., vol. 1, American Welding Society, 1994.
Lucas, W. (ed.): *Process Pipe and Tube Welding*, Woodhead, 1991.
Manko, H.H.: *Solders and Soldering Materials, Design, Production and Analyses for Reliable Bonding*, McGraw-Hill, 1992.
Marshall, P.W.: *Design of Welded Tubular Connections*, Elsevier, 1992.
Messler, R.W., Jr.: *Joining of Advanced Materials*, Butterworth-Heinemann, 1993.
Olson, D.L., R. Dixon y A.L. Liby (eds.): *Welding Theory and Practice*, North Holland, 1990.
Parmley, R.O. (ed.): *Standard Handbook of Fastening and Joining*, 3a. ed., McGraw-Hill, 1997.
Pecht, M.G.: *Soldering Processes and Equipment*, Wiley, 1993.
Radaj, D.: *Design and Analysis of Fatigue Resistant Welded Structures*, Halstead Press, 1990.
Rahn, A.: *The Basics of Soldering*, Wiley, 1993.
Schulz, H.: *Electron Beam Welding*, Woodhead, 1994.
Schwartz, M.M.: *Ceramic Joining*, ASM International, 1990.
Schwartz, M.M.: *Joining of Composite Matrix Materials*, ASM International, 1994.
Swenson, L.-E.: *Control of Microstructures and Properties in Steel Arc Welds*, CRC Press, 1994.
Tres, P.A.: *Designing Plastic Parts for Assembly*, 3a. ed., Hanser-Gardner, 1998.
Walker, J.M. (ed.): *Mechanical Joining*, 1996.
Wick, C. y R. Veilleux (eds.): *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, vol. 4, *Quality Control and Assembly*, Society of Manufacturing Engineers, 1987.

Fabricación de forma libre sólida

Burns, M.: *Automated Fabrication*, PTR Prentice Hall, 1993.
Jacobs, P.F.: *Rapid Prototyping and Manufacturing*, SME, 1982.
Jacobs, P.F.: *Stereolithography and Other RP&M Technologies*, ASME, 1995.
Wood, L.: *Rapid Prototyping: An Introduction*, Industrial Press, 1993.



Recubrimientos biocompatibles (GPX™ Bio Coatings) se aplican para mejorar la fijación de implantes prostéticos al hueso. (*Cortesía de Engelhard Corporation, East Windsor, Connecticut.*)

capítulo

19

Tratamientos superficiales

Muchos productos manufacturados se recubren con capas diseñadas para impartir resistencia a la corrosión o al calor, o para satisfacer requisitos estéticos. Se explorarán los métodos principales de manufactura, incluyendo:

Remoción de películas superficiales no deseadas

Conversión de capas superficiales mediante reacción química

Deposición de capas metálicas a partir de la fusión o de la solución

Creación de recubrimientos metálicos, cerámicos u orgánicos por deposición de vapor

Deposición de recubrimientos por medio de reacción química a alta temperatura

El cambio de la composición de la superficie por implantación iónica

Aplicación de recubrimientos orgánicos

Los tratamientos superficiales tienen como objetivo crear una estructura compuesta al cambiar sólo las propiedades de la superficie. Así, estos productos difieren de compuestos en los que las propiedades volumétricas se ven afectadas (Cap. 15) y de los laminados (Secc. 18-12), que se producen uniendo dos entidades separadas. En capítulos anteriores se vieron numerosos ejemplos de tratamientos superficiales; aquí los examinaremos sistemáticamente.

19-1 CLASIFICACIÓN

Existe una variedad siempre creciente de tratamientos superficiales y aquí se debe limitar el análisis a sus características más esenciales. Como se muestra en la figura 19-1 algunos procesos son sustractivos, otros son aditivos y algunos más transforman la superficie por medio de reacciones que involucran al material base. Algunos procesos (como la pintura) se usan para tratar un producto terminado, otros (como el fosfatado) son parte esencial de una secuencia de producción, otros más (como la CVD) son pro-

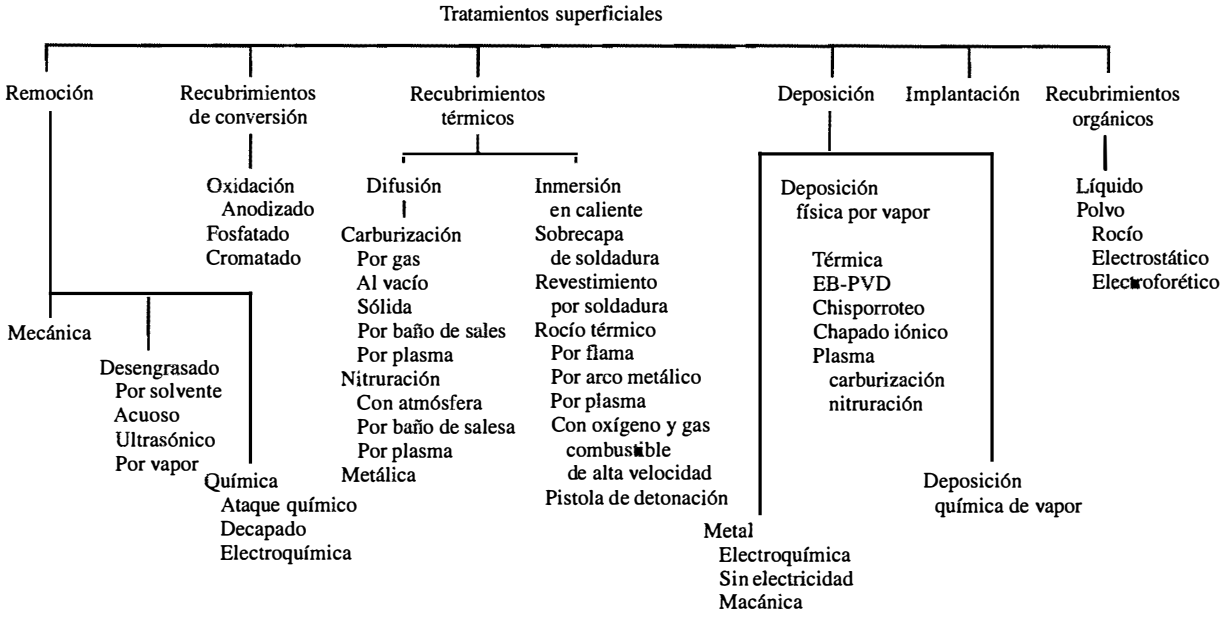


Figura 19-1 Clasificación de los tratamientos superficiales.

cesos de producción por sí mismos y tendrán una función significativa en la manufactura de dispositivos semiconductores (Cap. 20). Los recubrimientos sirven para una variedad de propósitos. Para el procesamiento, proporcionan una topografía superficial controlada o una composición para la retención del lubricante, o en el caso del servicio, mejoran la resistencia al desgaste o a la corrosión, o se pueden aplicar por razones puramente estéticas. Los tratamientos diseñados para cambiar los esfuerzos residuales superficiales pueden incluirse entre los tratamientos superficiales; ya se abordó el granallado en la sección 9-2-2, el bruñido por rodillos en la sección 9-7-6, el templado de vidrio en la sección 12-5-2 y la integridad superficial de las piezas maquinadas en las secciones 16-1-9 y 16-8-4. Por lo tanto, no se analizarán aquí; tampoco se hablará de los recubrimientos cerámicos y vítreos (esmaltes) analizados en la sección 12-5-3.

19-2 PROCESOS DE REMOCIÓN

Normalmente, el proceso consiste en eliminar capas superficiales no deseadas o cambiar la topografía de la superficie.

Mecánico Los contaminantes gruesos o muy adherentes se retiran por medios mecánicos, incluyendo procesos de abrasivo aglutinado (Secc. 16-8-5) y de abrasivo suelto (Secc. 16-8-6), particularmente chorro de granos, cepillado de potencia y acabado en barril.

Desengrasado Los fluidos orgánicos (aceites) se utilizan extensamente en muchas fases de la manufactura, incluyendo en el procesamiento por deformación y el maquinado, pero también se pueden aplicar a los metales para proporcionar protección contra la corrosión en el almacenamiento y envío. La superficie también se puede contaminar con aceite, impurezas y otros contaminantes orgánicos e inorgánicos (*suciedad*). Antes de las operaciones de unión, de ensamble o de recubrimiento finales, todos los residuos se deben eliminar mediante procesos solventes, acuosos o de vapor, mencionados en la sección 8-2-4. La aplicación del fluido desengrasante en un *chorro bajo alta presión* ayuda a eliminar contaminantes pesados. Un nivel mayor de limpieza se asegura cuando el fluido se agita con un transductor *ultrasónico*: las vibraciones provocan *cavitación* (la formación de pequeñas burbujas). Cuando las burbujas golpean la superficie de la parte, se colapsan en un chorro de alta velocidad (hasta de 400 km/h) y ejercen una poderosa acción de limpieza mecánica. La *prueba de humectación por agua* ofrece una verificación rápida de la eficiencia del desengrasado: si el agua derramada sobre la superficie permanece en una película delgada, la superficie está limpia; si forma gotas o charcos, están presentes residuos de aceite.

Químico En la sección 17-2 se vio que las soluciones acuosas de químicos se utilizan para la remoción de material. El químico se elige para remover solamente una capa superficial, por lo general un óxido; puede ser un ácido (como en el *decapado* de acero) o una solución alcalina (como en la remoción de óxido de aluminio). Puede requerirse un inhibidor para evitar el ataque al metal del sustrato. A menudo se requiere un desengrasado completo para asegurar un ataque uniforme (una zona de grasa puede actuar como mascarilla). Después del ataque químico, la pieza debe enjuagarse para evitar el ataque posterior. Al igual que el maquinado químico se acelera con la aplicación de una corriente eléctrica (Secc. 17-3), también la limpieza se puede apresurar por medio de la *limpieza electrolítica*, si la pieza actúa como cátodo, ánodo, o con polaridad alterna, en función del material y del tipo de suciedad que debe eliminarse.

19-3 RECUBRIMIENTOS DE CONVERSIÓN

En el recubrimiento de conversión, la capa superficial de los metales se transforma a través de una reacción química.

Oxidación Muchos metales se oxidan en servicio; además, la oxidación incontrolada puede producir cambios indeseables en la apariencia superficial, y en corrosión localizada o global. Sin embargo, los tratamientos químicos o a temperatura elevada pueden propiciar formas deseables de oxidación resistentes a la corrosión. Así, la superficie ennegrecida producida por químicos sobre el acero resiste la oxidación; asimismo, el cobre y el latón se tratan para obtener varios tonos de color negro, café, azul y verde. Un óxido duro de espesor y color controlados se acumula en el aluminio (y también en el Mg y el Ti) por medio del *anodizado*. Después de remover el óxido natural, la pieza se sumerge en un electrolito acuoso y se conecta a la terminal positiva de una fuente de energía de CD (y de esta manera se convierte en el ánodo). Se genera una película de

óxido, enlazada estructuralmente al sustrato. Es factible infiltrar un óxido poroso con los tintes adecuados para obtener un color decorativo, o éste se produce durante la deposición. La inmersión en agua hirviendo convierte a la alúmina en monohidróxido y sella la superficie. Los recubrimientos más gruesos (de 25 a 100 μm) y más densos producidos en el *anodizado duro* son resistentes al desgaste y se puede incluir PTFE para reducir la fricción y aumentar la resistencia al desgaste.

Recubrimiento de fosfato En la sección 8-2-4 se vio que las superficies de acero se recubren con fosfato para retener el lubricante en la deformación pesada. La inmersión en un baño de fosfato de Zn y ácido fosfórico diluido causa el crecimiento de una capa de fosfato de zinc cristalino en la que los canales interconectados ayudan a atrapar al lubricante; si se aplica en una capa más delgada, el recubrimiento sirve como base para pintura. Se dispone de tratamientos similares para otros metales, incluyendo el aluminio y el acero galvanizado.

Recubrimiento de cromato Un recubrimiento muy delgado (menor de 2.5 μm) claro o coloreado se forma por inmersión en un baño de ácido crómico diluido y otros químicos. Algunas latas para alimentos tienen, por ejemplo, un recubrimiento de este tipo como capa base en la superficie de acero.

19-4 TRATAMIENTOS POR CALOR

En algunos tratamientos térmicos se cambian las propiedades de una capa superficial; en otros se aplica un recubrimiento por solidificación.

19-4-1 Tratamiento térmico de la superficie

La principal aplicación es para el acero.

Endurecimiento superficial Como se muestra en la sección 6-4-4, una capa superficial se endurece si el acero tiene suficiente carbono. Para esto, la superficie se debe calentar en el intervalo de temperatura austenítica y templar rápidamente para formar martensita. Se pueden aplicar varios métodos de calentamiento:

1. El *endurecimiento por flama* se basa en el calor producido por un soplete que maneja oxígeno y gas combustible, para el endurecimiento local o global, tanto en situaciones de pequeña producción como de media a alta.

2. En el *endurecimiento por inducción*, una bobina de cobre enfriada con agua rodea a la pieza. Una corriente de alta frecuencia suministrada a la bobina calienta la superficie hasta una profundidad controlada, seguida por templado con agua.

3. El endurecimiento por haz de alta energía se basa en la elevada intensidad de la energía de haces de electrones (desenfocados para evitar la fusión) y de rayos láser

(Secc. 18-7-2). El *endurecimiento mediante haz de electrones* y *rayo láser* permite el calentamiento rápido de la superficie del acero en un patrón controlado. Si la pieza es suficientemente grande, el volumen no calentado enfría la superficie tan rápido como para proporcionar el temple requerido.

19-4-2 Recubrimiento por difusión

Cuando el acero no tiene suficiente carbono, la superficie se enriquece difundiendo en ella la especie atómica necesaria (C o N).

Carburización El carbono se difunde en el acero mantenido en el intervalo de temperatura austenítica (por lo general, de 850 a 950°C) por medio de diversas técnicas. La *carburación con gas*, la técnica más usada, se lleva a cabo en un horno con gases ricos en carbono (gas natural, propano o metano) y uno portador (normalmente una mezcla de N_2, CO y H_2). Para la *carburación al vacío*, la pieza se calienta en un vacío moderado y entonces se admite el gas hidrocarburo. La carburación en un compuesto sólido (*carburación por empaque*) o en un *baño de sal* actualmente se utiliza menos. Es más efectiva la carburación con plasma, que se analiza en la sección 19-6-4. La pieza es entonces templada y revendida.

Nitruración El nitrógeno se puede difundir en aceros de aleación a temperaturas de 500 a 560°C para crear una capa superficial delgada y dura al formar nitruros con Cr, V, W y Mo. Los nitruros con Al proporcionan un revestimiento muy duro pero frágil. El proceso se puede realizar con un gas o un líquido; la nitruración con plasma (Secc. 19-6-4) está ganando popularidad. No hay necesidad de revenir y si el acero se puede tratar térmicamente, se debe templar y revenir antes de nitrurarlo. La *carbonitruración* es una variante de la carburación con gas, con amoniaco mezclado en la atmósfera del horno. El revestimiento resultante es delgado y duro.

Difusión de metal En el *cromizado*, el cromo se difunde en la superficie de los aceros y superaleaciones para incrementar la resistencia a la corrosión, pero el carburo que se forma con los aceros al carbono descarburiza la superficie. La *codifusión* de silicio con cromo elimina el problema. El *aluminizado* se aplica para elevar la resistencia a la corrosión a alta temperatura de aceros y superaleaciones.

Ejemplo 19-1

Las compañías petroquímicas tienen que lidiar con fluidos acuosos altamente corrosivos en sus refinerías, especialmente si procesan crudos pesados o ácidos. El acero al carbono sufre corrosión severa, los aceros inoxidables ferríticos o austeníticos (tabla 8-2) tienen una conductividad térmica baja (tabla 4-1) y tampoco están libres de problemas de corrosión. Una solución es fabricar tubos cambiadores de calor de un acero al carbono (AISI 1018) recubiertos con una capa codinfundida de Cr-Si en el interior. Un polvo de Cr y Si (aleaciones fuente), sales halógenas (activadores) y un relleno inerte (como la alúmina), se pone en contacto con la superficie. Al calentar entre 1 060 y 1 200°C, el activador reacciona con las aleaciones fuente y los haluros

formadas de esta manera reaccionan con la superficie del tubo. Se depositan cromo y silicio y en un ciclo de 12 a 45 h, se difunden hasta una profundidad de 0.25 a 0.5 mm. [*Fuente*: G.T. Bayer, *Adv. Mater. Proc.*, 1998(2):25-28.]

19-4-3 Recubrimientos por inmersión caliente

Las piezas terminadas de acero, así como la lámina de acero para trabajo posterior (Secc. 10-1-1) se recubren por medio de estas técnicas.

Galvanizado por inmersión caliente Las piezas se sumergen en un baño de zinc fundido que puede estar protegido con un fundente. La tira de acero, soldada para producir un rollo de longitud infinita, se guía a través de un baño fundido con la ayuda de rodillos. El tiempo de residencia y la composición del baño se controlan para minimizar la formación de un intermetálico frágil en la interfase Fe-Zn y para desarrollar o suprimir *lentejuelas* (formación visible de cristales). El espesor de la capa del recubrimiento se controla soplando el exceso de zinc con la ayuda de aire o nitrógeno. Muchos productos de lámina (sobre todo en carrocerías automotrices) se sueldan por puntos y la aleación del zinc con los electrodos de cobre reduce la vida del electrodo.

Galvanor recocido Cuando la tira que emerge del baño de zinc se recalienta hasta alrededor de 500°C, el recubrimiento se transforma en fases intermetálicas de Fe-Zn con alrededor de 9 a 12% Fe. Esto es más favorable para la soldadura de puntos porque se aminora el aleado con el electrodo de cobre. Sin embargo, el recubrimiento frágil es propenso a agrietarse y pulverizarse durante el formado.

Recubrimientos de Zn-Al Virtualmente no hay interfase frágil en los recubrimientos de la aleación casi eutéctica Zn-5Al y se minimizan las lentejuelas. Un recubrimiento de Zn-55Al provee mejor resistencia a la corrosión, pero la superficie presenta el acabado tipo lentejuela.

Recubrimientos de aluminio No hay capa intermetálica significativa con recubrimientos delgados (de 20 a 25μm) de una aleación de Al-Si (entre 5 y 11% de Si), así que las láminas se forman fácilmente y son adecuadas para aplicaciones de alta temperatura como los sistemas de escape para automóviles. Un recubrimiento de Al puro forma un intermetálico frágil y se usa sobre todo para estructuras exteriores ligeramente formadas.

19-4-4 Recubrimientos por sobrecapas de soldadura

Se pueden usar varios procesos de soldado para depositar recubrimientos relativamente gruesos (hasta de 25 mm).

Revestimiento duro Para mejorar la resistencia al desgaste de un cuerpo de baja resistencia pero tenaz, la pieza se recubre con una capa superficial muy dura y algunas

veces frágil, que se une fundiendo el sustrato. El *revestimiento duro* no sólo se emplea para reparar sino también para la manufactura inicial de herramientas de corte, barrenas para roca, cuchillas de corte, piezas para equipo de movimiento de tierra, válvulas y asientos de válvulas para motores diesel, guías de sierra, matrices de forjado y tornillos para la extrusión de productos de plástico y alimenticios. Se usan aleaciones con base de hierro o de cobalto con hasta 4% C y una alta proporción de elementos formadores de carburos (Cr, Mo, W); las aleaciones con base de níquel contienen tanto carburos como boruros (hasta 5% C + B). Frecuentemente tienen una concentración tan elevada del elemento aleante que no se puede manufacturar en varillas de soldadura. Entonces, los ingredientes se incorporan en el recubrimiento fundente o se empacan dentro de varillas tubulares y la aleación se forma en el proceso mismo de soldadura. Las partículas duras como el WC también pueden ser depositadas en una matriz metálica. La deposición se realiza con técnicas de fusión de soldaduras (Seccs. 18-6 y 18-7). La entrada de calor se controla para prevenir la fusión excesiva del volumen, lo que diluiría el depósito, pero hay una zona afectada por el calor. Cuando los procesos se utilizan para reconstruir engranes, flechas, matrices y otros componentes desgastados, se habla de *sobrecapas de soldadura*. La tasa de la deposición de metal aumenta de dos a cinco veces, al proporcionar polvo de metal a la zona de calor o sustituir una tira por el alambre de soldadura (*recrecimiento con soldadura en tiras*). Los recubrimientos, principalmente de acero inoxidable, se aplican para resistencia a la corrosión en el *revestimiento por soldadura*. La deposición de WC por medio de un arco eléctrico se llama *endurecimiento por chispas*, útil para herramientas de corte.

Rocío térmico (deposición de partículas fundidas) Difiere del revestimiento duro en que el sustrato no se funde y en que la zona afectada por el calor es pequeña o nula; así, el sustrato se puede enfriar con un gas o un líquido. Cualquier material cuyo punto de fusión sea de al menos 300°C por debajo de su temperatura de vaporización o descomposición puede rociarse. Un material metálico o no metálico en forma de alambre o polvo se alimenta en una fuente de calor como una flama de oxígeno y combustible (*rocío con flama de alambre* o *polvo*, Fig. 19-2*a*), en un arco producido entre dos electrodos consumibles (*rocío con arco*), o en un arco de plasma no transferido (*rocío con plasma*, Fig. 19-2*b*), el cual también se puede operar en el vacío (*rocío de plasma al vacío*). En un proceso único, la combustión de oxígeno y gas combustible en un espacio confinado produce un flujo supersónico de alta presión de gas, ya sea continuo [*rocío de polvo de alta velocidad* (HVOF), Fig. 19-2*c*] o intermitente (*pistola de detonación*), y el polvo se alimenta en este flujo. El material fundido o suavizado choca con la superficie, se aplana en plaquillas (*listones*) para construir un recubrimiento laminar. Las velocidades varían de 30 a 1 200 m/s (tabla 19-1) y pueden exceder los 2 000 m/s. El espesor del recubrimiento es de hasta 3 mm para aleaciones ferrosas, de 5 mm para las no ferrosas, y por lo general de 0.4 mm para cerámicos y carburos.

Como el enlace es principalmente mecánico, la superficie se debe hacer áspera por medio de un chorro de arena o si el cuerpo es cilíndrico, por roscado. Se utilizan recubrimientos metálicos (Zn, Al, aleación de Zn-Al), de matriz metálica (Al-10Al_2O_3) y cerámicos (por ejemplo, en boquillas de los motores de cohetes y en matrices para la extrusión en caliente de acero, Secc. 9-4-2). Los polvos de metal a menudo se producen a través de técnicas de solidificación rápida (Secc. 11-2-1). Las posibilidades son infi-

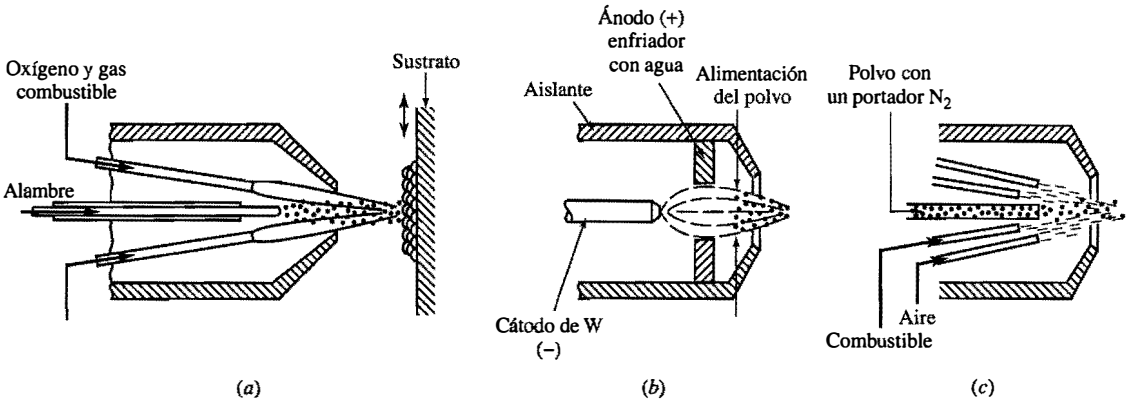


Figura 19-2 (a) Rocío con llama, (b) rocío por plasma y (c) rocío con oxígeno y gas combustible de alta velocidad.

nitas; por ejemplo, se depositan capas alternantes de metal-cerámico, como también polvos fluoropoliméricos recubiertos de cerámico. Los recubrimientos se aplican para elevar la resistencia a la corrosión a temperaturas atmosféricas y altas (turbinas y motores de reacción de operación en tierra), para la resistencia al desgaste en la industria textil, de papel y metálica; y como recubrimientos de barrera térmica para motores de reacción y diesel.

Ejemplo 19-2 Las turbinas estacionarias de gas usadas en la generación de energía eléctrica no sólo se someten a altas temperaturas, sino también a la corrosión por combustibles contaminados. Por lo tanto, los recubrimientos son esenciales en todos los componentes de las etapas calientes. Los recubrimientos de aluminio del tipo de difusión aplicados a motores de reacción no proporcionan la

Tabla 19-1 Características de los procesos de rocío térmico*

Proceso	Temperatura, °C	Velocidad de impacto, m/s	Tasa de rocío, kg/h	Energía, kWh/kg	Contenido de óxido, %	Resistencia adhesiva†	Resistencia cohesiva†	Costo
Oxígeno y gas combustible, polvo	2 200	30	7	11-22	6	E	E	3
Oxígeno y gas combustible, alambre	2 800	180	9	11-22	4	D	C	3
Arco de alambre	5 500	240	16	0.2-0.4	0.5-3	C	B	1
Plasma	5 500	240	5	13-22	0.5-1	C	B	5
Plasma al vacío	8 300	240-600	10	11-22	ppm	A	A	5
Pistola de detonación	3 900	900	15	220	0.2	B	A	4
HVOF	3 100	600-1 200	25	20-200	0.1	B	A	10

* Principalmente de datos de M.L. Thorpe, *Adv. Mater. Proc.*, 1993 (5): 50-61.
† Clasificaciones relativas, con A indicando el valor mayor.

protección adecuada, ya que los tiempos de operación son mayores y el combustible y el aire están más contaminados. Para una barrera contra la oxidación, se forma Al_2O_3 al principio del ciclo si hay suficiente Al presente en la aleación. De otra manera, se deposita un recubrimiento de platino-aluminio por rocío de plasma al vacío. Encima de éste, se aplica una barrera térmica que consiste en un recubrimiento delgado de unión seguido de una capa aislante de óxido. Los recubrimientos de rocío de plasma con base de Co también se aplican para proveer resistencia al desgaste. [Según P.W. Schilke, A.D. Foster, J.J. Pepe y A.M. Beltram, *Adv. Mater. Proc.*, 1992 (4): 22-30.]

19-5 RECUBRIMIENTOS METÁLICOS

Los recubrimientos metálicos superficiales se pueden aplicar mediante varias técnicas.

19-5-1 Electrodeposición

En la sección 11-8 vimos que, en el electroformado, se deposita una capa de metal y luego se retira de una herramienta (mandril) para fabricar una pieza. El mismo proceso electroquímico se puede emplear para la *electrodeposición* (*recubrimiento*) de una pieza producida por medio de otra técnica, pero ahora el depósito se queda en su lugar por razones estéticas o técnicas, sobre todo para dar resistencia al desgaste y a la corrosión. Por lo tanto, nuestros esfuerzos se dirigirán a elevar la fuerza del enlace entre el recubrimiento y el sustrato.

Se da un cuidado extremo a la limpieza de la parte al utilizar las técnicas descritas en la sección 19.2. La deposición de metal es lenta (por lo general hasta 75 μm/h), pero el espesor del recubrimiento (a menudo de 10 a 500 μm) se puede controlar con precisión. Las piezas con configuraciones superficiales irregulares pueden recubrirse uniformemente de manera razonable, en especial si el ánodo está bien colocado y si es necesario, tiene forma. Se acumula una capa gruesa en los bordes y si esto es inaceptable, el exceso se remueve con un maquinado abrasivo, o se cambia la forma de la pieza para compensar la acumulación diferencial. Así, a las esquinas se les dan radios generosos y las paredes de los recesos se ahúsan (Fig. 19-3). La deposición se puede evitar localmente cubriendo la superficie.

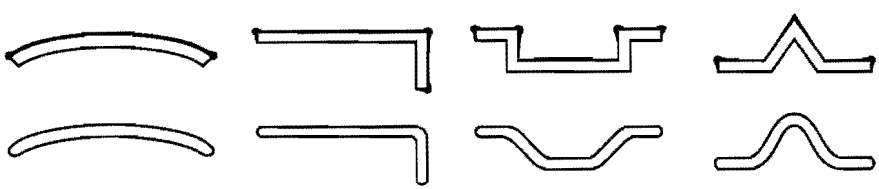


Figura 19-3 Acumulación diferencial de recubrimientos (fila de arriba) y cambios del diseño para su mitigación (fila de abajo).

El estaño y el zinc se depositan de manera continua en la lámina de acero para un trabajo posterior (Secc. 10-1-1). El zinc y el cadmio se depositan sobre piezas que requieren resistencia a la corrosión, pero el cadmio no se puede usar para aplicaciones de alimentos debido a su toxicidad. El cobre se deposita para protección contra la corrosión y para producir circuitos eléctricos (Seccs. 20-3-4 y 20-4). El níquel se emplea extensamente para proveer resistencia a la corrosión. El cromo se aplica en una capa delgada (cerca de 1.3 μm) sobre recubrimientos de níquel por razones estéticas. Las capas más gruesas (de 2.5 a 500 μm), colocadas directamente sobre el metal base (*recubrimiento duro de cromo*, HV 1 000), pueden necesitar pulido con diamante, pero entonces imparten resistencia al desgaste a las matrices y reducen su adhesión a muchos materiales de las piezas de trabajo, incluyendo el aluminio y el zinc. Los metales preciosos se usan para propósitos decorativos y sobre todo en dispositivos electrónicos, para protección contra la corrosión.

Ejemplo 19-3

En la industria automotriz, se espera que las matrices usadas para el estirado-embutido (Secc. 10-7) produzcan cientos de miles de piezas de lámina de metal. La descomposición local del lubricante propicia la soldadura en frío y la transferencia de metal (agarre sobre la herramienta), así que la superficie de las piezas se estría. En el estirado de lámina galvanizada, el zinc transferido a las matrices por lo general requiere del paro de la prensa y de la eliminación manual del metal adherido. Para una mayor productividad, las matrices tienen un recubrimiento duro de cromo. Las pruebas han demostrado que no necesariamente se reduce la fricción, sino que la adherencia sobre la herramienta se elimina casi por completo y el proceso se hace mucho menos sensible a la lubricación. [Fuente: J.A. Schey, *Lubric. Eng.*, **52** (1996): 667-681.]

19-5-2 Recubrimiento sin electricidad

La pieza, sumergida en un baño acuoso de sales metálicas, un agente reductor y varios aditivos, actúa como catalizador para la reducción de iones metálicos con el objeto de formar el recubrimiento. La deposición progresa a una rapidez uniforme sobre toda la superficie, incluso en piezas de configuración compleja y en cavidades. El recubrimiento se adelgaza en los bordes agudos y por tanto se les deben dar radios de 0.4 mm.

La aplicación más amplia es para el níquel con hipofosfito como agente reductor. El recubrimiento incorpora de 2 a 10% P; la dureza disminuye pero la resistencia a la corrosión se incrementa al elevar el contenido de P. La dureza de los recubrimientos de bajo P aumenta aún más (hasta HV 1 000) con un tratamiento térmico. Se pueden incorporar partículas de PTFE, SiC y de diamante. La deposición sin emplear electricidad de cobre y oro se usa en placas de circuitos impresos.

Chapado mecánico Cuando las piezas se tombolean con cuentas de vidrio, polvo metálico y químicos aceleradores en agua, se deposita un recubrimiento metálico bajo el impacto de las cuentas de vidrio. El enlace se realiza esencialmente por mecanismos de soldadura en frío. Una gran ventaja es que no hay fragilidad por hidrógeno, tan frecuente con los métodos químicos y electrolíticos.

19-5-3 Metalización de plásticos y cerámicos

La electrodeposición en superficies no metálicas se ha practicado desde hace mucho tiempo, pero la escasa adherencia hizo necesaria la contención completa (como en flores y zapatos de bebé). Las aplicaciones técnicas fueron posibles al mejorar la adhesión por medio del entrelazado mecánico, y posiblemente también gracias a enlaces químicos. Los recubrimientos se aplican con propósitos decorativos (accesorios de plomería, piezas automotrices), en reflectores (faros de automóviles), en la conducción eléctrica (tableros de circuitos impresos), y en la protección electromagnética (dispositivos electrónicos).

La preparación para el chapado sin electricidad implica varios pasos diseñados para remover las películas superficiales y mejorar la adhesión. Así, al preparar ABS, se usa una mezcla de ácido crómico y sulfúrico para retirar la fase butadieno de la superficie. Luego se retiran todos los residuos del ácido, la superficie se cataliza con una capa muy delgada de paladio y se deposita níquel o cobre. Sobre el chapado producido de esta manera se pueden electrochapar varios metales. De nuevo se aplican las consideraciones de diseño que se muestran en la figura 19-3.

El rocío térmico se aplica a todos los plásticos a condición de que las temperaturas no sean demasiado altas. Esto lo limita a metales de bajo punto de fusión, principalmente zinc. La superficie a menudo se hace rugosa, o se recubre con una pintura, para mejorar la adhesión.

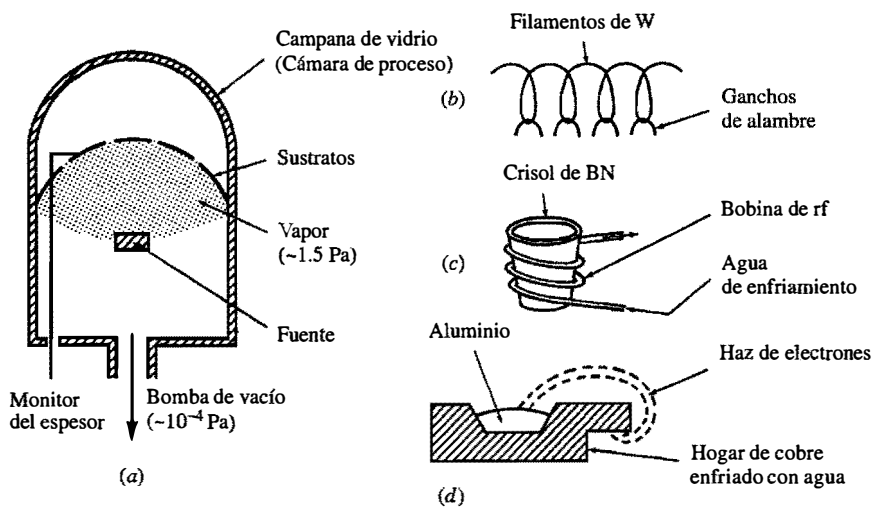


Figura 19-4 Deposición física por vapor (PVD): (*a*) configuración básica, en la cual la fuente puede ser un (*b*) alambre evaporado en un filamento de tungsteno, (*c*) fusión calentada por inducción de radiofrecuencia o (*d*) metal impactado por un haz de electrones. [*Según D.B. Fraser, en VLSI Technology, S.M. Sze (ed.), McGraw-Hill, 1983, p. 357. Se reproduce con autorización de Bell Telephone Laboratories.*]

En la sección 18-10-2 ya se analizaron algunos procesos para metalizar cerámicos. La metalización a través de técnicas de deposición al vacío, analizadas en seguida, está muy difundida, sobre todo en los dispositivos semiconductores (Secc. 20-3-4).

19-6 DEPOSICIÓN FÍSICA POR VAPOR (PVD)

Una sustancia como un metal o un óxido puede evaporarse con la aplicación de suficiente calor. Los átomos o moléculas liberadas se alejan de la fuente en todas direcciones; cuando llegan al rango de atracción atómica o molecular de la pieza de trabajo (sustrato), se condensan en él. Para facilitar el enlace, la pieza de trabajo a menudo se calienta por debajo de su punto de fusión. Se practican varios métodos de operación.

19-6-1 PVD térmica

En la forma básica de la PVD (también llamada *deposición al vacío*, Fig. 19-4*a*), la sustancia, por ejemplo un metal, se evapora por medio de alguna de varias técnicas: se colocan pequeños ganchos de alambre en un filamento de metal refractario (por lo general, W) (Fig. 19-4*b*); calentándolo en un crisol por inducción (Fig. 19-4*c*); o, para una rapidez mayor de deposición, se usa la incidencia de electrones en la superficie del metal (EB-PVD, Fig. 19-4*d*). En el EB-PVD, el calentamiento se confina a una zona pequeña del metal y no se introducen contaminantes desde los crisoles. Una variante nueva es la *deposición por láser pulsado*, en donde los impulsos cortos de láser (10-30 ns) evaporan la sustancia (que puede ser un metal o un cerámico, como un superconductor de alta temperatura).

Ejemplo 19-4 Una combinación poco común se encuentra en el motor turboventilador GE90 (Fig. 1-2); los grandes álabes del ventilador están hechos de un compuesto de grafito-epóxico y los bordes de ataque son de titanio para protección contra impactos de cuerpos duros. (Fuente: GE Aircraft Engines, Cincinnati, Ohio.)

Los choques con átomos de aire o de otro gas reducirían la eficiencia del sistema; por lo tanto, la PVD se traslada en una campana de vidrio, evacuada hasta 10^{-4} a 10^{-2} Pa. El espesor se monitorea colocando un cristal de cuarzo en la campana; a medida que el depósito se acumula, la frecuencia natural del cristal, y en consecuencia la de un oscilador controlado por cuarzo, cambia. La tasa de deposición es de algunos micrómetros por hora, pero se incrementan a más de 100 μm/h en el EB-PVD. Pueden introducirse gases (oxígeno, nitrógeno o gases de hidrocarburos) en forma medida en la cámara de vacío para producir óxidos, nitruros o carburos por *evaporación reactiva* (una transición a la deposición química por vapor).

Para un mejor enlace, con frecuencia se calienta el sustrato. La rapidez de deposición se acelera con la aplicación de un campo eléctrico de CD, haciendo a la fuente el cátodo, y al sustrato el ánodo. El material se remueve de la fuente en forma de iones cargados negativamente, que se aceleran hacia el sustrato mediante la carga positiva del sustrato.

Ejemplo 19-5

Los componentes de los motores de reacción se someten a las condiciones más severas durante su operación. A velocidad de crucero, las piezas giran a 12 000 rpm, con claros de 0.025 mm, a temperaturas mayores de 1 100°C; mientras que el aire a 960 km/h, cargado con contaminantes, pasa precipitadamente para reaccionar con los productos de la combustión de los hidrocarburos a 1 900 km/h. Los recubrimientos se usan extensamente y la EB-PVD es una de las técnicas para recubrir álabes de turbina. Para elevar la productividad, varios álabes se montan en un bastidor y se giran durante el recubrimiento. Después de evacuar a 2 Pa, los álabes se calientan mediante resistencia de 960 a 980°C (dependiendo de la aleación), se operan los cañones de EB y se coloca una película de 0.1 a 0.2 μm de espesor de MCrAlY (M es el metal base y puede ser Fe, Co, o una aleación de Co-Ni). La aleación del recubrimiento se suministra continuamente al crisol para mantener constante el nivel de la fusión. Luego se permite que las piezas se enfríen hasta 300°C antes que se abra la cámara. Se obtienen mejoras adicionales con un recubrimiento de barrera térmica TBC de 0.25 mm de espesor de $ZrO_2 + Y_2O_3$. [Datos de G. Simmons y R.C. Seanor, *Adv. Mater. Proc.*, 1994 (12): 35-37, y de H. Lammermann y G. Kienel, *Adv. Mater. Proc.*, 1991 (12): 18-23.]

19-6-2 Deposición de metal por bombardeo iónico

El método de operación cambia cuando la cámara de vacío se vuelve a llenar parcialmente (de 3 a 8 Pa) con un gas inerte pesado como el argón (Fig. 19-5).

Los gases no son conductores a temperatura ambiente, pero los electrones se pueden separar de los átomos (el gas se ioniza y es conductor) suministrando energía en forma de impacto de electrones, rayos X, luz ultravioleta, o calor. En efecto, en la sección 18-6 se vio que un *plasma* —una mezcla neutra y gaseosa de electrones e iones positivos— se forma al calor intenso de un arco de soldadura. Ese plasma de alta temperatura sería inútil para otros propósitos, pero se puede obtener otro imponiendo un campo eléctrico de magnitud crítica sobre un gas. Muchos de los electrones liberados por la entrada de energía los capturan los iones positivos, aunque algunos sobreviven y se dispersan elásticamente para chocar con los átomos circundantes, excitándolos así hacia estados cuánticos mayores. Cuando los átomos regresan al estado estable, la energía liberada se emite como fotones, provocando la *descarga luminiscente* característica. Si la energía de electrones es suficientemente alta, éstos ionizan a otros átomos, por lo tanto, por encima de un voltaje crítico (el *potencial disruptivo*) el gas se ioniza y se vuelve conductor. Por lo general, de los 10^{16} átomos/cm^3 que están presentes a presión atmosférica, sólo 10^9-10^{12} átomos/cm^3 se ionizan. De ahí que, aunque la temperatura media de los electrones está entre 10^4 y 10^5 K, el gas en sí permanece frío, una gran ventaja para muchos procesos.

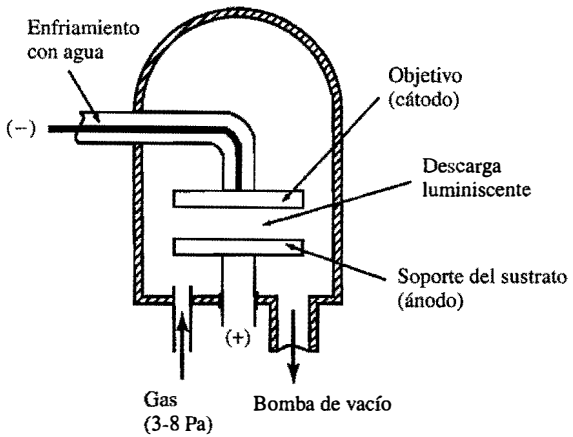


Figura 19-5 Configuración para el chisporroteo. (*Según D. Roddy, Introduction to Microelectronics, 2a. ed., Pergamon Press, Oxford, 1978, p. 137. Reimpresa con permiso.*)

Para la PVD, el plasma se forma imponiendo un alto potencial cd (2 a 6 kV) en los dos electrodos colocados en la envolvente vuelta a llenar. Los iones de argón positivos y pesados se aceleran en el campo eléctrico y se lanzan contra el cátodo (*objetivo*, la sustancia que se va a depositar) a tal velocidad que el impacto desaloja (chisporroteo) a los átomos de la superficie; los átomos liberados de esta manera se depositan en el ánodo (*sustrato*, la pieza que se va a recubrir). Si el gas es oxígeno en vez de argón, los átomos del cátodo desalojados se oxidan inmediatamente y se deposita un óxido en el sustrato (chisporroteo reactivo). El chisporroteo también es útil en otras formas: si a los sustratos se les da una carga negativa, su superficie se limpiará de todos los contaminantes y películas adsorbidas (*ataque químico por rayo láser*).

Los aislantes no se pueden tratar con PVD con CD porque una carga positiva se acumula en el cátodo, repeliendo los iones de Ar. Por lo tanto, la PVD se conduce con CA en el rango de radiofrecuencia (rf) (la frecuencia de 13.56 MHz está asignada internacionalmente para uso industrial y científico). Una gran ventaja de ese chisporroteo por *rf* es que, como el ánodo se descarga cada medio ciclo de polaridad inversa, el electrodo se puede cubrir incluso con un aislante, permitiendo el procesamiento de SiO_2 y de otros cerámicos. En el *chisporroteo con magnetrón* el objetivo (cátodo) está rodeado por un campo magnético que captura electrones, incrementando su eficiencia de ionización, y en consecuencia la rapidez de pulverización.

Los átomos viajan en línea recta (*deposición rectilínea*), y las formas reentrantes no se pueden recubrir. La rapidez de deposición es constante para los puntos que yacen en la superficie interna de una esfera, así que los sustratos se sujetan a secciones rotatorias esféricas. La rapidez de deposición usual es de 1 μm/min para el aluminio.

19-6-3 Recubrimiento iónico

El *recubrimiento iónico* es una combinación de la PVD térmica y del chisporroteo la rapidez de evaporación se mantiene más alta que la del chisporroteo del sustrato. En consecuencia, se forma un recubrimiento denso y adherente mientras la superficie se limpia continuamente por los iones de bombardeo. En el *recubrimiento iónico reactivo* un gas reactivo es admitido en el argón; así, el proceso representa una transición a la deposición química de vapor. El familiar recubrimiento de TiN de color oro se forma en las herramientas de corte evaporando titanio en una atmósfera de Ar-N_2. Los recubrimientos son lisos, densos y tienen esfuerzos residuales elevados de compresión. Se agregan otras composiciones; en particular, el TiAlN tiene alta resistencia a la oxidación.

La *deposición asistida por haz iónico* combina la PVD con el bombardeo por iones producidos independientemente en un cañón asistido por iones. Los recubrimientos son densos y tienen alta adhesión y si el evaporante o haz iónico es reactivo, se puede depositar una capa compuesta (por ejemplo, Si_3N_4).

19-6-4 Carburación y nitruración por plasma

También llamados *carburación iónica* y *nitruración iónica*, estos procesos aprovechan la ionización del gas en un plasma. Así, los iones bombardean la superficie y desarrollan capas profundas de difusión. Las capas de carburo se forman en gas metano y las capas de nitruro con nitrógeno.

19-7 DEPOSICIÓN QUÍMICA POR VAPOR (CVD)

El término *deposición química por vapor* (CVD) se refiere a la deposición de un elemento (o compuesto) producido por una reacción de fase de vapor entre un compuesto del elemento y un gas o vapor reactivo, con la formación de derivados que se deben retirar del reactor. Con frecuencia se hacen provisiones para la introducción de varios compuestos reactivos en sucesión.

1. En la forma básica de la CVD (CVD *térmica*), los gases reactivos se introducen en una cámara (reactor) y los derivados se retiran a través de un sistema de escape (Fig. 19-6). Se puede conducir a presión atmosférica (AP-CVD) o a una presión reducida, más baja (10^2 Pa) (LP-CVD). La temperatura en el reactor se mantiene suficientemente alta (por lo general 900°C o mayor) para iniciar la reacción. Debido a la alta temperatura, el recubrimiento se agrietara al enfriarse si existe una gran diferencia en el coeficiente de dilatación térmica entre la base y el recubrimiento. Además, los aceros para herramienta deben tratarse térmicamente de nuevo después de recubrirlos.

2. Algunas de las desventajas anteriores se minimizan en la *CDV por plasma* (*CVD asistida por plasma* o PA-CVD): la reacción se activa con un plasma, así las temperaturas son mucho menores (de 300 a 700°C). El proceso está ganando popularidad en los

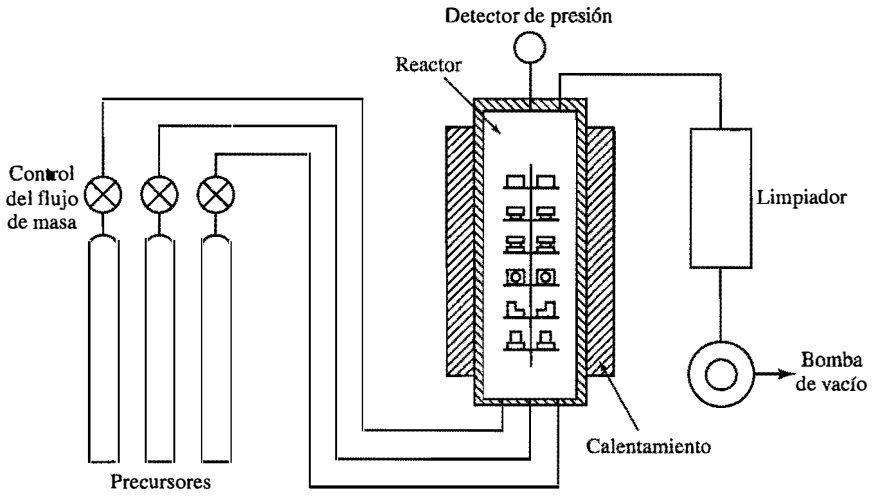


Figura 19-6 Configuración característica para la deposición química por vapor.

recubrimientos de herramientas. La energía de rayos láser también se puede utilizar (*CVD por láser*).

3. En la *CVD en reactor cerrado*, las piezas se encierran con los reactivos en una caja y se calientan. En consecuencia, la carburación y la nitruración sólidos, el cromado, el aluminizado y el siliconizado pertenecen a esta categoría.

La CVD se utiliza con amplitud no sólo en la manufactura de semiconductores (Cap. 20), sino también para producir polvos cerámicos muy finos y para recubrimientos en herramientas. Algunas reacciones típicas son:

Para el nitruro de boro:

$$BF_3 + NH_3 \rightarrow BN + 3HF \text{ (a 1 100 - 1 200° C y 103 kPa)} \quad \textbf{(19-1)}$$

$$B_2H_6 + 2NH_3 \rightarrow 2BN + 6H_2 \text{ (en plasma a 300 - 400° C y 0.13 kPa)} \quad \textbf{(19-2)}$$

Para nitruro de silicio:

$$3SiCl_4 + 4NH_3 \rightarrow Si_3N_4 + 12HCl \text{ (a 850° C y 103 kPa)} \quad \textbf{(19-3)}$$

Para nitruro de titanio:

$$TiCl_4 + NH_3 + \frac{1}{2}H_2 \rightarrow TiN + 4HCl \quad \textbf{(19-4)}$$

Para alúmina:

$$2AlCl_3 + 3H_2 + 3CO_2 \rightarrow Al_2O_3 + 3CO + 6HCl \text{ (a 1 050° y 0.13 kPa)} \quad \textbf{(19-5)}$$

La descomposición a alta temperatura produce elementos como el níquel a partir del carbonilo:

$$Ni(CO)_4 \rightarrow Ni + 4CO \text{ (a 180 - 200° C y 103 kPa)} \quad \textbf{(19-6)}$$

o carburo silicónico del triclorosilano de metilo:

$$CH_3SiCl_3 \rightarrow SiC + 3HCl \quad \textbf{(19-7)}$$

Los recubrimientos de diamante por CVD se fabrican por medio de la descomposición térmica de un hidrocarburo y la deposición sobre herramientas de carburo entre 700 y 900°C. La adhesión es el punto crítico. El *carbono semejante al diamante* (DLC) tiene una estructura entre la del diamante y la del grafito, pero su dureza aún es útil (alrededor de 5 000 HV) para recubrimientos de herramientas.

El número de reacciones y aplicaciones posibles es muy grande. Igual que muchos procesos en la ingeniería química, el modelado está muy desarrollado para diversas reacciones; además, el control por computadora de los procesos se puede basar en modelos válidos.

19-8 IMPLANTACIÓN DE IONES

El proceso se basa en la observación de que si los iones se aceleran suficientemente, se alojarán en el objetivo, así las especies de átomos extraños *contaminan* la superficie. Para que el proceso sea viable industrialmente, se debe encontrar una fuente iónica económica.

1. En el proceso original (Fig. 19-7), la *fuente iónica* consiste en un gas alimentado y en un horno caliente. El vapor o compuesto volátil generado en el horno entra a una descarga de plasma de gas noble, donde se ioniza. Así pues, se generan los iones del elemento contaminante y del gas. Después de la *aceleración*, los iones se someten a un imán fuerte (*imán analizador* o *separador de masa*), que desvía los iones de manera que solamente las especies deseadas pasan a través de una rendija (*apertura de resolución*). Los iones se aceleran hasta un nivel de energía elevado (30 a 200 keV), por lo que en el impacto penetran unos 10 a 1 000 nm por debajo de la superficie del sustrato, aun si está presente una película de óxido (en efecto, frecuentemente se genera intencionalmente tal película para proteger la superficie de reacciones no deseadas). Los voltajes que se aplican a las *placas desviadoras* provocan que el haz barra el área objetivo (o bien puede dejarse fijo el haz y el objetivo se mueve mecánicamente).

2. En un proceso más reciente, un arco de plasma es la fuente iónica, reduciendo en gran medida el costo de la implantación.

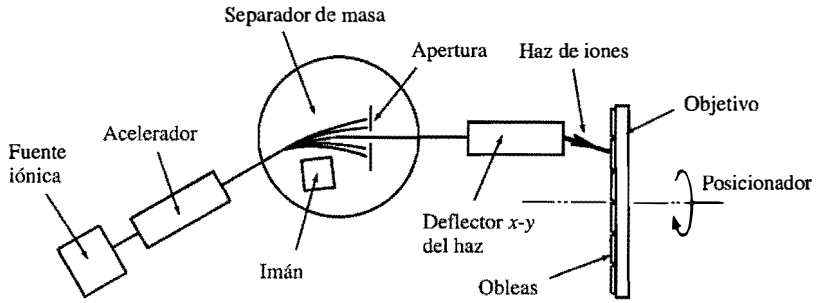


Figura 19-7 La implantación iónica es la técnica dominante en la tecnología VSLI y ULSI.

Los iones pierden su energía en choques con los núcleos y electrones del objetivo y llegan al reposo a una distancia por debajo de la superficie. Así, la composición superficial se modifica sin cambio dimensional y con calentamiento mínimo (normalmente por debajo de los 200°C). Los recubrimientos resistentes al desgaste se producen en herramientas e implantes como las prótesis para reemplazo de la cadera, pero la aplicación más importante es para dispositivos de estado sólido (Secc. 20-3-3). Si el ion entra con una alineación perfecta con una dirección cristalográfica principal, penetra profundamente. Para evitar ese efecto de *canalizado*, el haz de iones tiene una dirección un poco oblicua al eje del cristal, y así se obtiene una distribución de la profundidad a partir de la superficie.

19-9 RECUBRIMIENTOS ORGÁNICOS

El recubrimiento superior de muchos productos es una capa orgánica clara o pigmentada (*pintura*). Es un sistema de componentes múltiples que consiste en un formador de la película (*aglutinante*, que puede ser un aceite natural o un polímero natural o sintético), pigmentos sólidos finamente distribuidos para proporcionar color y opacidad (con menos frecuencia un tinte soluble), varios aditivos (agentes de curado, plastificantes, estabilizadores UV, etcétera) y en la mayoría de los casos, un solvente o un dispersante. En función del tipo de solvente, las pinturas se clasifican como:

1. Los *esmaltes* (no confundirlos con los esmaltes vítreos, Secc. 12-5-3) forman películas por medio de la evaporación del solvente, la oxidación o polimerización. Las pinturas con altos sólidos contienen más de 70% de sólidos en volumen para reducir los VOC (compuestos órganicos volátiles).

2. Las *lacas* forman películas por medio de la evaporación del solvente.

3. Las *pinturas en agua* pueden ser verdaderas soluciones, dispersiones coloidales o emulsiones.

4. La *pintura en polvo* está completamente formulada y molida en polvo fino.

El secado de una pintura puede ser tan sencillo como el secado con aire, pero puede implicar un *ciclo de curado* por calentamiento controlado, UV, o de microondas. La formulación de la pintura es tanto un arte como una ciencia bien desarrollados y se pueden encontrar pinturas adecuadas para la mayoría de los fines y métodos de aplicación. Una preocupación importante es el impacto en el ambiente y la salud, así que las formulaciones de las pinturas y los métodos de aplicación han experimentado un cambio rápido en las últimas dos décadas. Para consideraciones tanto ambientales como de costo, se realizan los máximos esfuerzos posibles para incrementar la *eficiencia de la transferencia* (porcentaje de pintura que se queda en el producto), para recuperar el sobrerrocío y para minimizar la contaminación del aire.

Aplicación El primer paso siempre es la limpieza completa (Secc. 10-2). Para mejor adhesión de la pintura, se aplica un recubrimiento de conversión (Secc. 19-3). La aplicación de la pintura puede ser manual, por inmersión, mecanizada, o mediante robots especializados con cinco o más ejes de control.

1. La *aplicación con brocha* es puramente manual y rara vez se aplica en la producción de altos estándares, excepto para reparación de áreas no expuestas.

2. La *aplicación con rodillos* es adecuada para la mecanización en el recubrimiento de superficies planas.

3. El *recubrimiento por rocío* se usa mucho con control tanto manual como automático. En el recubrimiento manual por rocío, la eficiencia de transferencia es pobre; la pintura se aplica en el campo de visión y la pistola se debe manipular alrededor de la pieza. En el rocío electrostático, la pieza y la pintura se conectan a una fuente de poder CD de alto voltaje (hasta 130 kV). La eficiencia de la transferencia se incrementa en gran medida. Las partículas de la pintura rodean la pieza, alcanzando los recesos, pero a menos que se controlen de forma apropiada, acumulan un recubrimiento más grueso en los bordes (efecto de jaula de Faraday). La atomización puede realizarse por medio de aire a cerca de 2 MPa (para mejor acabado superficial), presurizando la pintura hasta 30 MPa y dispensándola a través de una boquilla pequeña (*rocío electrostático sin aire*), desarrollando una presión menor (de 2 a 7 MPa), y asistiendo la atomización con aire auxiliar, o por fuerzas centrífugas desarrolladas en una *campana* o un *disco* de rotación rápida (30 000 rpm).

4. La pintura se puede aplicar sumergiendo la parte en un tanque. Las *pinturas autoforéticas* se depositan por la acción catalítica del metal (aleaciones ferrosas). Las *pinturas electroforéticas* se colocan en el cuerpo de metal cargado y se pueden formular para formar una película ya sea en una superficie catódica o anódica.

5. En la *deposición de polvo*, el polvo se dispensa por medio de aire comprimido a través de una pistola, con frecuencia de manera electrostática. Como la pintura está completamente formulada, se debe calentar antes de la aplicación (termoplásticas) o curar después de ella (termofijas).

Ejemplo 19-6

Las carrocerías de automóviles tienen un sistema avanzado de protección contra la corrosión que también satisface requisitos estéticos. La mayor parte de las carrocerías aún se fabrica de lámina

metálica y el sistema de protección contra la corrosión tiene varios elementos. Las láminas metálicas se recubren (por ejemplo, mediante uno de los procesos de galvanizado, Seccs. 19-4-3 y 19-5-1). La carrocería soldada pasa por un número de estaciones de rocío y tanques donde se limpia, se enjuaga de manera repetida, se fosfata (para protección contra la corrosión y adhesión de la pintura), se enjuaga, neutraliza, se lava de nuevo (también puede recibir un enjuague de ácido crómico), se enjuaga y se seca. La pintura en sí suele aplicarse en tres o cuatro manos. Una inmersión electroforética deposita hasta 35 μm de *recubrimiento base de resina*, el cual se hornea a alrededor de 180°C. Se aplica un recubrimiento plástico (PVC) amortiguador de sonido a áreas selectas (compartimiento del neumático y parte inferior de la carrocería) y uno elastomérico de protección contra piedras a la parte inferior de la carrocería. Luego se aplica el *imprimado*, a menudo como polvo, en una capa de 40 μm de espesor, horneado a 170°C. Algunos productos reciben después un recubrimiento de acabado, pero en la mayoría de los casos se aplica un recubrimiento *base de color* seguido *de un recubrimiento* superior transparente, horneado a alrededor de 140°C. Entre cada capa, los defectos se deben corregir a mano; se realizan grandes esfuerzos para minimizar este trabajo controlando la pintura y su aplicación por medio de características de diseño que facilitan la aplicación uniforme de la pintura.

19-10 CAPACIDADES DEL PROCESO Y ASPECTOS DEL DISEÑO

El número de procesos es muy grande y varios de ellos satisfacen una necesidad dada. Por lo tanto, los procesos se deben elegir dentro del ejercicio de la ingeniería concurrente.

Las restricciones dimensionales son pocas, aunque el tamaño a menudo determina la aplicabilidad de aproximaciones alternas. Así por ejemplo, las carrocerías completas de automóviles se pueden sumergir en un tanque de recubrimiento, pero esto obviamente sería impráctico para un avión de pasajeros. Las limitaciones de forma son pocas, a pesar de que el acceso a los recesos y a las formas reentrantes varía en gran medida debido al proceso.

1. Varios procesos se caracterizan por la operación en línea de visión. Esto generalmente es cierto para los procesos en los cuales la deposición es por haz de electrones, rayo láser, arco eléctrico o rocío a alta presión. Entonces, es necesario manipular la pieza y/o el dispositivo de deposición para llegar a las superficies, aunque siempre se fija un límite por el tamaño de las aberturas con relación al tamaño del dispositivo de deposición.

2. Se obtiene una mejor cobertura si se puede impartir un potencial eléctrico al sustrato, como en la electrodeposición y deposición electrostática de rocío. Un efecto lateral indeseado es el engrosamiento de los recubrimientos en los bordes; además del control del proceso, el diseño de la pieza puede ayudar en este aspecto (Fig. 19-3).

3. La cobertura total de las superficies (todas excepto la forma cerrada T4 en la Fig. 3-1) es posible en la inmersión, a condición de que el exceso de fluido se pueda drenar y desalojar los residuos.

4. Los procesos varían mucho en su capacidad para cubrir los detalles superficiales (nivelado), de modo que la preparación superficial se debe realizar según corresponda.

Si el recubrimiento se basa en el entrelazado mecánico para su adhesión, quizá sea necesario alisar la superficie del recubrimiento mediante algún proceso de acabado secundario (por lo general abrasivo).

19-11 RESUMEN

Con frecuencia, es necesario dotar a las piezas y a los ensambles con recubrimientos superficiales que incrementan la resistencia a la corrosión o al calor. Como la superficie de los productos a menudo es visible, la estética también debe tenerse en cuenta. En realidad, el recubrimiento puede ser un complejo sistema de capas múltiples, como se ejemplifica por el acabado de automóviles y de artículos electrodomésticos.

1. En la mayor parte de los casos, el primer paso es retirar las películas superficiales no deseadas (contaminantes) por medios mecánicos o químicos.
2. La superficie de los metales se convierte, a través de reacciones químicas para protección y apariencia (anodizado del aluminio) o para facilitar el procesamiento posterior (fosfatado del acero).
3. Las superficies de gran dureza o resistencia a la corrosión se producen por difusión térmica de carbono, nitrógeno o especies metálicas en sustratos metálicos (ferrosos).
4. Los recubrimientos de metal, cerámica y plástico se depositan por medio de la fusión, con o sin fundir el sustrato, para que haya resistencia a la corrosión y al desgaste (recubrimientos por inmersión por calor, sobrecapas de soldadura y rocío térmico) y mayor capacidad de temperatura (recubrimiento de barrera térmica).
5. Los recubrimientos de metal se aplican para proteger contra la corrosión (recubrimiento de níquel), para incrementar la dureza (recubrimientos de cromo duro), o la conducción eléctrica (circuitos de cobre), o para mejorar la apariencia (cromo sobre níquel), sobre todo en metales, pero también en sustratos cerámicos y plásticos mediante electrochapado y otras técnicas.
6. Los recubrimientos, principalmente de metal pero también cerámicos y poliméricos, se depositan por medio de la evaporación y condensación física a temperaturas moderadas (PVD), algunas veces asistidas por un plasma. Los compuestos cerámicos se pueden depositar en conjunto con una reacción (como los recubrimientos de TiN en herramientas). El chisporroteo mantiene las superficies atómicamente limpias. El plasma también se usa para facilitar la difusión, como para el carbono y el nitrógeno en acero.
7. La deposición química por vapor (CVD) a altas temperaturas es el método principal para formar capas delgadas de cerámico en herramientas y dispositivos semiconductores.
8. La implantación iónica provee un medio para cambiar la composición superficial sin cambio dimensional.

9. Los recubrimientos orgánicos son las últimas capas, con frecuencia visibles, de un sistema de protección superficial.
10. Muchos procesos de recubrimiento generan cantidades significativas de materiales gaseosos, líquidos o sólidos durante la operación, y también puede haber residuos que se deban eliminar. La protección de los trabajadores y del ambiente es de interés primordial y puede agregar un costo sustancial.
11. Los procesos suelen ser sensibles al control computarizado y a la automatización, y el modelado del proceso es un elemento importante en el control de la calidad y del costo.

PROBLEMAS

19-1 (*a*) Defina el anodizado del aluminio y (*b*) indique dos razones para realizarlo.

19-2 (*a*) Defina el fosfatado del acero y (*b*) establezca dos aplicaciones y la razón para realizarlo.

19-3 (*a*) Defina carburización y (*b*) nitruración del acero. (*c*) Mencione dos métodos para cada proceso y (*d*) indique la temperatura del proceso y el tratamiento térmico necesario.

19-4 (*a*) Defina galvanizado y (*b*) describa dos formas de llevarlo a cabo.

19-5 Explique la diferencia entre (*a*) revestimiento duro y (*b*) rocío térmico.

19-6 Dibuje un diagrama que muestre las partes esenciales de una instalación para electrochapado. Indique la polaridad.

19-7 (*a*) ¿Es posible depositar un recubrimiento de metal sin electricidad? (*b*) Si la respuesta es afirmativa, sugiera dos métodos.

19-8 (*a*) Defina la PVD y (*b*) realice un boceto que muestre la PVD térmica.

19-9 Defina los términos (*a*) plasma y (*b*) chisporroteo.

19-10 (*a*) Defina la CVD y (*b*) haga un bosquejo simple que indique los elementos esenciales de un sistema CVD.

19-11 Defina implantación iónica.

19-12 En la figura 18-25 se vio que la aleación para soldadura fuerte se suministró como revestimiento sobre el metal base Al 3003. Sugiera una forma para fabricar una tira de aluminio de 0.3 mm de espesor con 10% de revestimiento de una aleación de soldadura fuerte en ambos lados. Considerando la composición de la base y del revestimiento, liste los pasos probables del procesamiento.

19-13 (*a*) Defina metal de revestido y (*b*) nombre al menos cuatro procesos por los que se pueden producir láminas de revestimiento (sin especificar metales base y de revestimiento).

19-14 Defina lámina galvanizada.

19-15 Una copa de latón de 50 mm de diámetro exterior y 46 mm de diámetro interior se va a chapar con cromo. El diseñador especificó un radio exterior cero en la base. (*a*) Dibuje un boceto para mostrar la distribución probable del espesor del recubrimiento. (*b*) Sugiera una modificación del diseño para obtener un espesor uniforme.

19-16 Un recubrimiento cerámico para barrera térmica se va a depositar en un componente de una turbina de superaleación. Sugiera al menos dos métodos para hacerlo.

19-17 Se desea que una pieza de alúmina se recubra con una capa de cromo. Partiendo de principios básicos, sugiera una secuencia de procesamiento que produzca una buena adhesión.

19-18 Se esmalta el interior de un recipiente de cocina de acero al bajo carbono. El calentamiento rápido causa una distribución no uniforme de la temperatura y puede provocar el agrietamiento del esmalte. Calcule la diferencia máxima de temperatura permisible cuando (*a*) sólo el acero se calienta y (*b*) ambos, el acero y el esmalte, se llevan gradualmente a la temperatura establecida. (Suponiendo que el esmalte se fractura en el módulo de flexión, podrá encontrar-

lo, así como el módulo de elasticidad y el coeficiente de dilatación térmica, en este libro.)

19-19 Los patines de hielo deben tener un filo agudo. También deben ser resistentes a la corrosión y tener atractivo estético. Revise críticamente al menos tres soluciones potenciales disponibles para el diseñador y elija la más probable para satisfacer los requisitos a un costo razonable. (Liste las ventajas y las desventajas.)

19-20 Repetidamente se ha hablado de los términos recubrimiento y revestimiento. Repase su uso y formule definiciones para ellos.

LECTURAS ADICIONALES

ASM Handbook, vol. 5, *Surface Engineering*, ASM International, 1994.

Wick, C. y R. Veilleux (eds.): *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, vol. 3, *Materials, Finishing, & Coating*, Society of Manufacturing Engineers, 1985.

Edwards, J.: *Coating and Surface Treatment Systems for Metals: A Comprehensive Guide to Selection*, ASM International, 1997.

Kodas, T.T. y M.J. Hampden-Smith: *The Chemistry of Metal CVD*, Wiley, 1994.

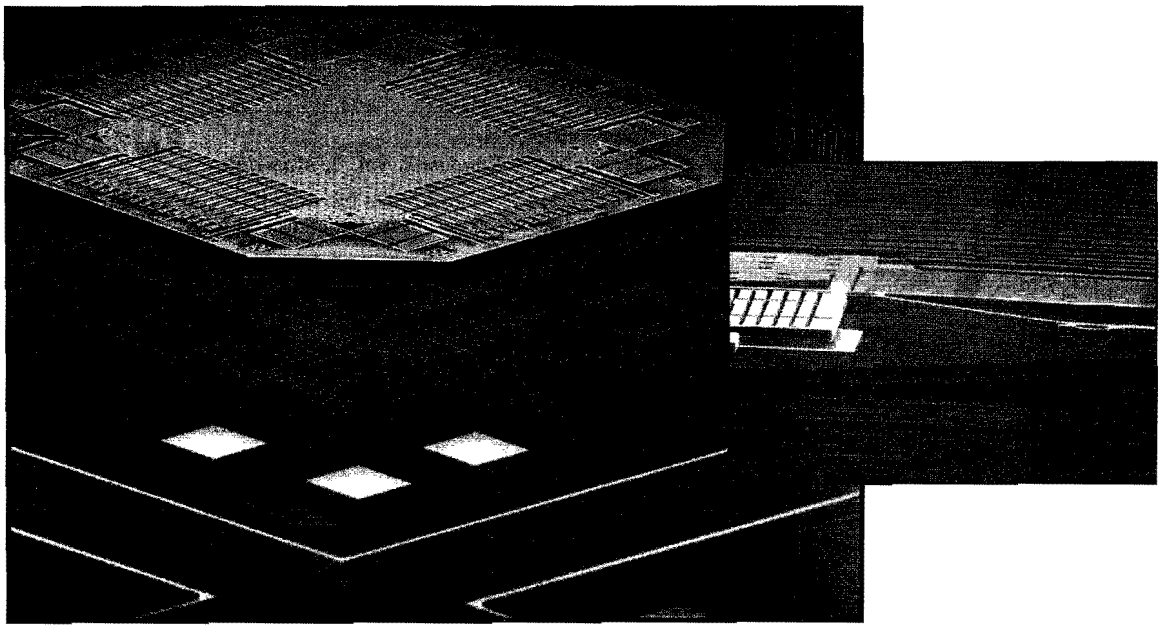
Lambourne, R. y T.A. Strivens: *Paint and Surface Coatings: Theory and practice*, 2a. ed., Woodhead, 1999.

Lindsay, J.H. (ed.): *Coatings and Coating Processes for Metals*, ASM International, 1998.

Rausch, W.: *The Phosphating of Metals*, 2a. ed., ASM International, 1990.

Stern, K.H. (ed.): *Metallurgical and Ceramic Protective Coatings*, Chapman and Hall, 1996.

Sudarshan, T.S. (ed.): *Surface Modification Technologies*, Dekker, 1989.



El acelerómetro ADXL202 tiene un sistema de masa y resorte de polisilicio micromaquinado de 400 × 400 μm integrado con todo el acondicionamiento de señales en sólo chip de CI de 2 × 2 mm. Proporciona salidas digitales para una aceleración ±2*g* en dos ejes, y se utiliza ampliamente para la detección de inclinación en sistemas de seguridad de vehículos. (*Cortesía de Analog Devices, Wilmington, Massachusetts.*)

capítulo

20

Manufactura de dispositivos semiconductores

Ahora estamos listos para analizar un campo completamente nuevo, basado en propiedades electrónicas únicas de algunos materiales. Después de analizar los elementos de los dispositivos semiconductores, exploraremos los nuevos procesos y la aplicación de procesos previamente analizados para:

Crecimiento de cristales de silicio y la manufactura de obleas

Tratamiento de obleas por PVD, CVD y otros procesos para fabricar circuitos integrados

Uso de la litografía para desarrollar patrones

Establecimiento de interconexiones y protección de los dispositivos por encapsulado

Integración de dispositivos en placas de circuitos

Creación de sistemas microelectromecánicos

Fabricación de piezas en la escala micrométrica y nanométrica

En la sección 1-1-3 hicimos referencia a los inmensos cambios introducidos por el desarrollo de los dispositivos microelectrónicos. Desde el invento del *transistor* por los científicos John Bardeen, Walter Brattain y William Shockley, de los Bell Telephone Laboratories en 1947-1948, el campo ha crecido a pasos agigantados y aún está en una fase de desarrollo rápido. Este rápido crecimiento se atribuye a los esfuerzos concentrados en el desarrollo tanto de los conceptos teóricos de la física, de la química y de la ciencia de los materiales como de las tecnologías de manufactura necesarias para fabricar productos de estado sólido.

Los transistores se hicieron por primera vez como dispositivos individuales, esencialmente como reemplazos directos para los tubos electrónicos. Luego se conectaron, con otros componentes, para formar circuitos completos. Un cambio revolucionario llegó después de 1958-1959, cuando se inventaron los *circuitos integrados* (CI) monolíticos, por J. St. C. (Jack) Kilby de la Texas Instruments y R.N. (Bob) Noyce de Fairchild Camera. En la actualidad todos los componentes de un circuito se colocan en sólo microcircuito (o "chip") cortado de una oblea delgada (tal vez de 200 μm de espesor) de silicio u otro material semiconductor contaminado selectivamente. Con los avances en la tecnología de manufactura, más y más componentes que conforman circuitos de complejidad cada vez mayor, se han acomodado en un solo chip. Esto permitió el desarrollo del más poderoso de los dispositivos: el microprocesador, a principios de la década de los 70. El ancho mínimo de

los componentes disminuyó poco a poco y el tamaño de los chips se incrementó (aunque la mayor parte aún mide sólo algunos milímetros en sus bordes), así que la industria progresó de la integración de pequeña escala (SSI) a la de escala media (MSI), a la grande (LSI), a la muy grande (VLSI), y actualmente a la ultragrande (ULSI, con más de 1 millón de dispositivos en un microcircuito). Como se expresa en la ley de Moore, el número de componentes por microcircuito se ha duplicado cada 18 meses (Fig. 20-1) y aún sigue aumentando; la integración a escala giga no está muy lejana.

Casi sin paralelo en la historia del desarrollo industrial, estos avances se lograron a un precio menor; el costo de un bit de memoria decrece a la mitad cada 2 años. Actualmente miles de millones de circuitos integrados se manufacturan cada año, para su uso no sólo en calculadoras y computadoras, radios y equipos de televisión, sino también en automóviles y en toda clase de maquinaria y juguetes, artículos de producción y de consumo. Todo esto no hubiera sido posible sin el desarrollo de las técnicas masivas de manufactura. La producción masiva, como se ha analizado hasta ahora, se basó en la fabricación secuencial de muchas piezas; en contraste, la tecnología de CI se basa principalmente en la manufactura por lotes, con cientos o miles de unidades procesadas de manera simultánea.

Un estudio de los procesos de manufactura estaría incompleto sin al menos un perfil general de las técnicas más importantes. Algunos procesos son modificaciones o desarrollos adicionales de procesos antes empleados en otros campos; muchos otros se han creado específicamente para el propósito y han encontrado, a lo largo de los años, aplicaciones en otros campos y son también importantes en la microfabricación, un campo muy prometedor.

Comparada con la mayor parte de los otros procesos de manufactura, la producción de dispositivos microelectrónicos plantea exigencias extremas en la ausencia de elementos no intencionales (impurezas) en los materiales de inicio, y en la limpieza y

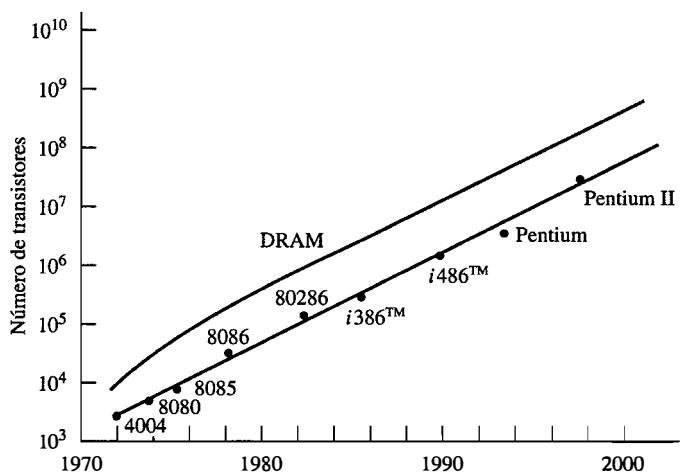


Figura 20-1 El número de transistores en un microcircuito se duplica cada 18 meses. (*Datos para microprocesadores Intel de su sitio de Internet.*)

control más estricto de los parámetros del proceso durante todas las fases de la manufactura. Para comprender la necesidad de estas medidas, es importante tener al menos un conocimiento elemental de los principios físicos que subyacen a la tecnología.

20-1 ELEMENTOS DE DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES

Dentro del alcance de este libro, es imposible cubrir todos los dispositivos semiconductores que sirven a varios propósitos. El énfasis se hará sobre los dispositivos que se emplean en circuitos lógicos (digitales), y sólo se hace referencia a los dispositivos analógicos.

20-1-1 Semiconductor

Se recordará de la física que los electrones en un átomo aislado sólo pueden ocupar niveles de energía discretos y que sólo dos electrones pueden compartir el mismo nivel de energía. Por lo tanto, en un cuerpo formado de muchos átomos, los electrones exteriores (de *valencia*) deben ocupar niveles de energía ligeramente diferentes, y estos niveles individuales, muy cercanamente espaciados, se amplían para formar *bandas de energía*. Algunas de éstas se traslapan, en tanto que una *separación de energía prohibida* separa a otras.

El flujo de corriente se visualiza como el movimiento físico de los electrones bajo la influencia de un campo eléctrico impuesto. El electrón es un portador de carga negativa y la conductividad eléctrica de un material se incrementa (disminuye la resistividad) si se dispone de un número mayor de portadores de carga. Comúnmente se distinguen tres clases de materiales:

1. Los *conductores* se tipifican por los metales. Como se mencionó en la sección 4-9-3, tienen resistividades muy bajas (por ejemplo, el aluminio tiene una resistividad de $\rho = 3 \times 10^{-8}\,\Omega \cdot \text{m}$; en la industria electrónica, suele usarse la vieja unidad cgs de $\Omega \cdot$ cm, y la resistividad se da como $3 \times 10^{-6}\,\Omega \cdot \text{cm}$). Ya se vio que los metales se pueden visualizar como iones positivamente cargados pegados entre sí por los electrones de valencia. Estos electrones son libres de moverse y pueden ponerse en movimiento al aplicar el mínimo voltaje, ya que las bandas de conducción sólo están parcialmente completas (Fig. 20-2*a*). Todas las perturbaciones de la red, incluyendo dislocaciones, átomos de soluto, vacantes y la excitación térmica de los átomos, presentan obstáculos al movimiento del electrón; por lo tanto, la resistividad de los metales *aumenta* con la temperatura.

2. Los *aislantes* son tipificados por los cerámicos como la SiO_2, que tiene una resistividad de $10^{14}\,\Omega \cdot \text{cm}$. Ya se vio (Fig. 12-3) que todos los electrones de valencia del Si se usan para completar la capa exterior de los átomos de oxígeno, y así se mantienen firmemente en el enlace covalente. La banda de valencia está completamente llena (Fig. 20-2*c*) y un electrón se puede llevar a la banda de conducción sólo si se suministra una

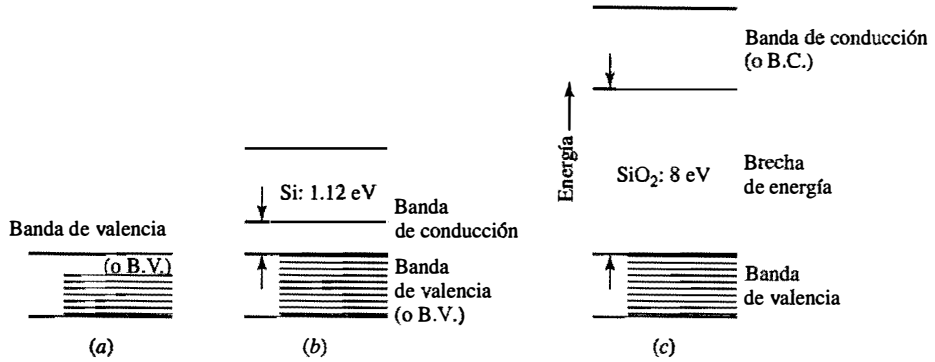


Figura 20-2 Bandas de energía: (a) bandas de valencia sin completar en metales, (*b*) bandas de valencia completas separadas por una brecha pequeña de energía de la banda de conducción en semiconductores y (c) brecho grande de energía en los aislantes.

energía de 8 eV, de manera que pueda brincar la separación de la banda. Para que un electrón adquiera estos 8 eV, se debe aplicar una energía muy grande al sólido.

3. Los *semiconductores*, como su nombre lo implica, se encuentran entre los conductores y los aislantes. El semiconductor más frecuentemente utilizado es aún el Si. El silicio es un elemento tetravalente y todos los electrones se reagrupan para completar la capa exterior de electrones de los átomos circundantes, creando enlaces covalentes. La banda de valencia se llena como en los aislantes, pero la energía de enlace es menor, y la brecha de energía sólo es de 1.12 eV (Fig. 20-2*b*). Cuando se suministra energía externa, un número de electrones puede adquirir energía suficiente para liberarse (brincar hacia la banda de conducción), por lo tanto, la resistividad de los semiconductores *disminuye* con el aumento de la temperatura. El silicio puro es un conductor pobre porque a temperatura ambiente sólo un electrón en 10^{13} tiene la probabilidad de adquirir suficiente energía para brincar la separación; de ahí que, la conductividad del silicio (un *semiconductor intrínseco*) sea baja (la resistividad es aproximadamente $3.2 \times 10^5\ \Omega \cdot$ cm).

Sin embargo, las propiedades del Si se alteran drásticamente al introducir cantidades muy pequeñas, del orden de 1 parte por millón (1 ppm) de elementos extraños, impurezas, también llamadas *inoculantes*. Existen dos posibilidades:

a. Los elementos pentavalentes (del grupo V de la tabla periódica), tales como N, P, As o Sb, se introducen para formar una solución sólida sustitucional en el Si. Ahora el excedente será un electrón por átomo, disponible para conducir electricidad; por ello a éstos se les llama elementos *donantes*. Como el electrón es un portador de carga negativa, se habla de un *semiconductor extrínseco tipo n.*

b. Los elementos trivalentes (del grupo III de la tabla periódica), tales como el B, Al, Ga o In, también forman soluciones sólidas, pero ahora hay un electrón faltante en la banda de valencia. Un *espacio* como ése se puede considerar portador de carga positiva, así que se habla de *semiconductores extrínsecos de tipo p*. El hueco puede aceptar un electrón; por lo tanto, los elementos trivalentes también se llaman *captadores*.

Cuando un electrón (portador *n*) encuentra un hueco (un portador *p*), los portadores se recombinan y desaparecen. Sin embargo, esto toma tiempo, y se habla de *vida del portador*.

Incluso una cantidad muy pequeña de elementos donantes o captadores proporciona muchos portadores de carga. Por ejemplo, 1.0 ppm de P representa un total de 4.5×10^{16} átomos/cm^3 de Si; inyectando el mismo número de electrones, se reduce la resistividad hasta cerca de 1.5 Ω · cm (Fig. 20-3). De aquí que el silicio deba ser extremadamente puro si se van a evitar trayectorias conductoras no propuestas (y corrientes de fuga).

Los defectos cristalográficos (vacantes y dislocaciones) también interfieren con la operación propuesta de los dispositivos, porque reducen la movilidad de la carga; además, los dopantes migran hacia ellos y proporcionan trayectorias de fuga de baja resis-

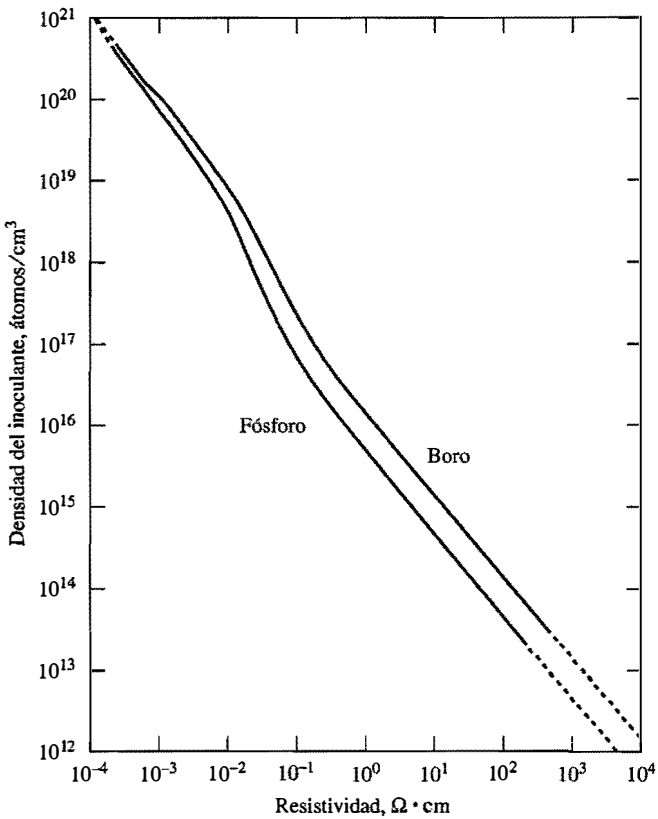


Figura 20-3 *La resistividad del silicio puro disminuye rápido, incluso con concentraciones pequeñas de átomos inoculantes (impurezas). [De W.R. Turber, R.C. Mattis y Y.M. Liu, en Semiconductor Characterization Techniques, Electrochemical Society, Pennington, N.J., 1978, p. 89. Esta figura se presentó originalmente en la primavera de 1978 en la reunión de The Electrochemical Society, Inc. en Seattle, Washington. Se reproduce con autorización.)*

tividad. Por lo tanto, el silicio no sólo debe ser muy puro sino también estar libre de defectos (a menos que los defectos se introduzcan intencionalmente para capturar contaminantes). Por lo tanto, la gran mayoría de los dispositivos semiconductores se fabrican en cristales individuales de silicio, aunque el silicio policristalino (a menudo llamado *polisilicio*) se usa para propósitos específicos.

El germanio, el sustrato de los primeros transistores, tiene una brecha de energía de únicamente 0.7 eV, y actualmente es de importancia industrial limitada. Los dispositivos semiconductores se producen, en cantidades limitadas, de sustratos del grupo III-V particularmente de GaAs. Comparados con los dispositivos de silicio, los dispositivos de GaAs son más costosos; sin embargo, operan a velocidades mayores y tienen mayor resistencia a la radiación, menor consumo de potencia, y funcionan a temperaturas desde –200 hasta +200°C (comparadas a la de –55 a +125°C de los dispositivos de silicio). Nuestro análisis se concentrará en los semiconductores de silicio.

20-1-2 Dispositivos semiconductores

La variedad de los dispositivos basados en la semiconducción es muy grande y aún creciente; aquí sólo se mencionan algunos.

Diodos Cuando las regiones adyacentes de un cristal individual de silicio se inoculan con inoculantes de tipo *p* y de tipo *n*, se forma una unión *p-n* (Fig. 20-4*a*). Habrá electrones en exceso en la región *n* y huecos en exceso en la región *p*; en la *n*, los electrones son *portadores mayoritarios* y los huecos, *minoritarios*. Lo inverso es cierto en la región *p*. Cuando un *diodo* se conecta a una fuente de corriente eléctrica, puede existir una de dos situaciones:

1. La *polaridad inversa* (Fig. 20-4*b*) causa que los portadores de carga se alejen de la interfaz, se forme una zona aislante y prácticamente no fluya corriente.

2. La *polaridad directa* (Fig. 20-4*c*) provoca el movimiento de la mayoría de los portadores de carga hacia las mitades opuestas. La corriente fluye como en un conductor, aunque algunos electrones y huecos se aniquilan en la zona de recombinación (alrededor de la interfase).

En la forma descrita el diodo sirve como rectificador. En otros diodos, hechos de semiconductores del tipo III-V, la recombinación puede ocasionar en la emisión de luz (*luminiscencia*). Entre los *diodos emisores de luz* (LED) el GaAs emite luz infrarroja y el GaP emite luz verde.

Transistores Un *transistor* es un dispositivo formado por un par acoplado de uniones *p-n*. Se emplean en dos formas básicas:

1. Los *transistores dipolares* son dos uniones en serie. El transistor *p-n-p* originalmente fue más difundido debido a la facilidad de su fabricación, pero el transistor *n-p-n* (Fig. 20-5) actualmente es preferido porque la movilidad de los electrones es unas tres

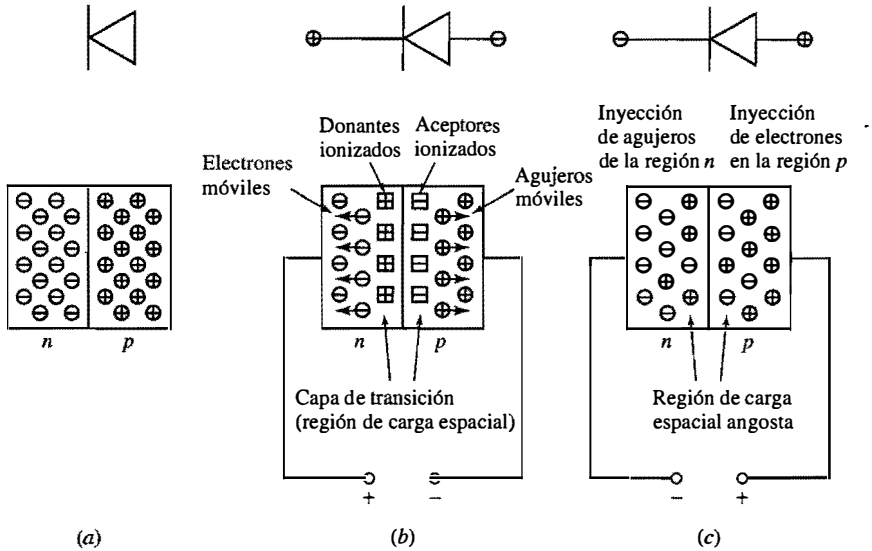


Figura 20-4 El semiconductor más sencillo es el diodo, que (a) consiste de zonas *n* y *p*. Cuando se conecta una fuente de corriente, (*b*) virtualmente no fluye corriente cuando se aplica una polaridad inversa, pero (*c*) el diodo conduce cuando se aplica una polaridad directa.

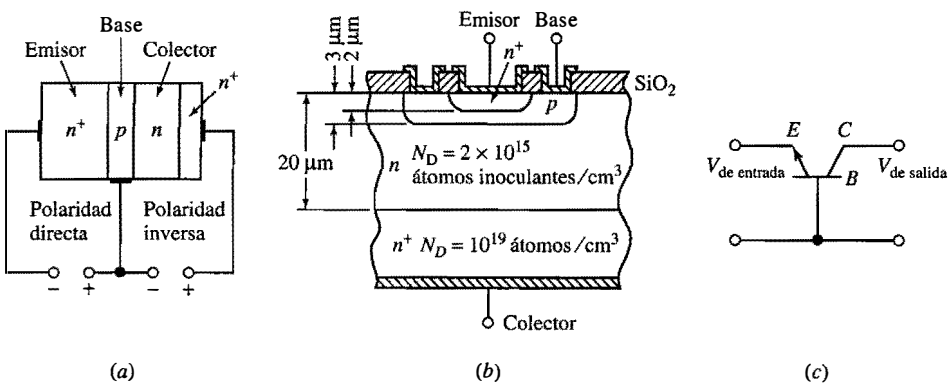


Figura 20-5 Un transistor de unión dipolar consiste de (a) zonas *n-p-n* (o *p-n-p*) que, en los circuitos integrados, se producen (*b*) en una forma plana. (*c*) Representación simbólica (*De E.S. Yang, Microelectronic Devices, McGrow-Hill, 1988, p. 118. Se reproduce con autorización.*)

veces mayor que la de los espacios, haciendo al transistor *n-p-n* más rápido y más adecuado para la operación a altas frecuencias y ritmos rápidos de conmutación.

Las tres regiones se llaman *emisor*, *base* y *colector* (Fig. 20-5*a*). En el transistor *n-p-n* una región *p* ligeramente inoculada (base) muy delgada se intercala entre una región *n* moderadamente inoculada (colector) y una región mucho más inoculada, de

aquí que se marque n^+ (emisor). La unión del emisor se polariza directamente para impulsar los electrones hacia la región angosta *p*, donde algunos se recombinan con huecos, pero la mayoría pasa y es inyectada en el colector. Un cambio pequeño en la corriente de base produce un gran cambio en la corriente del colector, por ello este transistor actúa como un *amplificador* o se puede usar como *interruptor*. Como tanto los portadores de carga *n* como los *p* están involucrados, se habla de *transistores de juntura dipolar*. Las conexiones metálicas a silicio inoculado *n* crearían otros transistores. Para evitar esto, el cristal se inocula fuertemente (indicado por el signo de más) donde se harán las conexiones (*contactos óhmicos*).

En las primeras fases de desarrollo, la apariencia física del transistor era algo similar a la figura 20-5*a*; sin embargo, el método de fabricación pronto cambió a *dispositivos planos*, en los que las conexiones se llevan a la superficie de la oblea (Fig. 20-5*b*). Independientemente de su apariencia física, el transistor se muestra simbólicamente como en la figura 20-5*c*.

2. El *transistor de efecto de campo de compuerta aislada* (IGFET) o *transistor de efecto de campo con base en semiconductor metal-óxido* (MOSFET) es un dispositivo *unipolar* porque solamente actúa un portador de carga. En el MOSFET de canal *n* que se muestra en la figura 20-6*a*, se forma un canal de longitud *L*, en un sustrato *p* ligeramente inoculado, entre la *fuente* fuertemente inoculada (que se marca n^+) y un sumidero. La magnitud de la corriente es controlada por la *compuerta*, que está aislada por una capa delgada (< 100 nm de espesor) de SiO_2. La corriente no fluye hasta que se aplica un voltaje positivo a la compuerta; el campo eléctrico repele los huecos del sustrato y, cuando el voltaje aplicado sobrepasa un valor de umbral, se origina una capa de electrones móviles: ahora existe un canal conductor tipo *n* en la zona entre la fuente y el sumidero. Si el sumidero se vuelve positivo, una corriente de electrones fluirá de la fuente al sumidero, cuya magnitud se controla con el voltaje de la compuerta. Como la estructura es de *m*etal, *ó*xido y un *s*emiconductor, y la corriente es transportada por los electrones (*n*) y controlada por el campo originado bajo la compuerta, se habla de un

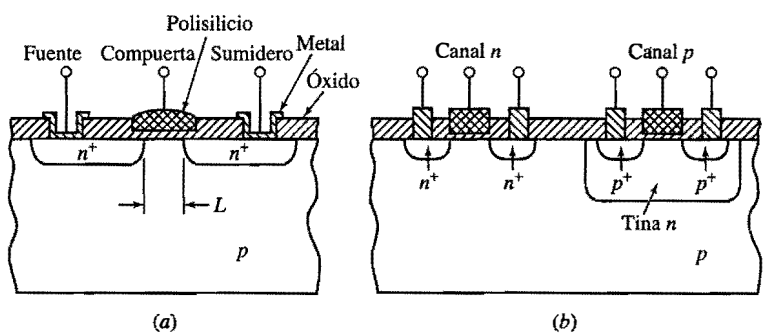


Figura 20-6 Sólo una clase de portador de carga está involucrado en el (*a*) transistor de efecto de campo metal-óxido semiconductor (MOSFET) y (*b*) transistor MOS complementario (CMOS); en el último, el canal *p* se forma en una tina *n* (o *pozo*).

MOSFET de canal *n*. La compuerta metálica con mucha frecuencia se reemplaza por una tira altamente inoculada de polisilicio tipo *n*.

Los MOSFET son más lentos que los transistores bipolares, pero disipan mucho menos potencia; son autoaislantes, así que ocupan menos espacio; son más fáciles de manufacturar, se pueden usar como elementos de memoria, y los canales actúan como resistencias, eliminando la necesidad de resistencias separadas. Debido a sus muchas ventajas, los circuitos MOSFET se usaron en las primeras calculadoras de mano y en microprocesadores, y ahora en la mayoría de los dispositivos VLSI y ULSI. Los MOS complementarios (CMOS), en los que un canal *n* y un canal *p* se acoplan en posiciones adyacentes (Fig. 20-6*b*), consumen menos corriente y se convirtieron en los dispositivos dominantes en la década de los 90.

Se utilizan con mucha frecuencia los *transistores de unión de efecto de campo* (JFET, también llamados simplemente FET). Los transistores bipolares (que son más rápidos y pueden impulsar mayor corriente) se integran con los CMOS (BiCMOS) para aplicaciones de alto rendimiento como *memorias estáticas de acceso aleatorio* de alta velocidad (SRAMS). Los circuitos integrados de *aplicación específica* (ASIC de varios grados de complejidad) se dedican a un solo usuario final y a menudo se producen en masa.

20-1-3 Circuitos integrados

Se mencionó que los transistores primero se fabricaron como dispositivos discretos, que luego se conectaron para formar circuitos completos. Con la introducción del *circuito integrado* (CI) todos sus elementos, incluyendo transistores, resistencias y capacitores, se disponen en un bloque único de silicio, con una densidad siempre creciente (microcircuito). En general los circuitos integrados se diseñan para evitar la necesidad de inductores, aunque éstos se pueden fabricar como componentes integrados en microcircuitos de silicio, principalmente para los dispositivos de comunicación inalámbrica.

1. En las figuras 20-5*b* y 20-6 se vieron algunas secciones transversales típicas de transistores. En la planta, aparecen como áreas pequeñas eléctricamente aisladas sobre la superficie de la oblea, interconectadas por patrones metálicos, denominados *metalización.*

a. Los transistores dipolares necesitan aislamiento por regiones dieléctricas aislantes o por uniones *p-n* de polaridad inversa. Un ejemplo se muestra en la figura 20-7*a*; la unión *n-p* tiene polaridad inversa y proporciona el aislamiento. Debido a la configuración plana, la parte activa del transistor se encuentra alejada del colector, así que se introduce una *capa enterrada* n^+ altamente inoculada para proporcionar una trayectoria de baja resistencia. Otras tecnologías están disponibles que permiten mayor densidad de dispositivos.

b. Se mencionó que los MOSFET son autoaislantes; en vista en planta aparecen como en la figura 20-7*b*.

2. Las resistencias se pueden formar como láminas delgadas (franjas) de elementos inoculantes difundidos en un sustrato de silicio. La resistencia de una parte cuadrada (Fig. 20-8*a*) es

$$R = \rho \frac{a}{ha} = \frac{\rho}{h} \tag{20-1}$$

y es independiente de a, el lado del cuadrado. De ahí que se dé en unidades de Ω/□ (ohms por cuadrado). La resistividad ρ depende de la concentración del elemento inoculante (Fig. 20-3) y, para una profundidad dada de inoculación h, se puede incrementar difundiendo sobre una longitud mayor l, es decir, creando el equivalente de varios cuadrados en serie. Para un valor dado de resistencia, la longitud de la resistencia se

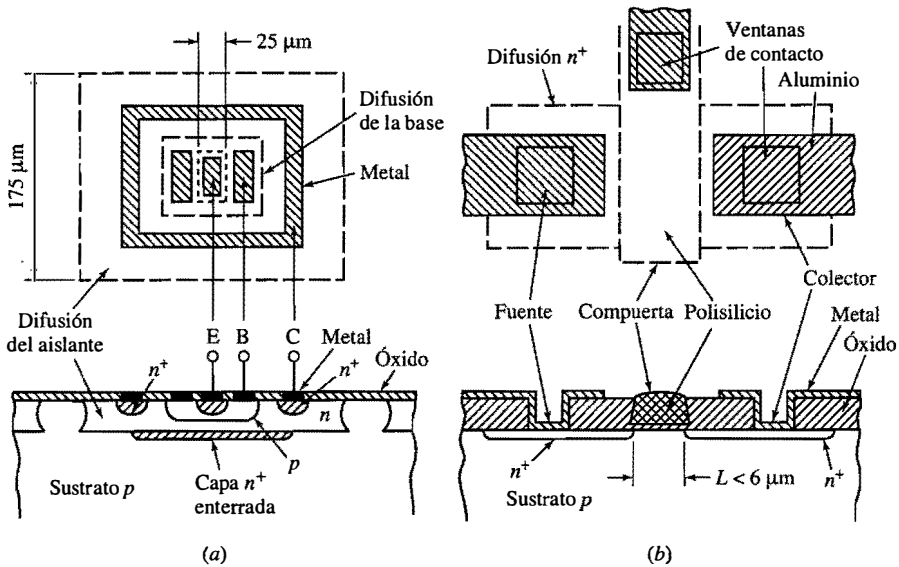


Figura 20-7 La apariencia física de un (a) transistor de unión dipolar aislada y (b) un MOSFET. *(Adoptada de E.S. Yang, Microelectronic Devices, McGrow-Hill, 1988, p. 162. Se reproduce con autorización.)*

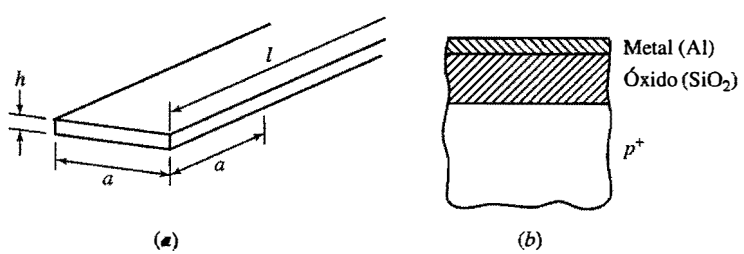


Figura 20-8 Dispositivos pasivos: (a) dimensiones típicas de resistencias y (b) capacitores formados por difusión.

puede reducir disminuyendo *a*. Se debe notar que también se forma una unión *p-n*. Como se mencionó, los transistores MOS también se pueden usar como resistencias de alto valor (los canales tienen una resistencia laminar del orden de 10 kΩ/□).

3. Los capacitores se forman depositando una capa dieléctrica (aislante), como SiO_2, encima de un sustrato de Si altamente inoculado de tipo p^+. La otra placa del capacitor se forma con una película (Fig. 20-8*b*) depositada de metal (aluminio). Obviamente, una estructura MOS también puede servir como un capacitor.

Miniaturización Los primeros circuitos integrados sólo contenían algunos dispositivos y eran muy grandes. Existen incentivos muy poderosos para reducir el tamaño de los dispositivos de manera que más de ellos se puedan acomodar en un microcircuito. Las señales se propagan a una tasa de 5 ns/m; en consecuencia, la velocidad de operación se aumenta con el decremento del tamaño del dispositivo. El consumo de energía también disminuye y se resuelve el problema de enfriamiento. Con la integración a mayor escala, el número de interconexiones externas y las fallas asociadas con ellas disminuye y el costo de los circuitos completos también.

La miniaturización depende de la reducción y de los rasgos. El tamaño mínimo de éstos se define como el promedio del ancho de línea y del espaciamiento mínimos. Se anticipa que ciertas limitaciones impuestas por los fenómenos físicos se alcanzarán cuando los tamaños de los rasgos se reduzcan por debajo de 0.1 μm. Antes que estos límites se alcancen, se deben superar varias dificultades. En primer lugar, el diseño de circuitos muy complejos se convierte en una tarea formidable; afortunadamente, el desarrollo concurrente de CAD la ha hecho posible. Los programas de cómputo se usan no sólo para el diseño de la configuración del circuito sino también para el modelado del desempeño del circuito. Los retos de manufactura también son de gran magnitud, por lo que en la parte restante de este capítulo se explorarán algunas soluciones. Los problemas se multiplican al incrementar la integración, debido a la probabilidad de que un defecto se encuentre en un circuito se incrementa. No obstante, se cree que la integración a escala giga, con varios cientos de millones de componentes en un microcircuito, se alcanzará con los microcircuitos tridimensionales (de niveles múltiples).

Existen innumerables y siempre nuevos dispositivos diseñados, y sus avances correspondientes en la tecnología de la manufactura. Como la tecnología aún es fluida, nuestro análisis se limitará a algunas de las técnicas básicas que se emplean para la manufactura de circuitos integrados, en particular, *circuitos integrados monolíticos* (CI). Como se muestra por la derivación griega (monolito = piedra individual), éstos contienen todos los componentes del circuito en un microcircuito (también llamado *dado*). En la mayoría de las situaciones el microcircuito se corta de una oblea de cristal de silicio.

20-2 MANUFACTURA DE OBLEAS DE SILICIO

Se vio que un semiconductor debe estar libre de elementos contaminantes accidentales y que la concentración tolerable de impurezas es muy baja. En las aplicaciones generales en ingeniería, un metal 99.99% puro (por ejemplo, el aluminio superpuro o el zinc electrolítico) se considera muy puro, aunque contiene 0.01% o 100 ppm de impurezas.

En el *silicio de grado electrónico* (EGS) la concentración de elementos dopantes está en el orden de *partes por 1 000 millones*, tan baja que su presencia sólo se puede inferir por medio de mediciones de resistividad.

20-2-1 Producción de EGS

La producción de EGS implica los siguientes pasos:

1. La cuarcita (SiO_2 puro, natural) se reduce con carbono en un horno eléctrico de arco sumergido. El silicio resultante de 98% de pureza es adecuado para aleación metalúrgica pero se debe refinar aún más para propósitos electrónicos.

2. El silicio es duro y frágil. Se puede romper, pulverizar y reacciona a 300°C con HCl anhidro

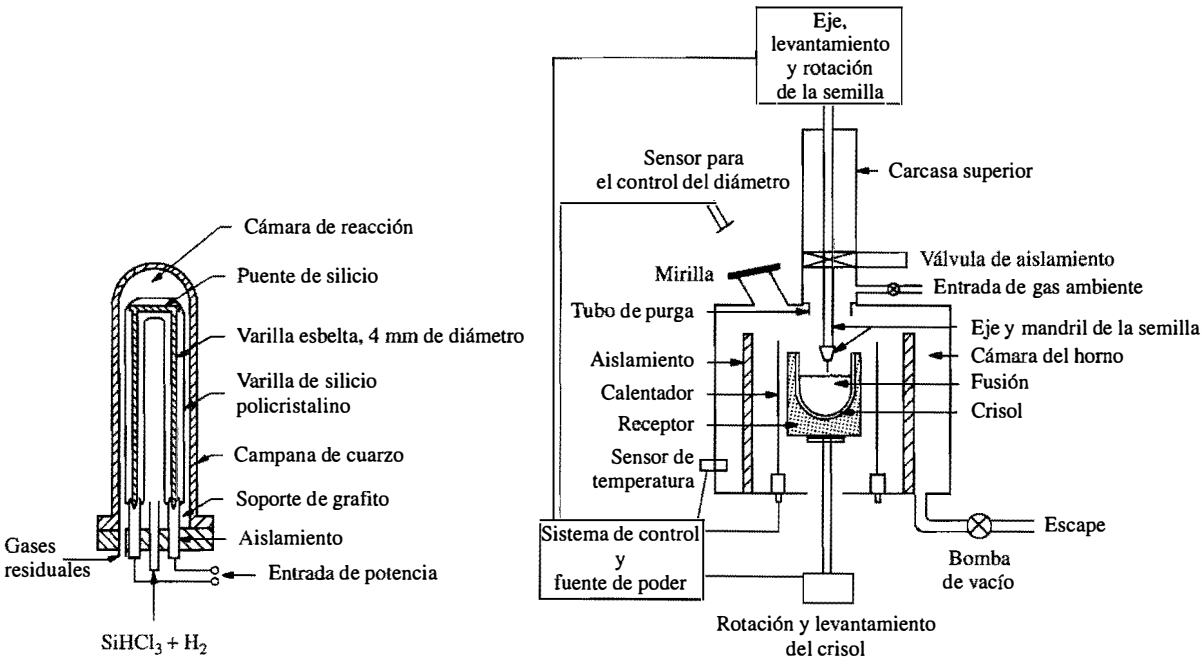


Figura 20-9 El crecimiento de (a) varillas de silicio policristalino por CVD y de (b) lingotes monocristalinos mediante la técnica de Czochralski. [*Parte (a) según L.D. Crossmann y J.A. Baker, en Semiconductor Silicon 1977, Electrochemical Society, 1977, Pennington, N.J., p. 18. Esta figura originalmente se presentó en la primavera de 1977 en la reunión de The Electrochemical Society, Inc., en Filadelfia. Se reproduce con autorización. Parte (b) según C.W. Pearce, en VSLI Technology, S.M. Sze (ed.). McGraw-Hill, 1983, p. 25. Se reproduce con autorización de Bell Telephone Laboratories.*]

$$\text{Si (sólido)} + 3\text{HCl (gas)} = \text{SiHCl}_3\text{ (gas)} + \text{H}_2\text{ (gas)} \qquad \textbf{(20-2)}$$

El triclorosilano ($SiHCl_3$) y los cloruros de las impurezas se condensan en un líquido a temperatura ambiente. El punto de ebullición del $SiHCl_3$ es 32°C; se puede separar de los cloruros de las impurezas por medio de la destilación fraccional.

3. El EGS se obtiene a través de la CVD (Secc. 19-7), en este caso mediante la reacción con H_2

$$2\text{SiHCl}_3\text{ (gas)} + 2\text{H}_2\text{ (gas)} = 2\text{Si (sólido)} + 6\text{HCl (gas)} \qquad \textbf{(20-3)}$$

La deposición ocurre en varillas delgadas de silicio (4 mm de diámetro) calentadas por resistencia (*varillas esbeltas*, Fig. 20-9*a*), durante varias horas, hasta que crecen varillas de silicio policristalino de unos 200 mm de diámetro.

Los procesos requieren gran cantidad de potencia pero la demanda mundial de EGS sólo totalizó 13 000 Mg en 1995, así que la industria microelectrónica consume muy poca potencia por valor unitario producido.

20-2-2 Crecimiento de cristales

El silicio cristaliza con una estructura de diamante (Fig. 12-1*a*). Los dispositivos microelectrónicos generalmente requieren que los defectos de la red sean mínimos; por lo tanto, el objetivo es hacer crecer monocristales casi perfectos, normalmente en la orientación ⟨111⟩ o ⟨100⟩.

Los cristales crecen en una versión escalada de la técnica del laboratorio conocida como el *método de Czochralski* (Fig. 20-9*b*). Las piezas fracturadas de EGS se cargan en un crisol (comúnmente de SiO_2 puro) soportadas por un revestimiento de grafito. El calor se proporciona por inducción o por resistencia. El silicio se funde a 1 414°C. Para crecer un cristal de orientación fija, un monocristal de Si (*cristal semilla*) se sumerge parcialmente en la fusión, y luego se extrae poco a poco hacia arriba con rotación simultánea, mientras que el crisol también gira. El silicio sólido se deposita en la semilla en la misma orientación para formar un monocristal cilíndrico. Una fusión de 60 kg produce un *cristal* (también llamado *monocristal piriforme* o lingote) de 3 m de longitud y 100 mm de diámetro. La mayor parte de los cristales son de 150 o 200 mm de diámetro (y se anticipan diámetros de 300 mm). El oxígeno quemaría el revestimiento de grafito y entraría en el monocristal; por lo que el crecimiento sucede en un vacío o en un gas inerte (He o Ar). Las condiciones de operación se controlan estrechamente por medio de instrumentación; además se usan computadoras para el control de lazo cerrado.

Una cantidad menor de monocristales se produce colocando una varilla policristalina sobre una semilla monocristalina y luego pasando hacia arriba una zona de fusión y moviendo una bobina de inducción de alta frecuencia a una rapidez controlada a lo largo de la longitud de la varilla.

20-2-3 Preparación de las obleas

Después del enfriamiento, el lingote se somete a varios pasos:

1. Se inspecciona la estructura del cristal, su resistividad y defectos. Las partes defectuosas y los extremos del lingote se eliminan y el desperdicio (hasta 50% del lingote) se regresa a la fusión. Como el silicio es muy duro, se corta con sierras rotatorias de diamante.

2. La superficie de las partes restantes se esmerila perfectamente en forma cilíndrica con ruedas de diamante y luego se esmerilan planos a lo largo de la longitud para identificar la orientación del cristal y el tipo de inoculante.

3. El cristal se corta en obleas delgadas (0.6-0.7 mm de espesor). Se obtiene un corte razonablemente recto por el método del diámetro interior (Fig. 20-10), en el que se usan cuchillas delgadas (0.325 mm de espesor) anulares de acero inoxidable, recubiertas con polvo de diamante en su diámetro interior. Aquí de nuevo se pierde cerca de un tercio de silicio. Se giran las hojas a 2 000 rpm y se alimentan hacia el cristal a 0.5 m/s.

4. La planicidad y el paralelismo se mejoran por medio del lapeado simultáneo de los dos lados de las superficies, usando Al_2O_3 en glicerina como el medio de lapeado. Se remueven cerca de 20 μm por lado.

5. Los bordes se redondean con ruedas de diamante para prevenir el resquebrajamiento.

6. Las obleas se atacan químicamente para remover las capas superficiales dañadas mecánicamente.

7. Las obleas se pulen en una lechada de partículas finas (10 nm) en una solución acuosa de NaOH. Se remueven unos 25 μm por lado por medio de una combinación de acción mecánica y oxidación de silicio por NaOH. En este punto, la oblea tiene una rugosidad superficial de cerca de 2 nm R_a, y ésta se debe mantener durante los pasos de limpieza.

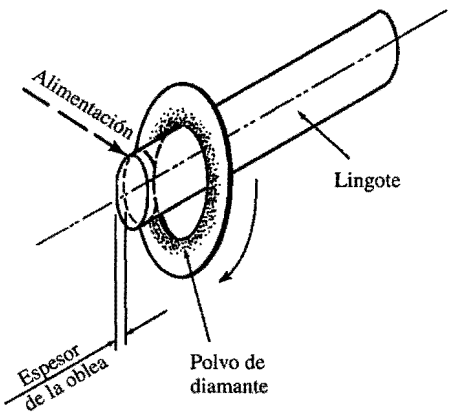


Figura 20-10 Los lingotes monocristalinos se cortan en obleas mediante el proceso de corte del diámetro interior.

8. En los dispositivos ULSI, el espesor del óxido de la compuerta está debajo de 10 nm, de aquí que la superficie deba estar muy limpia, lisa y libre del óxido nativo. Las obleas se limpian en una solución especial para remover todos los residuos. Este paso es crítico para los circuitos ULSI y se auxilia mediante limpieza *megasónica* (850-900 kHz) de alta potencia. También se han desarrollado técnicas de lavado en seco. Después del enjuague con agua deionizada, las obleas se inspeccionan rigurosamente.

20-3 FABRICACIÓN DE DISPOSITIVOS

Las obleas de silicio sirven como el sustrato sobre el que se hacen los dispositivos planos en una secuencia de pasos de proceso. Como un circuito integrado contiene cientos de miles o millones de dispositivos, es necesario construir circuitos de prueba o

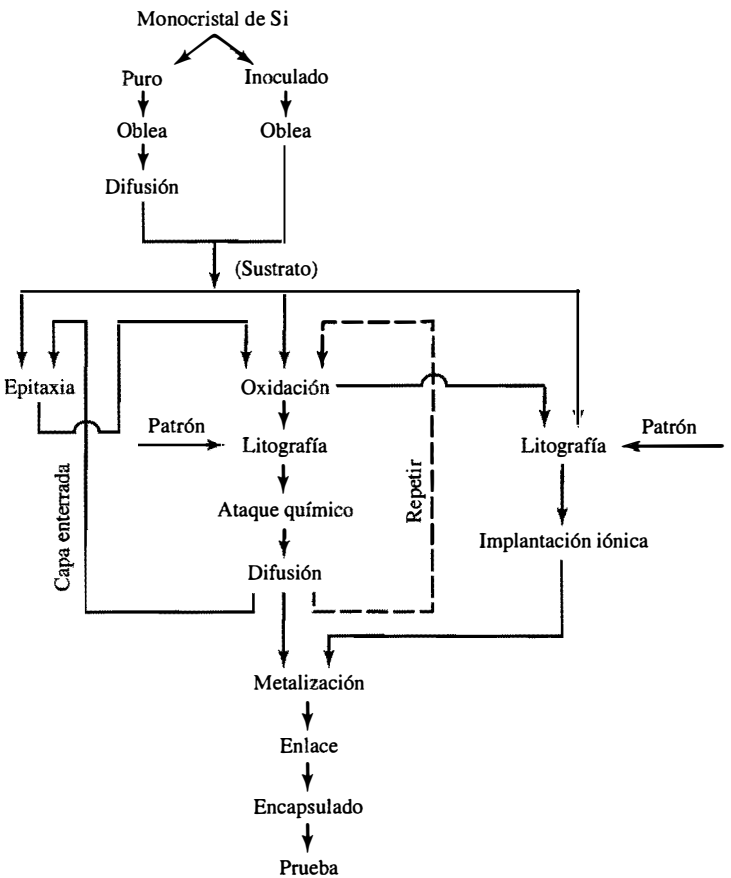


Figura 20-11 Perfil general de la secuencia de fabricación para circuitos integrados.

realizar simulaciones computarizadas. Una vez que se fija el diseño, se determina la secuencia de manufactura.

20-3-1 Perfil de la secuencia del proceso

Como se muestra en la figura 20-7, los circuitos consisten de patrones intrincados de dispositivos semiconductores, aislantes y conductores, que se deben crear en varias capas superpuestas. Esto se puede lograr ya sea por *deposición en el patrón requerido*, o por deposición sobre toda la superficie y *remoción de las partes no deseadas.*

Los pasos principales de procesamiento se muestran en la figura 20-11. El sustrato de todos los dispositivos es una oblea de tipo *n* o una de tipo *p* (Fig. 20-7). La concentración del elemento inoculante se fija durante la generación del cristal o después de la preparación de la oblea por medio de difusión global. Ahora el sustrato está listo para desarrollar los dispositivos del circuito. Para cada capa del dispositivo, se hace un patrón que se reduce ópticamente para crear una mascarilla óptica. Para transferir el patrón a la superficie de la oblea, ésta se oxida, y en un material resistente fotosensitivo se deposita y se expone a través de la mascarilla óptica. Las porciones no deseadas del material fotorresistivo se disuelven, y la película de óxido expuesta de esta manera se ataca químicamente. Así, se genera una mascarilla de óxido que controla la difusión de los elementos de inoculación en el sustrato. Esta secuencia se repite varias veces hasta que se construye el dispositivo. Las trayectorias metálicas conductoras se depositan sobre la superficie y al circuito creado se le proporcionan conexiones al mundo exterior. Luego el circuito integrado se empaca para protegerlo contra el daño y los efectos del ambiente.

Cada uno de los siguientes pasos de procesamiento se analizará desde el punto de vista de la manufactura y luego se indicará la integración del proceso.

20-3-2 Técnicas básicas de fabricación

Será útil repasar el equipo y algunas de las técnicas que encuentran una variedad de aplicaciones en la manufactura de semiconductores. Se debe notar que básicamente todo el procesamiento se hace en lotes. Sin embargo, por medio del procesamiento simultáneo de decenas e incluso de cientos de obleas (cada una conteniendo hasta varios cientos de circuitos integrados), y por medio de un alto grado de automatización, se puede mantener muy bajo el costo de los dispositivos individuales.

Calentamiento Gran parte del procesamiento de obleas tiene lugar a temperaturas elevadas. Son comunes dos métodos:

1. En el *procesamiento de pared fría* las obleas descansan en un material de revestimiento que se calienta por resistencia, inducción o calor radiante. Los gases (o vacío) necesarios para el procesamiento se contienen en una cámara con paredes enfriadas. En el *procesamiento térmico rápido* (RTP) se colocan obleas individuales en un soporte que sólo hace contacto en algunos lugares. De esta manera se pueden calentar rápidamente por medio de lámparas a través de una ventana de cuarzo. El RTP está ganando importancia a medida que el ancho de línea disminuye.

2. En el *procesamiento de pared caliente* las obleas se colocan en un horno que se calienta hasta la temperatura de procesamiento. En el RTP se mueven rápidamente dentro y fuera de la zona de calor.

Sea que las reacciones térmicas o químicas ocurran en un recinto de pared fría o en un horno, es común denominarlo *reactor*.

Pirólisis La especie atómica requerida se obtiene por la descomposición química de un compuesto (a menudo un haluro) del elemento. El compuesto se introduce en el horno donde tiene lugar la descomposición y deposición sobre el sustrato (oblea).

PVD Ésta ya se analizó en la sección 19-6. Se usan todas sus formas en la fabricación de circuitos integrados.

CVD El proceso (Secc. 19-7) se desarrolló en respuesta a las necesidades de la industria de semiconductores. Se usa principalmente en la producción de EGS (Secc. 20-2-1) y tiene muchas otras aplicaciones.

20-3-3 Para cambiar la composición de la superficie

La composición de la oblea puede requerir modificación, ya sea sobre toda su superficie o sólo en localizaciones determinadas por el patrón del material resistente. Básicamente se pueden hacer dos clases de cambios: se introducen átomos de impurezas en la superficie (difusión o implantación iónica), o se induce una reacción con oxígeno (oxidación térmica).

Difusión En la sección 6-1-2 ya se analizó el papel de la difusión en los metales. La difusión de los elementos de inoculación en el silicio ha sido uno de los métodos más importantes para cambiar la composición de la oblea en una manera controlada, y es inevitable cuando la oblea se calienta durante cualquier intervalo de tiempo. La difusión puede servir uno de dos propósitos (Fig. 20-11):

1. La difusión global para cambiar las características de la oblea y, de esta manera, las de todo el sustrato. Los cristales de silicio se pueden cultivar con cantidades controladas de elementos inoculantes, particularmente As, P, Sb o B, para proporcionar resistividades desde 0.0005-50 $\Omega \cdot$ cm y esto se lleva a cabo en la práctica. Sin embargo, los cristales puros de EGS también se cultivan, y luego se introducen los inoculantes en las obleas al inicio del procesamiento.

2. La difusión localizada puede servir a varios propósitos: desarrollar regiones p y n en dispositivos activos, crear franjas para resistencias, y desarrollar regiones altamente inoculadas para interconexiones y para bases, a las que se aplicarán contactos metálicos (contactos óhmicos).

La técnica más común es la difusión térmica, conducida a 800-1 200°C, usando una fuente gaseosa, líquida o sólida del inoculante. Por ejemplo, el B se puede difundir partiendo del tetrabromuro de boro. El primer paso es la oxidación

$$4BBr_4 \text{ (líquido)} + 3O_2 = 2B_2O_3 + 16Br \qquad \textbf{(20-4)}$$

El boro se incorpora en la superficie del silicio con la formación de una película delgada de SiO_2

$$2B_2O_3 \text{ (gas)} + 3Si \text{ (sólido)} = 4B + 3SiO_2 \qquad \textbf{(20-5)}$$

Alternativamente, se pueden colocar hojas de BN entre las obleas de silicio; a temperaturas elevadas, el gradiente de concentración impulsa al B hacia el silicio. Se obtiene un buen control depositando un óxido inoculado y luego dirigiendo el inoculante hacia el silicio a temperaturas elevadas.

En la sección 6-1-2 [ecuación (6-2)] se vio que la difusión se acelera en gran medida incrementando la temperatura, de aquí que la difusión se conduzca a altas temperaturas. En general, los átomos más pequeños se difunden más rápidamente, y las diferencias en la rapidez de difusión se pueden usar para controlar la profundidad de la penetración de la impureza en varios pasos del procesamiento. Todos los átomos se difunden más fácilmente, de preferencia a lo largo de las fronteras de grano y de otras perturbaciones de la estructura del cristal, por lo que ésta es una de las razones para usar obleas monocristalinas, libres de defectos.

La difusión es omnidireccional, por eso la difusión desde los bordes de mascarillas no se puede evitar, lo que fija un límite inferior a la longitud de los rasgos (ancho de las líneas) que se pueden producir. Para evitar la difusión no deseada, se depositan capas delgadas de *barreras de difusión*. Sin embargo, éstas pueden reducir la adhesión y quizá se tengan que depositar varias capas para balancear los requerimientos.

La concentración del inoculante es mayor en la superficie y puede alcanzar el límite de la solubilidad sólida (Secc. 6-1-2). La concentración decae rápidamente y si se desea una distribución más uniforme, la deposición (ahora llamada *predeposición*) es seguida por un calentamiento subsiguiente (*difusión de penetración*). Para evitar el escape de inoculantes a través de la superficie durante la difusión de penetración, se forma una película delgada de óxido después de la predeposición. Gran parte de la difusión ocurre intersticialmente y manteniendo la temperatura, se permite que los inoculantes entren en posiciones sustitucionales y se hagan activos electrónicamente.

Como se mencionó, la difusión, deseada o indeseada, ocurre cada vez que la temperatura se incrementa en el curso del procesamiento, por lo que se debe tomar en cuenta al diseñar la secuencia del proceso.

Implantación iónica Este proceso (Secc. 19-8) también se desarrolló en la industria de semiconductores, para introducir inoculantes de una manera altamente controlada. Tiene muchas ventajas: la dosis se puede controlar fácilmente, por lo general en el rango de 10^{14}-10^{18} átomos/cm^3 (pero incluso hasta concentraciones que excedan el límite de solubilidad); se obtiene un gradiente de concentración muy agudo en el borde de las mascarillas, de esta manera el ancho de línea se puede reducir y la temperatura de la oblea permanece baja.

Los impactos de alta energía perturban en gran medida la superficie de la oblea. Los átomos de silicio se desplazan de sus localizaciones en la red, se forman vacantes y ocurre un daño estructural sustancial. En efecto, la capa implantada se hace amorfa.

Esto es indeseable puesto que reduce la vida del portador acelerando la recombinación. Por lo tanto, la implantación iónica se sigue por recocido a 200-800°C para reestablecer la estructura cristalina. Coincidentemente, los átomos de las impurezas se conducen a mayores profundidades. Esto tiene el efecto indeseable de difusión omnidireccional (tanto lateral como en profundidad), así que, a menudo, se favorece el recocido rápido con rayo láser.

Oxidación térmica El dióxido de silicio (SiO_2) tiene varias propiedades deseables para la fabricación de circuitos integrados. Es un aislante por lo que puede suministrar el aislamiento dieléctrico de los dispositivos; es un componente esencial en los dispositivos MOS (Fig. 20-6*a* y *b*) y aísla los conductores en estructuras de niveles múltiples. Se adhiere bien al silicio pero tiene una dilatación térmica menor (0.8×10^{-6}) que la del silicio (2.6×10^{-6}), y se pueden originar grandes esfuerzos térmicos. La difusión de P, Sb, As y B es muy lenta en ella, por lo que incluso una película delgada (del orden de 0.1-1 μm, con mayor frecuencia, alrededor de 0.5 μm) puede servir como una barrera de difusión. Se usa como una mascarilla para la inoculación por difusión y también sirve como una barrera contra la pérdida de inoculantes previamente depositados, como en la difusión de penetración de dos etapas. Sin embargo, Ga, Al, Zn, Na y O se difunden rápido en el óxido y, para estos elementos, se debe usar una capa de nitruro de silicio como una barrera, con frecuencia con una interfaz delgada de óxido sobre la superficie de silicio.

La oxidación térmica del Si se puede hacer en oxígeno seco,

$$Si + O_2 = SiO_2 \qquad \textbf{(20-6)}$$

pero la oxidación por vapor es más adecuada para las películas más gruesas (más de 0.5 μm de espesor)

$$Si + 2H_2O = SiO_2 + 2H_2 \qquad \textbf{(20-7)}$$

La tasa de crecimiento se incrementa en gran medida por presiones moderadamente altas; aumentando la presión atmosférica a 20 atm (2 MPa), la rapidez de oxidación es 10 veces mayor.

La oxidación por plasma en una descarga de oxígeno puro tiene la ventaja de mantener las temperaturas debajo de 600°C.

20-3-4 Deposición de películas superficiales

Estas técnicas difieren de las anteriores en que las capas (películas) se forman completamente por el material depositado en la superficie, sin reacción intencional con la superficie.

Epitaxia En la sección 18-4-1 se vio que el crecimiento epitaxial se refiere al crecimiento de un cristal con la misma orientación que el sustrato: esencialmente la capa nueva se convierte en la continuación del sustrato. Éste también fue el caso en el crecimiento de un cristal de silicio a partir del líquido sobre un cristal semilla (Secc. 20-2-2)

y también en el recocido después de la implantación iónica. En la *homoepitaxia* la capa depositada es idéntica al sustrato; en la *heteroepitaxia* es de un material diferente (un desacoplo muy sustancial en la estructura se puede acomodar en películas muy delgadas). Con mayor frecuencia, el silicio inoculado crece sobre el sustrato a temperaturas menores que T_m. La capa puede crecer sobre toda la superficie, previa a la formación de características locales (como la capa *n* en la Fig. 20-5*b*), o después que se haya formado una característica local (Fig. 20-11); luego esta característica local se convierte en una *capa enterrada* (como la capa n^+ en la Fig. 20-7*a*).

La limpieza de la superficie del sustrato es crítica. Por lo tanto, primero se atacan químicamente las obleas limpias, *in situ*, con HCl anhidro a 1 200°C. Luego sigue la deposición en el mismo equipo (reactor). El *reactor de crecimiento* es una campana de cuarzo de alta pureza, en la que se colocan las obleas en un receptor de grafito o de cuarzo recubierto de SiN o SiC, calentado por inducción (rf) o por calentamiento radiante. La técnica que más se emplea es la CVD, por medio de la reducción de hidrógeno de los haluros de Si. Así, el silicio se deposita pasando, por ejemplo, tetracloruro de silicio ($SiCl_4$) sobre la superficie de las obleas a 1 150-1 250°C

$$SiCl_4\ (gas) + 2H_2\ (gas) = Si\ (sólido) + 4HCl\ (gas) \qquad \textbf{(20-8)}$$

La capa crece a una tasa de 0.2-0.3 μm/min. Los elementos inoculantes se codepositan de sus haluros, como la arsina (AsH_3) que se descompone en la superficie caliente y se atrapa en la capa epitaxial de silicio. Algunos de los compuestos, como la arsina, son altamente tóxicos, por lo tanto los reactores se construyen y se operan con el máximo cuidado. Los átomos inoculantes también se difundirán desde el sustrato hacia la capa epitaxial (*autoinoculado*) y esto fija un límite inferior al espesor de las capas epitaxiales, que pueden crecer con una concentración controlada de impurezas.

Por esta razón, se han desarrollado los procesos de *epitaxia de baja temperatura* (LTE). El silicio se puede depositar a una temperatura inferior a 700°C, si se puede mantener un sustrato de Si sin recubrimiento (ultralimpio). Una de las técnicas es la *CVD al ultraalto vacío* (UHV/CVD): la cámara del reactor se bombea hasta 10^{-7} Pa y luego se admiten los reactantes. La otra es la *epitaxia de haz molecular* (MBE). Ésta también se conduce en ultraalto vacío (10^{-6} a 10^{-8} Pa): el Si y los inoculantes se evaporan con cañones electrónicos a 500-900°C. La especie evaporada se transporta a una rapidez muy alta hasta la superficie del sustrato. En el *crecimiento epitaxial selectivo*, el Si se deposita únicamente en el sustrato desnudo de Si sin la formación de una capa amorfa de Si sobre las mascarillas de SiO_2 o SiN.

Deposición de dieléctricos y de polisilicio Los *dieléctricos* (aislantes) y el silicio policristalino (o, simplemente, *polisilicio*) no toman una parte activa en la acción semiconductora, pero son esenciales para el funcionamiento de los dispositivos.

Normalmente la deposición tiene lugar por CVD, con un gas reactante fluyendo sobre la superficie de las obleas en reactores de pared fría. La deposición es más uniforme a presiones reducidas (30-250 Pa) en reactores de pared caliente (CVD de baja presión o LPCVD). Las temperaturas más bajas (100-400°C) son usuales en la deposición asistida por plasma (o simplemente deposición por plasma), porque la energía para la reacción química se suministra sobre todo por la descarga luminiscente (Secc. 19-6-2).

1. Los dieléctricos se depositan para varios propósitos: para proporcionar aislamiento eléctrico entre capas sucesivas; para presentar barreras a la difusión; para servir como mascarillas en la difusión e implantación iónica; para pasivar la superficie (sujetar los enlaces superficiales libres), y para proteger a los dispositivos del daño ambiental y mecánico. Los dieléctricos más frecuentemente usados son los siguientes:

a. El dióxido de silicio (SiO_2) suele depositarse en la forma pura, aunque frecuentemente también se cultiva la sílice inoculada con fósforo (vidrio P). Con 4-7% P, tiene la ventaja de fluir en una manera viscosa a 950-1 100°C, proporcionando una buena cobertura de los escalones con una superficie lisa.

b. El nitruro de silicio (Si_3N_4) se deposita en forma estequiométrica por medio de la CVD a partir de una reacción de silano (SiH_4) con amoniaco (NH_3) a 700-900°C. La deposición asistida por plasma produce un nitruro no estequiométrico (SiN). Ambas clases de nitruro son barreras excelentes para la difusión del sodio y del agua. En la deposición por plasma la temperatura es suficientemente baja para permitir la deposición sobre el dispositivo terminado (es decir, encapsulación para la protección contra el ambiente y el daño mecánico).

2. El polisilicio se deposita por medio de LP-CVD a 570-650°C y 25-130 Pa, por la descomposición pirolítica de silano

$$SiH_4 = Si + 2H_2 \qquad \textbf{(20-9)}$$

La deposición procede a una tasa de unos 10 nm/min. La capa se puede inocular agregando gases durante la deposición, o después de la deposición por medio de implantación iónica o por difusión. Inoculado hasta altas concentraciones, el polisilicio puede servir como elemento de compuerta en dispositivos MOS; contacto conductor (contacto óhmico) para el silicio cristalino; resistencias de alto valor y como un producto intermedio, específicamente como fuente de difusión, para la formación de uniones poco profundas. En los dispositivos MOSFET se usa para autoalinear regiones difusas de fuente y de drenado (sumideros) (Secc. 20-3-7) y permite un alto nivel de integración. El recocido a 800°C en oxígeno húmedo o seco produce una película aislante de *polióxido.*

Los procesos de deposición de película requieren controles estrictos. La mayor parte de los reactantes —incluyendo el silano— son tóxicos y flamables, y las propiedades de las películas —incluyendo la composición, resistividad y esfuerzos internos— se ven afectadas en gran medida por las condiciones del proceso.

Metalización Los elementos metálicos reemplazan al cableado que se usa en los dispositivos electrónicos convencionales y hacen prácticos a los circuitos integrados. Su propósito es proporcionar trayectorias de corriente altamente conductoras entre dispositivos. La *metalización* tiene una función mucho más importante de lo que podría parecer al principio. Aunque las corrientes son pequeñas (del orden de miliamperes) causan densidades muy altas de corriente en los alambres finos y pueden acelerar el desgaste por *electromigración* (difusión bajo la influencia de corrientes operacionales). Para que los alambres conduzcan sin una pérdida significativa, la resistencia debe ser baja. Los

conductores también crean cargas capacitivas e inductivas, las cuales se encuentran entre los factores principales que limitan la velocidad de conmutación de los circuitos. En los dispositivos VLSI y ULSI sería difícil disponer los alambres a su alrededor, por lo que se emplea la *metalización de niveles múltiples* de 2 a 6 niveles (Fig. 20-12*a*). Ésta tiene la ventaja adicional de reducir el tamaño del chip, pero se necesitan conductores metálicos (conector) para conectar niveles sucesivos.

El metal que más se usa es el aluminio, pues se adhiere muy bien al SiO_2 y a los vidrios de sílice y hace contactos de baja resistencia con las regiones p^+ y n^+ altamente inoculadas de los transistores y con el polisilicio. La mayor parte de la metalización se llevaba a cabo por PVD (Fig. 19-4). Para los circuitos VLSI y ULSI se prefiere la deposición por chisporroteo por encima de $0.5T_m$ porque produce películas densas (el Al se deposita a 200-300°C). La deposición por magnetrón permite una concentración menor de argón, así poco o nada de Ar se incluye en las películas. La deposición es seguida del recocido para formar una interfaz de aleación con el Si. Para limitar la electromigración, el aluminio se alea con niveles bajos de cobre y entonces se le refiere como Al(Cu). Las separaciones entre las líneas de metal se deben rellenar con un dieléctrico. Se necesita una superficie lisa para la litografía de la capa siguiente: la *planarización* de SiO_2 de entrenivel se efectúa por ataque químico o pulido químico/mecánico con polvo fino de cerámica (alúmina o sílice) y un químico de ataque oxidante.

Los conectores por lo general se hacen de tungsteno, que no sólo es un conductor razonablemente bueno sino también resistente a altas temperaturas. La PVD, siendo un proceso que requiere línea visual* proporciona poca cobertura sobre las paredes de los

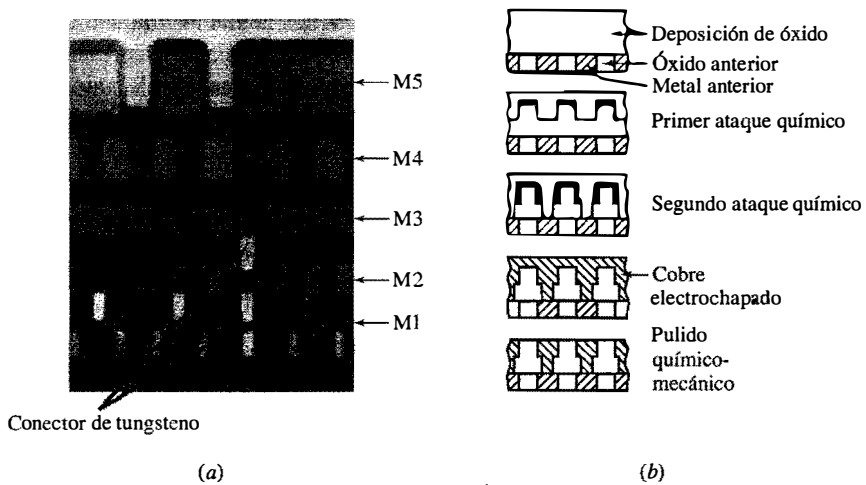


Figura 20-12 Sección transversal de un dispositivo semiconductor con 5 capas de metalización de Al(Cu) con espárragos de W (*a*) y secuencia del proceso para el proceso damasquinado doble de la metalización del cobre (*b*). [*Parte (a) del sitio en la red de Intel; parte (b) cortesía de IBM Corporation*].

* La línea visual se refiere a una línea recta no obstruida entre la fuente y el objetivo. (N. del R.)

agujeros de conexión (*vías*). Por lo tanto, la CVD encuentra amplio uso. Los conectores de tungsteno se pueden formar por medio de la reducción por hidrógeno de WF_6

$$WF_6 + 3H_2 = W + 6HF \qquad \textbf{(20-10)}$$

o por medio de la descomposición pirolítica

$$WF_6 + \text{energía (térmica, plasma u óptica)} = W + 3F_2 \qquad \textbf{(20-11)}$$

Es necesaria una barrera de TiN alrededor de los conectores de W para evitar que el WF_6 ataque al Al que está más abajo. Un revestimiento delgado de Ti se agrega debajo y/o sobre los alambres de Al(Cu); después del subsiguiente sinterizado, se forma una aleación de $TiAl_3$ que sirve como un puente redundante de corriente que mantiene la continuidad del circuito en el evento de electromigración del Al(Cu). Algunos conectores de aluminio se hacen por *reflujo* (fusión); para esto, el punto de fusión se debe reducir (por ejemplo, aleando con Ge).

Un avance reciente en la IBM y Motorola hace posible usar la metalización con cobre. En IBM se hacen lechos por ataque químico en la capa de SiO_2 y el cobre se usa tanto para alambres como para conectores (Fig. 20-12*b*). Usando adiciones propias del fabricante y control del proceso para la electrodeposición, los lechos se recubren en tres lados desde el fondo hacia arriba y se hacen depósitos libres de vacíos. La técnica se denomina *proceso doble de damasquinado* (según la técnica antigua de decoración, en la que ranuras grabadas en una superficie metálica se rellenan con alambre fino de Cu, Ag o Au). Para evitar la difusión del Cu, primero se recubren los lechos con una barrera (en el caso de Motorola, nitruro de Ti). Una cubierta delgada de Si_3N_4 sirve como barrera de difusión y promotor de adhesión en las superficies superiores de los alambres de Cu. Hay varias ventajas: las interconexiones de cobre tienen una resistividad 40% menor que las de revestimiento de Al(Cu); las proporciones dimensionales de los alambres de Cu se pueden reducir y, con ello, también la capacitancia y la diafonía y se hacen posibles separaciones y anchos de línea más finos. Al mismo tiempo, los niveles superiores de los alambres de Cu se pueden hacer más gruesos que los de Al(Cu), pero aún con un paso (espaciamiento) muy cerrado, reduciendo así el retraso causado por las líneas largas en el microcircuito. Estas tendencias de aumento de escala mejoran mucho el desempeño de los microcircuitos grandes de alta velocidad con el cableado de Cu de niveles múltiples.[1]

Una desventaja del W (y del Mo) es la oxidación rápida. Por eso se usan siliciuros tales como WSi_2, $MoSi_2$, $TiSi_2$, $CoSi_2$ y $TaSi_2$ como electrodos de compuertas de los MOSFET, solos o con polisilicio altamente inoculado. La deposición se da por medio de la evaporación (o chisporroteo) simultáneo del metal refractario y del silicio, o por medio de la CVD. Con relación al polisilicio inoculado, estos polisiliciuros tienen la ventaja de mostrar una menor resistividad, que es importante para los dispositivos VLSI.

[1] D.C. Edelstein: "Copper Chip" Technology, *SPIE*, **3508**:8-18(1998); L. Geppert; Solid State, *IEEE Spectrum*, 1998 (Enero):23-28.

20-3-5 Litografía

Habiendo analizado las técnicas básicas de la formación y de la deposición de películas, estamos listos para ver cómo se controla la distribución espacial de los rasgos. Es evidente, de observar la figura 20-7, que un circuito integrado que contiene miles o millones de dispositivos en un microcircuito pequeño (Fig. 20-7) debe tener, en efecto, un patrón muy intrincado. Para controlar la deposición y remoción con un detalle tan fino, se usa una versión moderna de una vieja técnica.

Al final del siglo XVIII se desarrolló la *litografía* (del griego *lithos* = piedra) para la impresión. El diseño se pone sobre una superficie plana de piedra (o metal) con grasa. Primero se aplica agua y luego tinta con base de aceite; la tinta se repele por las partes húmedas pero se absorbe por las superficies grasosas. De esta manera se puede transferir una imagen del patrón al papel. Para microcircuitos, el patrón se transfiere fotográficamente, de aquí el término *fotolitografía.* En tanto que controla la geometría del circuito integrado, es el paso más crítico en la fabricación.

Generación de mascarillas El primer paso es la preparación de un *fotoestarcido* a través del que se puede exponer una película fotosensible. Para esto, se hace un patrón para cada capa del circuito integrado.

Para circuitos de complejidad moderada, los patrones pueden ser dibujos a gran escala (también llamados *diseños*), ampliados unas 100-2 000 veces. El dibujo se reduce fotográficamente a una ampliación 4× o 5× sobre una placa de vidrio, que a su vez se reduce de nuevo a un tamaño 1×, se reproduce varias veces en localizaciones exactas hasta que se cubre por completo una placa, correspondiendo al área de superficie de la oblea con decenas o cientos de patrones idénticos.

Para circuitos VSLI o ULSI la complejidad del diseño exige que el patrón se genere y verifique por CAD, así los datos digitales se pueden usar para accionar en forma directa un generador de patrones de 1× o 5×. Se obtiene la mejor definición con un haz electrónico (como el que se encuentra en un cinescopio de televisión, pero altamente colimado para dar un tamaño de punto menor que 1 μm).

Una mascarilla preparada por medio de técnicas fotográficas consiste de una placa de vidrio cubierta por una emulsión fotográfica, que es suave y susceptible de dañarse. Por esta razón, las mascarillas se hacen con más frecuencia de una película delgada (100-200 nm) de un material duro como cromo u óxido de hierro, nuevamente formando el patrón por medio de la técnica de material fotorresistente.

Transferencia del patrón Luego el patrón se transfiere a la superficie de la oblea que se ha recubierto con un material resistente. Un *material resistente*, en el sentido más general, es una sustancia en la que la energía de una onda produce cambios químicos o físicos, haciéndola resistente a los ácidos. Una porción del material resistente se elimina con un solvente, sea en las áreas expuestas, creando un positivo del patrón (*material resistente positivo*), o en las áreas inexpuestas, dando una imagen negativa (*material resistente negativo*).

Un *material fotorresistente* es una sustancia sensible a la luz, típicamente un polímero. Se aplica en una capa delgada. Se colocan algunas gotas del material resistente en la oblea, que luego se hace girar (hasta 12 000 rpm) para extender el material resis-

tente. El solvente residual se expulsa por horneado; la película resultante es por lo general de 0.3-1.0 μm de espesor. Los materiales resistentes negativos son polímeros que forman enlaces cruzados con radiación, de aquí que el área expuesta se haga insoluble. Los materiales resistentes positivos contienen un inhibidor de disolución fotoactivo; cuando se destruye por la luz, el área expuesta se hace soluble. Un haz electrónico de alta energía causa la escisión en cadena. Los materiales fotorresistentes negativos son más rápidos y las obleas se pueden producir en segundos, pero muchos polímeros se hinchan durante el revelado y esto limita la resolución. Los materiales resistentes positivos son más lentos, pero no se hinchan, y proporcionan un ancho de línea más fino. Son la elección para los circuitos ULSI.

Si ya hay rasgos escalonados sobre la oblea procedentes de etapas previas de procesamiento, los escalones pueden requerir rellenarse con una película más gruesa de polímero hasta que se produzca una superficie nivelada, sobre la que se pueda depositar un material fotorresistente delgado.

Se emplean varias técnicas de exposición:

1. En la *litografía óptica* el ancho de la línea se limita hasta la longitud de onda de la luz. En la litografía de luz UV, la exposición se hace con una lámpara de mercurio, emitiendo luz con una longitud de onda de 310-450 nm. La mascarilla se hace de cromo depositado sobre vidrio. Las mascarillas de cambio de fase tienen una segunda capa, que crea un patrón de interferencia para incrementar la resolución y la profundidad de enfoque. La exposición con luz UV profunda de 200-300 nm de longitud de onda proporciona resoluciones de 0.25 μm y se busca una resolución de 0.18 μm con una longitud de onda de 193 nm; esto representa el límite inferior obtenible por litografía con luz. Para minimizar la absorción de luz a longitudes cortas de onda, se usa una placa de cuarzo en lugar de vidrio.

a. En algunas formas el *método de contacto* es el más sencillo, en el que la mascarilla se coloca directamente sobre la oblea. Sin embargo, una sola partícula de polvo de silicio atrapada puede dañar la mascarilla y a todas las obleas subsiguientemente expuestas. Por lo tanto, se deben mantener normas de limpieza muy altas. La resolución es de alrededor de 0.35 μm y se limita por la difracción de la luz.

b. La probabilidad de daño es menor cuando la mascarilla se mantiene a una distancia de 20-50 μm de la superficie (*método de proximidad*), pero la resolución baja a 2-4 μm.

c. Ningún daño ocurre cuando la mascarilla se mantiene alejada de la oblea y la imagen se proyecta sobre la mascarilla (*método de proyección*). La mascarilla es de tamaño real o amplificada (usualmente, 10× o 4×). Exponiendo sólo una parte pequeña de la oblea a la vez. Se pueden lograr resoluciones de submicrones.

2. La impresión a proximidad con rayos x, de 0.4-5 nm de longitud de onda, reduce los efectos de difracción y permite mayores resoluciones, menores que 0.2 μm. Un *sincrotón* es una fuente poderosa pero costosa de rayos x. La mascarilla se debe hacer sobre material transparente a los rayos x (como poliimida, Si, SiC, Si_3N_4 o Al_2SO_3), con el patrón hecho de Au, W o Ta. Sólo algunos milímetros cuadrados se pueden exponer a la vez y se debe usar un proceso repetitivo. Toma aproximadamente un minuto procesar una oblea de 125 mm.

3. Los patrones se pueden grabar de manera directa con un haz de electrones, enfocado a 0.01-05 μm de diámetro. Los materiales resistentes son iguales que en la litografía de rayos x. Se pueden obtener resoluciones de 0.1 μm (100 nm) con materiales resistentes, como el PMMA. Una mejor resolución está limitada por la dispersión de retorno. La mayor desventaja es la tasa relativamente baja de producción; por lo general se requiere de minutos a horas grabar una oblea de 125 mm.

Las técnicas avanzan continuamente, permitiendo una reducción del tamaño de los rasgos; otras técnicas más complejas, no analizadas aquí, también se están desarrollando.

Como todos los circuitos integrados son dispositivos de capas múltiples, se requieren varios pasos de litografía en sucesión. El registro relativo a las capas antes desarrolladas es de máxima importancia. Las mascarillas se alinean en forma mecánica o con la ayuda de dispositivos de alineación.

El material fotorresistente se destruye por el calor elevado. Para los pasos de procesamiento a alta temperatura, como la difusión, el patrón se debe desarrollar en una película resistente al calor como SiO_2 o Si_3N_4.

Sin tomar en consideración la naturaleza de la película superficial (mascarilla de alta temperatura o metalización), el patrón se puede obtener por medio de uno de dos métodos (Fig. 20-13). En el *método de despegue* primero se hace la mascarilla litográfica (el patrón de material fotorresistente); la capa superficial (usualmente la metalización) se deposita sobre la oblea y luego las porciones no deseadas de la película se despegan disolviendo la mascarilla (Fig. 20-13*a*). Los rasgos depositados tienen redon-

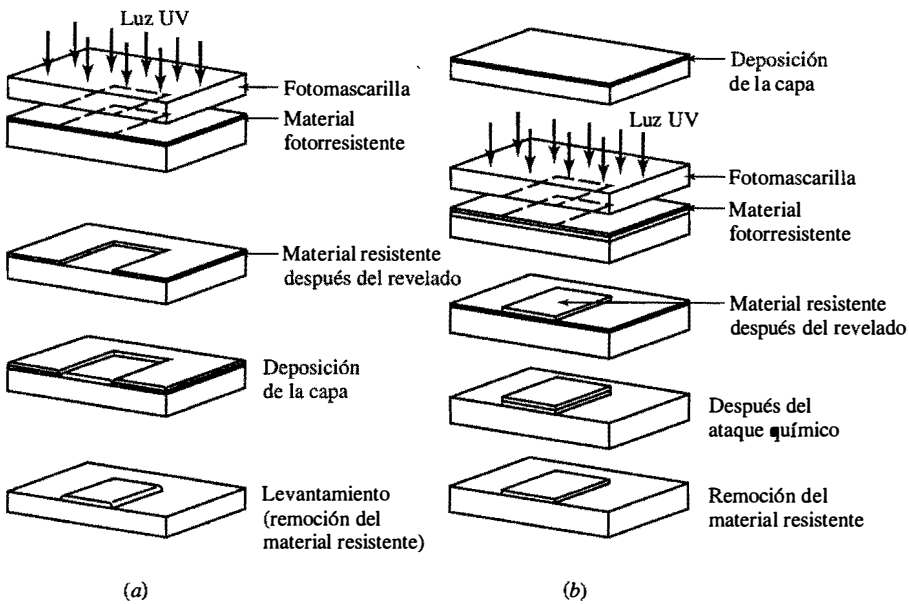


Figura 20-13 Fotolitografía característica por técnicas de (*a*) levantamiento y (*b*) deposición.

deadas las partes superiores y el material resistente limita la temperatura de procesamiento a menos de 300°C. Por lo tanto, la mayor parte de los patrones se transfieren por medio del *método sustractivo* o de *ataque químico*, en el que la película primero se deposita sobre toda la superficie y luego las porciones sin mascarilla se eliminan por ataque químico (Fig. 20-13*b*).

20-3-6 Ataque químico

El ataque químico es el paso del proceso que más se realiza. Puede servir para uno de varios propósitos:

1. Retirar (disolver) una película, como un óxido, de toda la superficie de la oblea.

2. Remover material sobre áreas selectas, definidas por un material fotorresistente. Así, una película de óxido de silicio o de nitruro de silicio sobre la oblea se disuelve en forma química como preparación para la difusión, implantación iónica o deposición de una capa superficial. Alternativamente una película, como aluminio depositado sobre toda la superficie, se disuelve por ataque químico para dejar sólo el metal necesario para las interconexiones. Se usan dos técnicas básicas:

Ataque químico húmedo Las obleas se sumergen en soluciones acuosas de químicos que disuelven de manera selectiva uno u otro material. Así, el HF disuelve al SiO_2 pero no al aluminio; en tanto que el ácido fosfórico disuelve al aluminio sin atacar al SiO_2 o al Si. Luego los materiales fotorresistentes se remueven (disuelven) con un solvente, como la acetona.

El ataque químico húmedo ha perdido preferencia por varias razones. Los productos de reacción se acumulan en el agente de ataque químico y esto crea el problema de desecho periódico. Un problema adicional es que los materiales de ataque químico húmedo son *isotrópicos*, es decir, remueven material a la misma velocidad en todas direcciones, causando un corte sesgado bajo el material resistente (Fig. 20-14*a*). En el diseño de una fotomascarilla esto se puede tomar en cuenta, pero los rasgos deben tener dimensiones relativamente grandes. El silicio monocristalino se ataca de manera química en forma anisotrópica, pero el ataque químico seco aún es la técnica dominante para los dispositivos VLSI y ULSI.

Ataque químico seco La remoción de material se basa en la energía creada por un plasma. Una gran ventaja es que no se producen grandes cantidades de efluentes. Además, si el bombardeo es direccional, se puede lograr un alto grado de *anisotropía* del ataque químico: la rapidez de ataque se hace mucho mayor en profundidad que en las direcciones laterales, de aquí que los cortes sesgados se minimizan y se pueden producir rasgos finos con paredes perpendiculares a la superficie de la oblea (Fig. 20-14*b*). El bombardeo direccional se obtiene en el plasma de los *reactores planares* (Fig. 20-15). Básicamente, son posibles tres métodos de operación:

1. *Ataque químico por chisporroteo.* El material se remueve por el impacto de los iones energéticos de un gas no reactivo, como el argón, por lo que el bombardeo puede inducir daño.

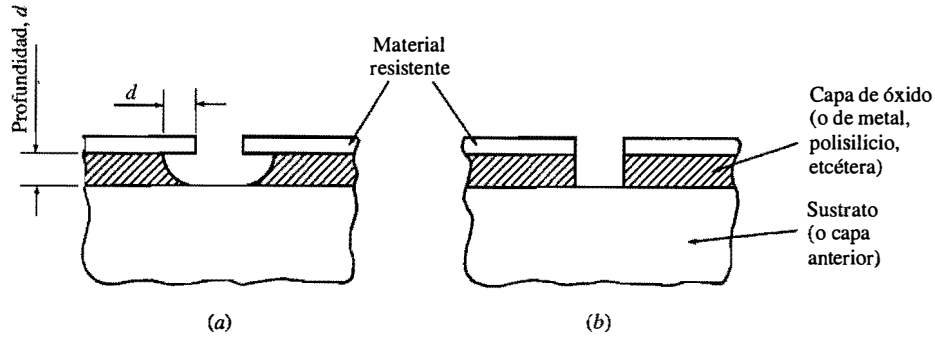


Figura 20-14 Patrones de ataque químico: (a) la remoción del material completamente isotrópico en el ataque químico húmedo crea rasgos mucho menos definidos que (b) el ataque químico anisotrópico por plasma.

2. *Ataque químico con plasma.* La ionización de algunos gases moleculares produce fragmentos altamente reactivos. Así, el ataque químico se obtiene cuando se ionizan gases que contienen halógeno. Por ejemplo, el tetrafluoruro de carbono produce F libre muy agresivo

$$CF_4 + e^- = CF_3^+ + F + 2e^- \qquad \textbf{(20-12)}$$

el CF_4 no reacciona con el Si pero el F forma el volátil SiF_4. El ataque es selectivo, isotrópico y libre de daño superficial. Para producir rasgos de submicrón y para proteger la capa de ozono, los fluorocarbonos se están reemplazando con gases con base de Cl, F o Br.

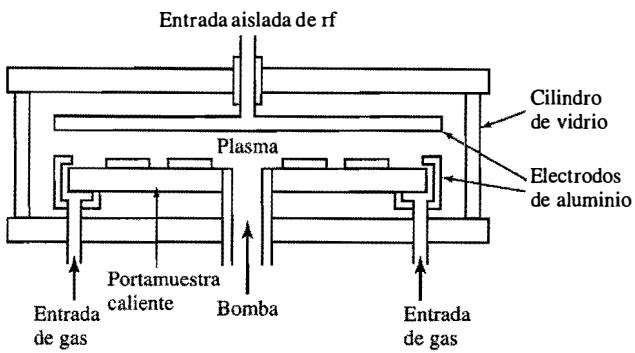


Figura 20-15 El ataque químico anisotrópico altamente direccional se obtiene en reactores planos de plasma en los que las obleas yacen planas sobre el electrodo inferior, con el plasma directamente sobre ellas. [*De A.C. Adoms, en S.M. Sze (ed.): VLSI Technology, 2a. ed., McGraw-Hill, 1988, p. 237. Se reproduce con autorización de Bell Telephone Laboratories.*]

3. *Ataque químico reactivo con iones.* Este método es un híbrido del ataque químico por chisporroteo y del ataque químico con plasma. El sistema se configura de manera que los beneficios de ambos se retienen. En el ataque químico por chisporroteo, la presión del gas es baja y la energía de radiofrecuencia es alta; en el ataque químico con plasma la presión del gas es mayor y la energía de radiofrecuencia es menor; en el ataque químico reactivo con iones ambos parámetros son intermedios. En contraste con el ataque químico húmedo, el ataque químico reactivo con iones (RIE) es altamente anisotrópico porque el bombardeo iónico es perpendicular a la superficie; el bombardeo ayuda a remover especies inhibidoras de ataque del fondo pero las deja en su lugar en las paredes laterales. Así, se pueden hacer ranuras profundas y de lados rectos. Los gases se pueden elegir para asegurar el ataque químico selectivo. El Si puro se ataca lentamente y la rapidez de ataque se puede acelerar en gran medida agregando un 12% O_2 al CF_4. La rapidez de ataque del SiO_2 se incrementa en gran medida con la adición de H_2 al plasma. El cloro ataca al polisilicio varias veces más rápido que al SiO_2. También se necesitan relaciones altas de ataque con relación al material fotorresistente. La rapidez de ataque varía entre 10-1 000 nm/min. Es esta técnica la que hizo posible la VLSI y ULSI, puesto que se pueden grabar ranuras menores que 1 μm de ancho y de varios micrómetros de profundidad. Como las temperaturas del gas son bajas, se pueden usar mascarillas de materiales fotorresistentes convencionales. Después que se completa el ataque químico con plasma, el gas reactivo se reemplaza por oxígeno y el plasma se usa para retirar el material resistente.

20-3-7 Integración del proceso

Como se indica en la sección 20-3-1, las técnicas descritas en las secciones 20-3-3 a la 20-3-6 se emplean en sucesión para generar capas superpuestas. El control por microprocesador y por computadora de los pasos individuales se practica ampliamente y se han hecho grandes avances en la automatización total de lazo cerrado de las secuencias de procesamiento. Esto tiene el beneficio de incrementar la productividad y como se evita la contaminación de las obleas debida al contacto humano, el rendimiento también se mejora en gran medida. A continuación, se da una secuencia usual para un dispositivo CMOS (como en la Fig. 20-6*b*).[2]

Se necesita un número de mascarillas para definir las diversas regiones. El sustrato de tipo *p* (Fig. 20-16*a*) se limpia y la mascarilla 1 define el área del inoculante tipo *n* en la región de tina *n* (Fig. 20-16*b*). Las regiones altamente oxidadas se forman con la mascarilla 2 (Fig. 20-16*c*); para obtener la concentración exacta del inoculante en la región *p* se puede necesitar una implantación adicional con la mascarilla 3 (Fig. 20-16*d*). Luego el óxido delgado de la compuerta se cultiva (mascarilla 4, Fig. 20-16*e*) y las compuertas de polisilicio se desarrollan (mascarilla 5, Fig. 20-16*f*). El óxido de la

[2]Según P.R. Shepherd, *Integrated Circuit Design, Fabrication and Test*, McGraw-Hill, 1996.

compuerta evita la difusión del inoculante hacia el canal subyacente; por lo tanto, el canal y la compuerta se alinean de forma automática sin necesidad de mascarilla (*proceso de la compuerta de silicio autoalineante*). Las regiones fuente y sumidero se hacen (mascarilla 6, Fig. 20-16*g*, y con la mascarilla invertida, Fig. 20-16*h*). Después de cultivar un óxido aislante y de cortar ventanas en este óxido (mascarilla 7, Fig. 20-16*i*), se deposita una metalización de aluminio sobre toda la oblea. La mascarilla 8 permite la eliminación selectiva del aluminio (Fig. 20-16*j*). La secuencia sería diferente para la metalización con cobre (Fig. 20-12*b*).

Ahora el circuito integrado está completo pero es vulnerable. Para protegerlo se *pasiviza* (se protege del daño mecánico y ambiental exterior) por medio de la deposición de un vidrio de P de bajo punto de fusión o de nitruro de silicio (Fig. 20-16*k*). De nuevo se necesita un material fotorresistente para abrir las ventanas de los contactos donde se harán las conexiones a la metalización del Al. Una película de nitruro de silicio depositada con plasma se puede usar para proporcionar protección adicional.

En detalle, hay muchos pasos más en la manufactura de dispositivos VSLI y ULSI, pero los pasos básicos son los mismos. Estos pasos se repiten varias veces para formar las varias capas de estas estructuras. Un ejemplo avanzado se muestra en la figura 20-17*a* para una CPU RISC de 32 bits; la metalización del cobre de seis niveles se expone disolviendo por ataque químico al dióxido de silicio (las zonas de conexión están arriba en la Fig. 20-17*b*).

Control del proceso La densidad cada vez mayor de los circuitos se ha logrado haciendo más estricto el control del proceso y eliminado las fuentes de contaminación. Las partículas de polvo de sólo un décimo del tamaño del rasgo causa defectos fatales; por lo tanto, el procesamiento tiene lugar en *cuartos* (o recintos) *limpios*. Se han desarrollado especificaciones detalladas para la limpieza del aire. Por ejemplo, la U.S. Federal Standard 209E permite un máximo de 10^1 partículas/m^3 de un tamaño de 0.5 μm en la clase M1, 10^2 partículas/m^3 en la clase M2, etcétera. El número de partículas menores también se especifica. La temperatura se controla a 22 ± 0.1 °C, la humedad a 43 ± 2%. Se usa agua ultrapura para enjuagar después de limpiar la oblea. El contacto humano se evita tanto como sea posible. Las condiciones del proceso, los espesores de las películas y los niveles de inoculación se controlan continuamente.

Se localizan en varios sitios microcircuitos de prueba diseñados para medir las propiedades eléctricas (normalmente en las áreas de corte entre los chips producidos) en cada oblea. Los circuitos se prueban en las obleas terminadas, a menudo usando patrones de prueba muy complejos diseñados para verificar todos los aspectos de la operación de los dispositivos. El acceso se gana a través de ventanas producidas por ataque químico en la capa de vidrio. Los chips defectuosos se identifican y se marcan. En algunos chips, especialmente en los más complejos, se proporcionan circuitos redundantes y, al quemar fusibles en la metalización, se pueden activar para reemplazar a los circuitos defectuosos.

La parte posterior de la oblea se esmerila (por lo general se remueven unos 250 μm) y a menos que las conexiones se hagan por medio de la unión de las terminales en forma de haz, que se analiza después, los chips individuales se separan. Como el silicio es duro y frágil se puede rayar con gramiles con punta de diamante, *recortar* con discos impregnados de diamante o rayar con un haz pulsante de láser y luego separar con

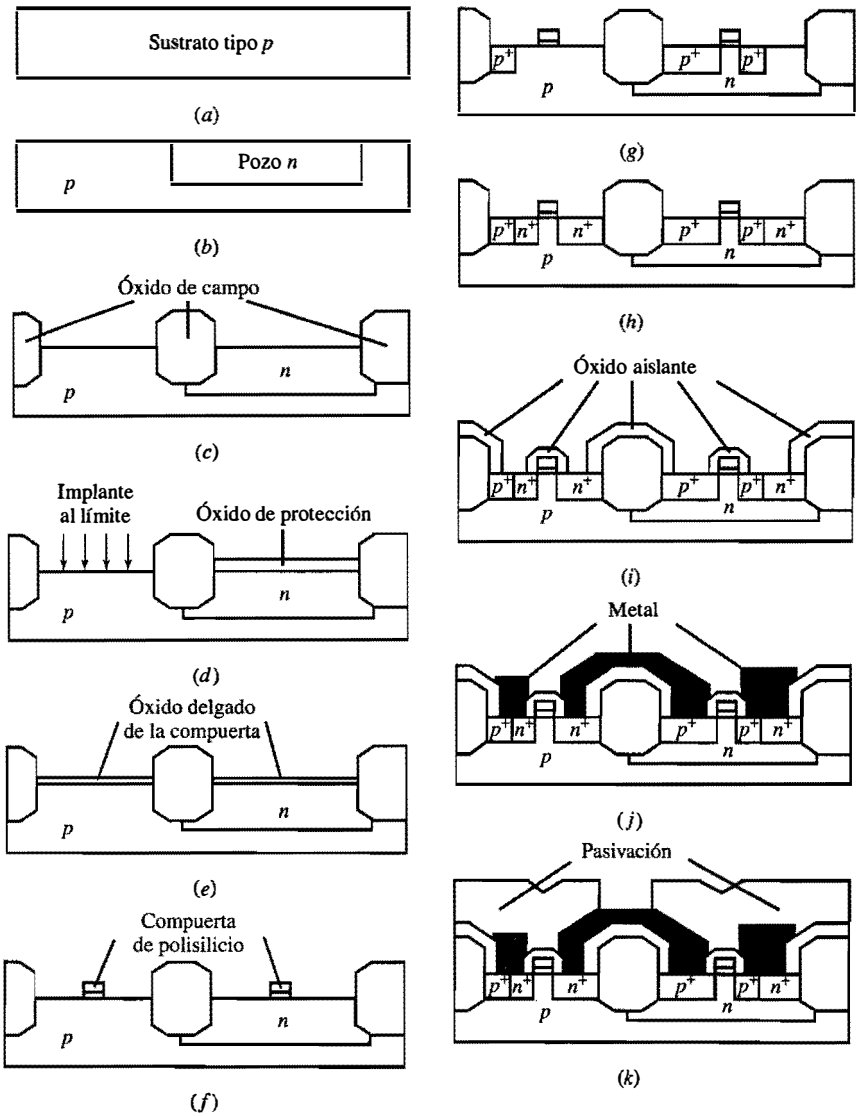


Figura 20-16 Secuencia simplificada de la fabricación de dispositivos CMOS. Véase el texto para tener la descripción de los pasos del proceso. (*De P.R. Shepherd, Integrated Circuit Design, Fabrication and Test, McGraw-Hill, 1996, Fig. A1.12, p. 207. Se reproduce con autorización.*)

presión ligera. La separación completa de ruedas cubiertas con diamante es el método de elección para los dispositivos ULSI. La clasificación puede tener lugar en este punto. Los microcircuitos defectuosos se desechan; los microcircuitos buenos se pueden unir a un respaldo para facilitar su procesamiento automático. Ahora los microcircuitos están listos para su encapsulado.

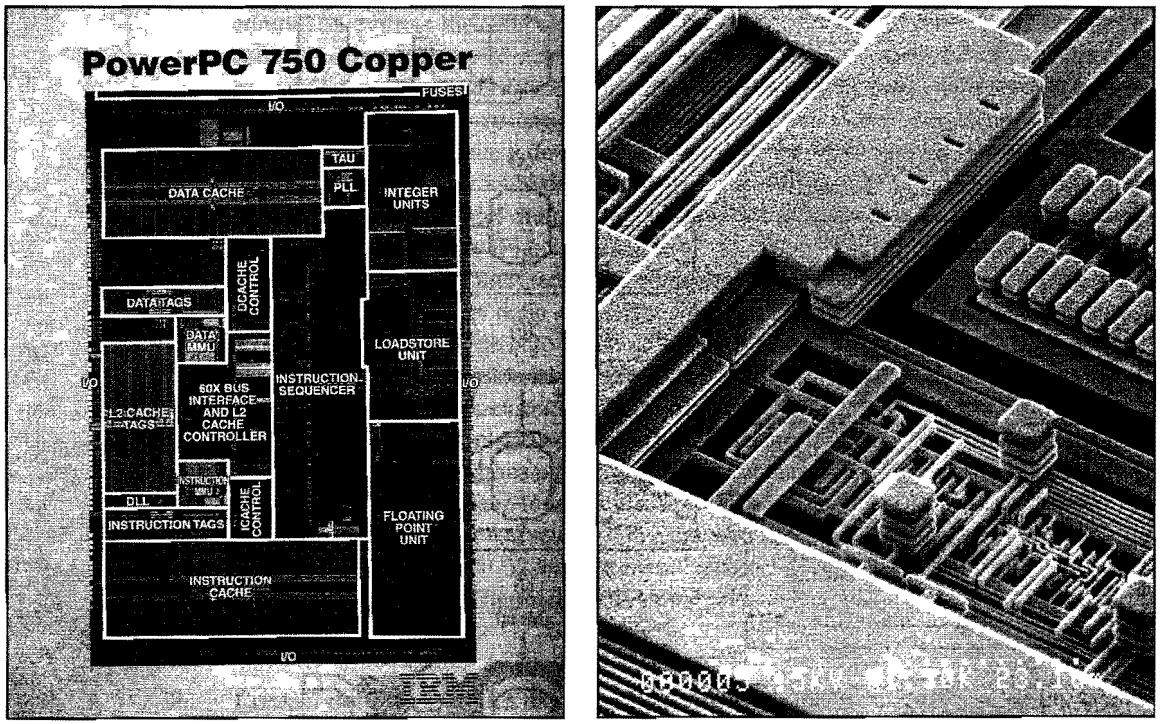


Figura 20-17 (a) Una CPU RISC de 32 bits sólo mide 5.5 × 7.5 mm pero contiene 6.4 millones de transistores. (b) La metalización de cobre de seis niveles se revela eliminando al dióxido de silicio por ataque químico. (*Cortesía de Tom Way, IBM Corporation.*)

20-3-8 Encapsulado

El delicado microcircuito se debe conectar eléctricamente al mundo exterior y proteger del daño mecánico y de las influencias ambientales. Las técnicas empleadas son adaptaciones de los procesos descritos en capítulos anteriores. Esto no significa que el encapsulado esté libre de problemas o que sea barato. En efecto, con frecuencia el costo del encapsulado excede el de la fabricación del microcircuito.

Físicamente el encapsulado puede aparecer en varias formas. Una de las más populares era el *encapsulado doble en línea* (DIP, Fig. 20-18*a*). El circuito electrónico, que mide sólo algunos milímetros en sus lados, descansa en un receso del sustrato en el que está colocado (*pegado*) por una capa metálica o de polímero. El contacto con el mundo exterior se hace con *bornes* o *terminales* cuyos centros se encuentran, continuamente, a 2.54 mm (0.1 pulg) entre sí. Como en el ejemplo de la figura 20-18*a*, se alimentan a través de agujeros en una placa de circuito impreso (Secc. 20-4-3). Para cantidades mayores de bornes (especialmente en dispositivos lógicos o en microprocesadores), las terminales se disponen en los cuatro lados (*encapsulado cuádruple*) o sobre toda la cara

posterior (*configuración de bornes en red*) con distancias mucho menores entre centros (0.8-0.3 mm). Los bornes tienen una configuración en forma de "J" (Fig. 20-18*b*) o de ala de gaviota (Fig. 20-18*c*) para el montaje de superficie. Huellas mucho más pequeñas se aseguran por medio de la estructura *terminal sobre el chip* (LOC) (Fig. 20-18*b*).

Los alambres (terminales) se conectan a las zonas proporcionadas en la metalización del microcircuitos (dado), y el empaque completo se sella herméticamente contra el medio exterior. Así, existen tres áreas de interés principal para nosotros: la colocación del microcircuito sobre el sustrato (*unión del dado*), la colocación de las terminales (*interconectado*) y la protección del ensamble (*encapsulado*).

Unión del dado El microcircuito se debe unir a un sustrato más robusto que también ayuda a eliminar el calor. El sustrato puede ser alúmina, un aislante eléctrico de baja conductividad térmica (tabla 4-1). La berilia (BeO) tiene alta conductividad térmica pero es más costoso y su polvo es muy tóxico. Alternativamente, el sustrato es un metal, como el Kovar (tabla 4-1) o, para mayor conductividad térmica, una aleación de cobre. Los sustratos metálicos con frecuencia se hacen en la forma de *estructuras de terminales* de 0.1-0.15 mm de espesor, grabadas por ataque químico o estampadas, que proporcionan trayectorias conductoras hacia los bornes. Con el incremento del tamaño del chip, el desacoplo en la dilatación térmica de los materiales componentes se convierte en una preocupación seria e influye en la elección del proceso. Básicamente, se dispone de tres técnicas:

1. Cuando la dilatación térmica del sustrato es muy diferente de la del dado, se usa un soldante dúctil al alto plomo (de una temperatura de líquidos de entre 300 y 315°C).

2. La unión de las estructuras de terminales de Kovar o cerámicas suele hacerse con Au puro o con una hoja de Au-2Si, con un espesor menor a 50 μm, cortado al

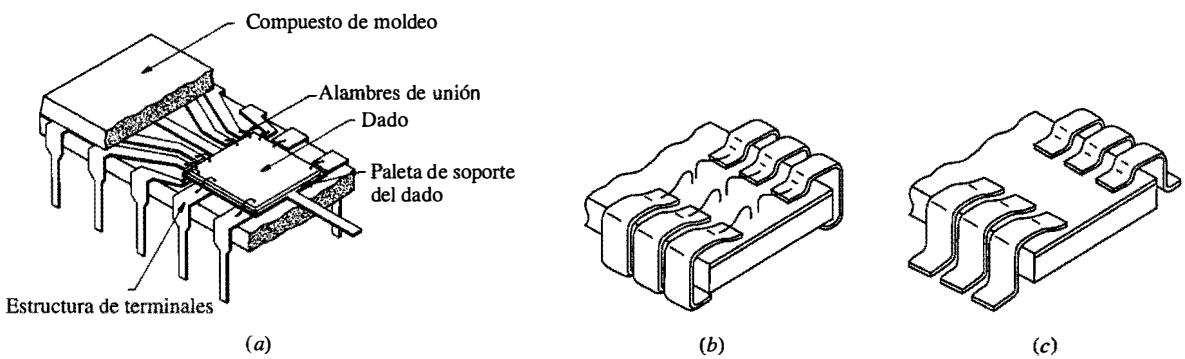


Figura 20-18 (*a*) Vista en sección de una pastilla DIP que muestra el chip (dado) unido a la estructura de terminales y encapsulado en plástico. Las pastillas de montaje de superficie tienen (*b*) terminales en J o (*c*) terminales en forma de ala de gaviota. [*Parte (a) de J.R. Howell, en Proc. Int. Rel. Phys. Symp., p. 105 © 1981, IEEE. Se reproduce con autorización.*]

tamaño (*preforma*). Para asegurar una buena humectación, el dado y el sustrato se chapan con Au o, para estructuras metálicas de terminales, también con Ag. En sistema Au-Si existe un eutéctico con un contenido de 3.6% Si. Al calentar por encima de la temperatura eutéctica de 370°C, se forma el eutéctico por aleación entre el dado y la preforma (*unión eutéctica*). Para encapsulados cerámicos, el conductor se puede depositar por estarcido. Como en todos los procesos de unión, las películas superficiales se deben atravesar y la limpieza mecánica es útil.

3. Para aplicaciones menos exigentes está la sujeción por polímeros, principalmente epóxico o poliimida cargadas con hojuelas de Ag (*unión epóxica*). El coeficiente de dilatación es alto (tabla 4-1), pero los esfuerzos térmicos son bajos porque el módulo de elasticidad del polímero es bajo. Los polímeros se dosifican con facilidad en forma neumática o por impresión; ambos procesos se prestan a la automatización. La baja temperatura de curado (125-175°C) evita el daño a los delicados dispositivos activos. El epóxico curado puede soportar temperaturas de 320°C durante tiempos cortos, como los que se necesitan para algunas técnicas de unión de alambre.

Interconexión El microcircuito emerge del proceso de fabricación con zonas de conexión de aluminio (o de cobre). Ahora es necesario hacer conexiones hacia las terminales (o bornes de conexión) del encapsulado. En principio, se puede lograr la máxima densidad de interconexión (50-1 000 mm^{-2}) a bajo costo, sobre el microcircuito mismo. Dentro del encapsulado (*conexión de primer nivel*) la densidad es menor (usualmente, 1 mm^{-2}), pero aún así es mayor que la que se puede hacer fuera del encapsulado (*conexión de segundo nivel*). De aquí que la tendencia sea poner circuitos más complejos dentro de un solo encapsulado, aún si éste necesita más bornes para su interconexión con el mundo exterior. El número de conexiones externas se puede reducir colocando dos o más circuitos integrados sobre una base común de circuito (*módulo de microcircuitos múltiples*, MCM).

Para mantener pequeño el tamaño del dado, las zonas de la metalización se hacen tan pequeñas como sea posible y se espacian sólo con una separación de 0.1-0.2 mm. Hubo que desarrollar técnicas para hacer conexiones delicadas para las lengüetas de las estructuras conectoras o para los bornes. El aluminio siempre se encuentra cubierto de un óxido tenaz, como se analizó en la sección 18-3. Se pueden establecer uniones confiables sólo si las películas superficiales se rompen. Los métodos para lograr este objetivo son fundamentales para todas las técnicas de interconexión.

1. *Unión de alambre.* Alambre delgado (de 25 μm de diámetro) de Al o Au, se une a las zonas por medio de una de dos técnicas:

a. La *unión por compresión térmica* es un ejemplo de soldadura de estado sólido (Fig. 18-4) por medio del aplanamiento en caliente (300-250°C) de un alambre. Obviamente, no se puede utilizar lubricante y, como en todo el recalcado sin lubricación, la fricción adherida prevalece sobre la superficie de contacto (Fig. 9-4*d*). El óxido permanece sin perturbar a la zona de metal muerto y se necesita de una fuerte deformación para incrementar la relación d/h o L/h. Esto asegura el deslizamiento y así disgrega el óxido, por lo menos lejos de la zona central de metal muerto. Para reducir la presión requerida y facilitar la difusión, la unión se realiza con una herramienta caliente (*termodo*) y la presión se mantiene activa durante 0.5-2 s.

b. La *unión termosónica* es un ejemplo de unión ultrasónica (Fig. 18-5*b*). El sustrato y el dado se calientan hasta 150-250°C y el alambre se comprime mientras la herramienta de unión vibra ultrasónicamente. La adición de energía ultrasónica calienta y suaviza el alambre, el frotamiento es efectivo para disgregar los óxidos y a una temperatura relativamente baja se obtiene una junta de buena calidad.

La aplicación de estas técnicas se muestra en la figura 20-19.

2. La *unión automatizada por cinta.* Es una técnica para hacer simultáneamente todas las uniones. El patrón de los conectores se graba por ataque químico, utilizando fotolitografía, en una hoja de Cu de 33 o 66 μm de espesor, que normalmente se chapea con Au para mejorar la unión. Se puede respaldar con un polímero, como una poliimida. De forma alterna, el patrón se deposita sobre una cinta de polímero. De cualquier manera, se suministra en una cinta larga, permitiendo la automatización. La unión se establece contra *protuberancias*; éstas son columnas diminutas chapadas con Au o Cu con una altura aproximada de 25 μm. Se depositan ya sea en las zonas de Al del dado o en las localizaciones correspondientes en la cinta. La unión se establece por medio de una de dos técnicas:

a. La unión por compresión térmica, con un termodo en la forma del patrón de conexión, calentado a 450-550°C, aplicando una presión de 275-480 MPa (la junta no alcanza esta temperatura).

b. Unión eutéctica a una cinta de cobre chapada con estaño. El eutéctico Au-Sn se forma a 280°C. Bajo la presión aplicada, tiene lugar un aleado rápido.

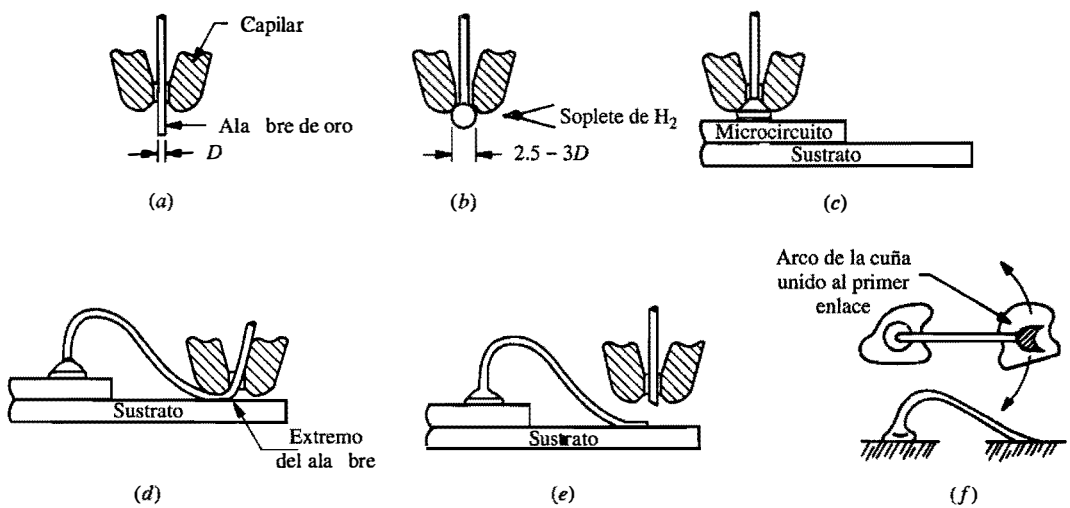


Figura 20-19 El enlace termosónico de bola y cuña implica: (a) alimentar alambre de oro, (*b*) formar la bola con un soplete de hidrógeno, (c) unir la bola a la almohadilla en el microcircuito y (*d*) unir el alambre a la estructura de terminales. [*Según J.S. Stafford, Semiconductor International, mayo, 1982, p. 82. Se reproduce con autorización de Cahners Publishing Co., Chicago.*]

3. *Técnica de inversión del chip.* Ésta también implica la formación de protuberancias chapadas con Au en el dado, pero se evapora una capa de Pb-Sn (o, más recientemente, se electrodeposita) sobre las protuberancias. El calentamiento hace que la soldadura fluya y forme bola. El microcircuito preparado de esta manera luego se invierte sobre la cinta, y la unión se establece por calentamiento. En la técnica del *colapsado controlado del componente del microcircuito* ("*chip*") (C^4) se mantiene la distancia entre el microcircuito y el sustrato.

4. *Unión de la terminal en forma de viga.* Difiere de todas las técnicas anteriores en que las terminales de oro al mundo exterior se depositan sobre la oblea y los microcircuitos se separan por medio de la disolución del silicio por ataque químico. Las terminales sobresalen del microcircuito, apareciendo como vigas diminutas (de aquí su nombre); las conexiones para las zonas de Al se pueden hacer por medio de empalme de alambre.

Encapsulado Una vez que se establecen las conexiones, el circuito integrado está completo y sólo necesita una cápsula hermética para protegerlo del medio externo. El grado de protección depende de la aplicación. Por ejemplo, las cápsulas deben ser mecánicamente más fuertes y más resistentes a la temperatura en una aplicación industrial o militar, que en una computadora casera. Además de las características eléctricas requeridas, la cápsula también debe ayudar a eliminar el calor. Las siguientes técnicas de encapsulado son las más importantes:

1. *Moldeado de plástico.* El ensamble completo se coloca en la cavidad de una matriz de moldeado por transferencia (Fig. 14-12*b*) y se cubre con un polímero termoendurecible (por ejemplo, epóxico, epóxico-silicón o silicón) o con un polímero termoplástico (por ejemplo, sulfuro de polifenileno). Para reducir la contracción y la dilatación térmica y para incrementar la resistencia, el polímero se rellena con SiO_2 o Al_2O_3 (tabla 4-1). Como se indica en la sección 14-3-4, el calentamiento por esfuerzo cortante reduce la viscosidad del polímero para que no se dañen los delicados alambres de conexión. Las presiones de moldeo se pueden mantener bajas (alrededor de 6 MPa) y la exposición a la temperatura (por lo general, 175°C) se limita de 1-5 min. Ese *moldeo posterior* es relativamente barato, rápido y es la técnica dominante para la producción en masa de circuitos integrados. Sin embargo, la diferencia en la dilatación térmica entre el polímero, el silicio y el oro origina esfuerzos durante el moldeo y en el servicio.

2. *Premoldeo.* Se evita la exposición del microcircuito a los esfuerzos y temperaturas de moldeo, cuando el molde se hace previamente con una cavidad apropiada (*premoldes*). Las conexiones de los bornes normalmente se hacen con una estructura de terminales.

3. *Encapsulado cerámico.* En las secciones 12-4-2 y 12-4-6 se vio que las cerámicas, principalmente Al_2O_3, se vacían en cinta en tiras delgadas, de las que se pueden troquelar sustratos. Se punzonan agujeros para hacer las conexiones eléctricas (*agujeros vía*), se imprimen las trayectorias del alambrado sobre la superficie en la forma de una pasta de polvo metálico refractario (normalmente W) y los agujeros vía se rellenan con metal. Se ensamblan en forma intercalada varias partes de cerámica sin terminar, que luego se hornean. El W se recubre con níquel para facilitar la soldadura fuerte de

los alambres de Kovar de las estructuras de terminales, usando una aleación eutéctica para soldadura fuerte de Cu-Ag. El proceso requiere un control muy estricto de la contracción. Es costoso pero esencial para los requisitos de máximo desempeño. Los sustratos de berilia ofrecen mayor conductividad térmica, pero a un precio mayor.

4. *Cápsulas refractarias selladas con vidrio.* En éstas también se usan sustratos cerámicos, pero la estructura de terminales se sella en un vidrio (tabla 12-2) arriba de 400°C. Para evitar la aleación del Au y del Al (lo que conduciría a la formación de un compuesto intermetálico frágil) se usa una construcción totalmente de aluminio.

5. *Módulos de microcircuitos múltiples de inversión del microcircuito de vidrio-cerámica.* Estos módulos son las cápsulas de las macrocomputadoras. La cerámica vítrea tiene una dilatación térmica similar al Si, una constante dieléctrica mucho menor que la alúmina y permite mayor velocidad en la comunicación interior del microcircuito.

20-4 CIRCUITOS IMPRESOS

La cápsula del circuito integrado u otro dispositivo semiconductor se puede instalar directamente en algún producto industrial, y sólo necesita un alvéolo u otro medio de conexión. Sin embargo, suele ser una parte de otro circuito mayor, que se une a un *tablero de circuito impreso* (PWB). Las conexiones se hacen en la parte inferior de la placa, ya sea soldando los bornes (Fig. 20-18*a*) que sobresalen a través de los agujeros (*montaje a través del agujero*) o uniendo terminales J (Fig. 20-18*b*) o de ala de gaviota (Fig. 20-18*c*) por medio de tecnología de *montaje de superficie* (Secc. 20-4-3) para hacer un *circuito híbrido.*

La placa puede tener circuitos de *película gruesa* o de *película delgada.* La distinción entre los dos es un tanto arbitraria y se basa más en el método de manufactura que en el espesor real, aunque las *películas delgadas* comúnmente son de 0.1-1 μm de espesor, en tanto que las *películas gruesas* son de 10-25 μm. Estas películas se usan para proporcionar resistencias y capacitores que usarían demasiada superficie del microcircuito, así como para la interconexión de varios componentes discretos (incluyendo inductores, diodos, transistores, etcétera) y circuitos integrados. Normalmente es en la producción masiva donde los componentes discretos ensamblados sobre una placa de circuito impreso serían demasiado costosos.

20-4-1 Métodos de fabricación de película delgada

La tecnología esencialmente es la misma que para los circuitos integrados, pero se usa una variedad de materiales para la película. La película se diseña igual que los circuitos integrados y, si los rasgos son finos, se usa la litografía para revelar una mascarilla de SiO_2 (Fig. 20-13). Luego los metales se depositan por medio de la PVD o por chisporroteo. Alternativamente, los metales se depositan sobre toda la superficie y se disuelven por ataque químico con la ayuda de una fotomascarilla. Se pueden formar varios dispositivos:

1. Para *resistencia* de bajo valor se deposita una aleación de nicromo (Ni-Cr), óxido de estaño o nitruro de tántalo para resistividades de 10-1 000 Ω/□. Para resistores de alto valor, se usan cermets (normalmente siliciuros de Ta-Cr) de 100-20 000 Ω/□. La estabilidad se logra calentando (horneando).

Se obtienen valores exactos *por ajuste*, es decir, sometiendo la resistencia a un tratamiento mientras que se controla su resistencia (o la operación prevista del circuito). El método de ajuste depende del material de la resistencia. Los óxidos se pueden oxidar aún más hasta que se alcance el valor deseado de resistencia. El nicromo se ajusta de forma mecánica; el ancho de la línea se reduce por medio de un gramil de diamante, por erosión por chispas o por un haz de alta energía (haz electrónico o láser).

2. Los *capacitores* se construyen por medio de la deposición sucesiva de metal (normalmente Al o Au), un aislante (SiO_2, Al_2O_3 o, para mayor constante dieléctrica y capacitancia, HfO_2), y de nuevo películas metálicas. Para una película aislante de 100 nm de espesor, la capacitancia es 800 pF/mm^2 con Al_2O_3 y 3 500-7 000 pF/mm^2 con HfO_2. El ajuste es posible proporcionando cejillas (patillas) que se pueden recortar.

3. El cableado se produce por medio de las técnicas usadas para la metalización (Secc. 20-3-4). La electrodeposición permite conexiones relativamente angostas (ancho de submicrones) para los módulos de microcircuitos múltiples de alta densidad. En efecto, la electrodeposición es un elemento vital en toda la microfabricación.[3]

20-4-2 Circuitos de película gruesa

La diferencia básica entre las técnicas de película gruesa y película delgada es que cuando la definición fina proporcionada por la fabricación de película delgada no se necesita, los circuitos de película gruesa se pueden producir a un costo menor debido al reemplazo de la fotolitografía con *serigrafía*, una técnica adoptada de las industrias textil y de artes gráficas. En la forma original, un tinte o tinta se presiona a través de agujeros de una pantalla de seda para formar un patrón predeterminado sobre tela o papel. En la tecnología de película gruesa la seda se reemplaza con una pantalla de metal. Se siguen los pasos siguientes:

1. Los circuitos se diseñan como en la fabricación de circuitos integrados, excepto que a menudo son menos complejos y como contienen rasgos mucho menos gruesos (por lo general, con un ancho de línea de 50-500 μm), el diseño sólo se magnifica de 5-20×). Se dibuja en papel o se corta de una película de plástico, a mano o por computadora. Luego se prepara una fotomascarilla.

2. La pantalla suele ser de acero de malla 8 a 325 (tejido de alambres de 0.94-0.028 mm de diámetro), dando aberturas de 0.118-0.051 mm). En uno de los procesos, el denominado *proceso de pantalla de acero con emulsión directa*, se deposita una emul-

[3] *IBM J. Research and Development*, **42**(5): 561-722 (1998).

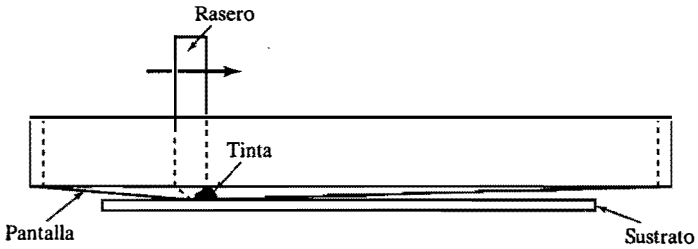


Figura 20-20 Los circuitos de película delgada se depositan mediante la serigrafía.

sión fotosensible en la pantalla, se expone a través de la fotomascarilla y se disuelven las áreas no expuestas. El patrón del circuito se define por los agujeros no bloqueados de la pantalla.

3. La pantalla se mantiene, con tensión controlada, a unos 0.5-1.0 mm de separación con el sustrato cerámico y se aplica tinta con un rasero (Fig. 20-20). La *tinta* se formula para tener propiedades reológicas apropiadas: no debe fluir por gravedad (de aquí que deba tener un punto de cedencia bien definido, como un fluido Bingham (Fig. 7-5, línea *D*), pero debe fluir a un esfuerzo cortante bajo (de aquí que deba ser seudoplástico, Fig. 7-5, línea *C*). La tinta contiene varios polvos dispersos en un sistema polímero-solvente. Los ingredientes son: para un conductor, polvo metálico (normalmente, Pt-Au, Pd-Ag o una aleación similar) con algunos óxidos; para resistencias, también una mezcla de polvo metálico-óxido pero con una proporción mayor de óxido; para dieléctricos, sólo polvo cerámico (como $BaTiO_3$). Para el encapsulado se usan tintas con dispersiones de vidrio; para establecer el enlace entre el metal y los polvos de óxido y el sustrato, siempre se incorpora en la tinta un polvo de vidrio de bajo punto de fusión (*frita de vidrio*).

4. Los sustratos impresos se secan a 125°C para desalojar el solvente, luego se hornean (a menudo en un horno continuo) donde el polímero primero se quema. Luego la temperatura se incrementa hasta cerca de 850°C para sinterizar las partículas de metal y de óxido y para fundirlas, con la ayuda del vidrio, al sustrato. Luego se permite que los circuitos se enfríen en forma programada para evitar el agrietamiento y la oxidación.

5. El desempeño del circuito se puede optimizar ajustando las resistencias, como en la tecnología de película delgada. El ajuste por aire y abrasivo también es posible: el ancho de la resistencia se ajusta por medio de un chorro abrasivo en el borde de la tira, usando polvo (por lo general Al_2O_3) fino (aproximadamente 50 μm) en aire a alta presión.

20-4-3 Soldadura

Los circuitos integrados y otros componentes se unen a la placa de circuito impreso con soldadura blanda. Potencialmente se podrían usar todas las técnicas descritas en la sección 18-8-3, pero algunas se han desarrollado en forma específica para el propósito.

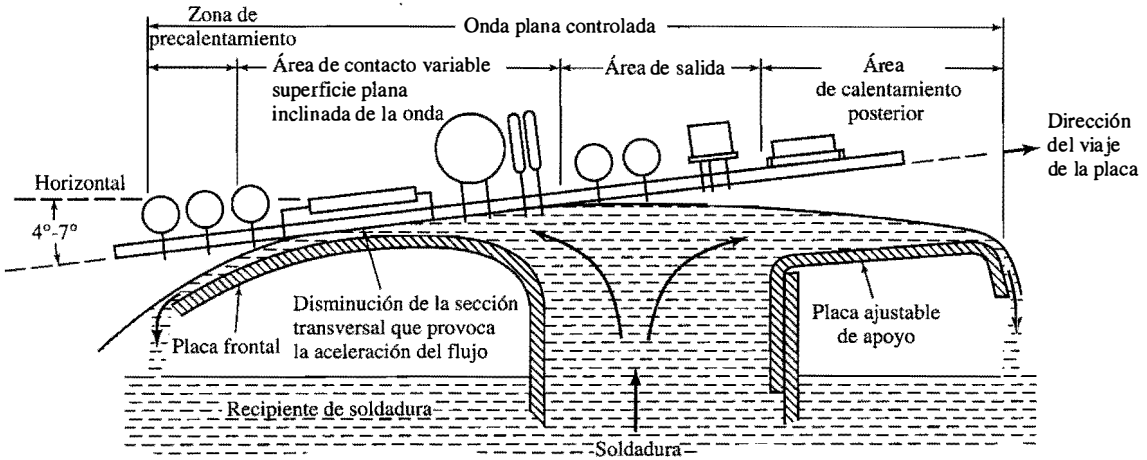


Figura 20-21 Soldadura plana de onda que muestra la placa ajustable de apoyo para controlar la configuración de la onda y el patrón del flujo. (*Cortesía de Electrovert Consulting Services, Elmsford, Nueva York.*)

Las soldaduras con base de estaño se usan con mayor frecuencia, y se eligen por su resistencia a la corrosión, fluidez y falta de reacción (o reacción controlada) con las terminales. El rango de fusión es muy importante cuando la placa se somete a varias operaciones de soldadura en secuencia (*soldadura por pasos*). Las soldaduras ricas en plomo se usan en temperaturas más altas; la composición eutéctica Sn-Pb fluye fácilmente y las composiciones derivadas de la eutéctica (como Sn-40Pb) llenan agujeros mayores (tabla 18-2). Para temperaturas menores, se usan soldaduras de Sn-In (Sn-50In). Las soldaduras de Sn-Ag minimizan el ataque sobre los recubrimientos de Ag. Las terminales de los dispositivos con frecuencia necesitan recubrimiento para asegurar la humectación por la soldadura y las cerámicas se metalizan. Los fundentes suelen ser de base de resina o contienen un ácido orgánico en agua o alcohol. Básicamente hay dos enfoques:

1. El montaje a través del agujero requiere que la soldadura se aplique a las terminales que sobresalen a través de agujeros, en la placa de circuito impreso. La *soldadura de onda* es de gran valor: la soldadura fundida se bombea a través de una ranura angosta (boquilla) de manera que se mueve en una onda fluyendo con suavidad (Fig. 20-21).

2. La tecnología de montaje de superficie se ha convertido en el método preferido para los circuitos VSLI y ULSI porque se obtienen densidades mayores y se evitan los problemas asociados con la hechura de agujeros. La soldadura se aplica como una pasta (*tinta*) que consiste de polvo soldante de Sn-Pb (o para evitar la pérdida de Ag de los conductores por difusión, Sn-Pb-Ag) y de compuestos fundentes. La aplicación es por serigrafía, estarcido o en puntos por inyectores controlados en las coordenadas *x-y*; la electrodeposición se ha introducido en fechas recientes para interconexiones de alta densidad con inversión del microcircuito. Después de colocar las piezas, las placas se

hornean para remover el aglutinante (si está presente) y la soldadura se vuelve a hacer fluir. En la producción en masa esto se hace pasando la placa por un horno o por calor infrarrojo. Una forma especial es la *soldadura de fase de vapor*: la placa se pasa por una cámara, en la que el vapor saturado de un líquido con un punto de ebullición seleccionado (100-265°C) asegura la transferencia rápida de calor, de manera que la soldadura se funde en unos segundos.

20-5 MICROFABRICACIÓN

Como su nombre lo indica, la *microfabricación* implica, en el sentido más amplio, todos los procesos que hacen productos en la escala menor del milímetro. Muchos procesos tradicionales y no tradicionales son capaces de hacerlo: los alambres se trefilan hasta algunos micrómetros (micrones) en diámetro; las hojas de metal se laminan hasta algunos micrones de espesor; los productos en miniatura formados en frío se forjan o se extruyen; ejes con dimensiones menores que el milímetro se maquinan en tornos de tipo suizo y muchos procesos para manufactura de plásticos y todos los procesos abrasivos tradicionales y no tradicionales son capaces de operar en esta escala. En un sentido, un reloj de pulsera mecánico es un producto microfabricado. Sin embargo, desde la perspectiva de la gente implicada en la microfabricación, todos éstos son procesos y productos tradicionales o convencionales. La microfabricación, en el sentido más estricto, se aplica a las tecnologías de circuitos integrados para la manufactura de dispositivos mecánicos o electromecánicos. En efecto, uno de los términos alternos (y más restrictivo) es *sistemas microelectromecánicos* (MEMS). Los productos pueden ser puramente mecánicos, como trenes de engranes, electromecánicos, como actuadores y motores, o pueden combinar formas diferentes de operación en una gran variedad de sensores.

Los sensores y actuadores, que convierten la energía de una forma en otra, hoy en día constituyen la aplicación más grande de la microfabricación. Esos dispositivos no son nuevos. En un tostador de pan una cinta hecha con dos metales de dilatación térmica diferente (Secc. 18-12) se desvía con el incremento de la temperatura, actúa sobre un interruptor cuando se alcanza la temperatura deseada, el pan tostado se expulsa, y el tostador se apaga. La piezoelectricidad de los cristales (Secc. 4-9-3) se explota para convertir la fuerza ejercida sobre una celda de carga en corriente eléctrica y viceversa, para accionar una herramienta ultrasónica sometiendo una corriente alterna (Secc. 16-8-6). A esos dispositivos se les considera como productos microfabricados sólo cuando se basan en tecnología de circuitos integrados. Esta tecnología permite la integración con la capacidad para el acondicionamiento y procesamiento de señales que poseen los circuitos integrados (IMEMS), por lo que es usual hablar de *sensores inteligentes.*

20-5-1 Técnicas de microfabricación

Para dispositivos electromecánicos es necesario ampliar la tecnología de circuitos integrados, puesto que en su construcción las capas a menudo tienen un espesor de sólo una

fracción micrómetro. En contraste, aun una membrana para un detector de presión tendrá que ser de hasta varios micrómetros de espesor y se necesitarán capas aún más gruesas para un engrane. La definición del patrón tendrá que ser de alta calidad y las paredes deben ser perpendiculares y lisas. Básicamente existen dos métodos para la microfabricación con base de silicio.

1. *Micromaquinado volumétrico* es el término que se aplica a los procesos de *arriba a bajo* (de remoción), en los que un material cristalino o no cristalino se ataca químicamente en un patrón definido por litografía. Los materiales fotorresistentes de alta sensibilidad, conjuntamente con mascarillas de óxido, aseguran la definición requerida. Se usan técnicas de ataque químico húmedo o, con mayor frecuencia, seco (especialmente RIE) para desarrollar los rasgos. Con técnicas adecuadas de ataque químico se pueden desarrollar lechos profundos (> 200 μm) y angostos (con proporción dimensional de más de 10:1). Los cortes sesgados y los espacios cerrados se crean colocando varias rebanadas micromaquinadas delgadas, una arriba de la otra y uniéndolas por difusión.

2. El *micromaquinado superficial* es un término que se aplica a los métodos de *abajo hacia arriba* (aditivos). Se depositan capas sucesivas de polisilicio y las áreas no deseadas se eliminan por litografía y ataque químico. Si una capa base (de sacrificio) se deposita en el sustrato y se disuelve después de la terminación, es posible crear ensambles de piezas múltiples como trenes de engranes con ejes integrales sin necesidad de ensamble (*ensamble in situ*).

Los análisis detallados de las técnicas de micromaquinado se dan por Kovacs y Madou.[4]

El silicio, aunque frágil, tiene propiedades atractivas para componentes mecánicos: la densidad (2.3 g/cm^3) es menor que la del aluminio, el módulo de elasticidad es el mismo que para el acero (210 GPa), el esfuerzo de cedencia es alto (1-2 GPa) y como no hay histéresis, se producen excelentes estructuras cargadas elásticamente. Con un punto de fusión de 1 414°C, se puede unir por difusión a 1 000°C.

En los sensores se pueden explotar muchos principios físicos y químicos. Por ejemplo, los sensores de presión basados en membranas de 2-20 μm de espesor, con galgas extensométricas o sensores piezoeléctricos implantados, se usan en automóviles (para mecanismos hidráulicos de suspensión activa, soporte lumbar del asiento y detectores de la presión barométrica). Los acelerómetros suelen basarse en el desplazamiento de una masa, unida con un cristal piezoeléctrico o con un lado de un capacitor.

Ejemplo 20-1

Los acelerómetros son partes indispensables de automóviles y muchos se instalan para el despliegue de las bolsas de aire. En un caso, se miden aceleraciones de hasta 50*g* con una precisión de ±5% por medio del cambio de la capacitancia causado por el desplazamiento de peines interpenetrantes de un capacitor de silicio. El microcircuito contiene los dispositivos electrónicos necesarios para la excitación, acondicionamiento de la señal y autoprueba; el capacitor de detección micromaquinado sólo ocupa 5% del área de la superficie.

[4] G.T.A. Kovacs: *Micromachined Transducers Sourcebook*, McGraw-Hill, 1998; M. Madou: *Fundamentals of Microfabrication*, CRC press, 1997.

Algunos problemas inusuales se enfrentan debido a efectos de la escala. El análisis detallado está más allá del alcance de nuestra investigación, pero se apreciará que a medida que las dimensiones lineales disminuyen, los efectos ligados a la masa se contraen a la tercera potencia, pero aquellos ligados a la superficie sólo se contraen al cuadrado. Así, la fricción y el arrastre viscoso se incrementan mucho. Esto crea dificultades para reducir la fricción e incrementan el peligro de desgaste.[5]

Ejemplo 20-2

La alta fricción y el desgaste rápido se encuentran entre los problemas que los micromotores deben superar. Una alternativa se ofrece por el motor de bamboleo. El estator se construye de segmentos conductores aislados, que se energizan en secuencia y ejercen una fuerza de tracción (imagen) en un rotor aislado pero conductor (o dieléctrico). El par de torsión creado de esta manera causa que el rotor ruede hacia el siguiente segmento del estator. Ahora la fricción es benéfica, la superficie incluso puede ser ondulada o dentada, y se asegura el movimiento rotario. [Según S.C. Jacobsen y otros, *Proc. IEEE MEMS*, 1989(2):17-24.]

En un método completamente diferente, se usa la litografía para generar el negativo del patrón deseado en un material fotorresistente (normalmente PMMA) grueso (de un espesor de micrones a centímetros) depositado sobre una placa *conductora*. Después del revelado, el material resistente se rellena con metal por electrodeposición (esto es igual al proceso de damasquinado empleado para metalización, Secc. 20-3-4, excepto que los lechos en el material fotorresistente ahora se rellenan). Cuando el material resistente se elimina, la estructura metálica se puede usar como un molde permanente para el moldeo por inyección o por compresión de un plástico; esta parte plástica es un artículo de uso final o se puede usar en un proceso de molde perdido para el moldeo de cerámicos o para un segundo electroformado. Con la litografía por sincrotrón de rayos x, se pueden hacer rasgos tan pequeños como 0.1 mm con paredes lisas ($R_{máx}$ = 0.02 μm) verticales. Así la técnica se conoce como LIGA, del acrónimo alemán para *Lithographie* (litografía por rayos x), *Galvanoformung* (electrodeposición), y *Abformung* (moldeo).

Ejemplo 20-3

Los sensores y actuadores pueden convertir energía magnética en eléctrica. Un ejemplo primordial es la cabeza de lectura/escritura en los dispositivos de almacenamiento magnético (discos duros, etcétera) originalmente hechos como un imán en forma de herradura, embobinados con alambre aislado de cobre. La miniaturización fue posible gracias al desarrollo de una cabeza de película delgada.[6] Sobre un sustrato cerámico (al principio SiO_2, ahora Al_2O_3.TiC) se deposita un material magnéticamente suave (Ni-20Fe) para formar una horquilla con una separación peque-

[5] A.D. Romig, Sandia National Laboratories, Albuquerque, Nuevo México.

[6] L.T. Romankiw, I. Croll y M. Hatzakis, *IEEE Trans. Magn.*, **6**: 729 (1970).

ña para la lectura/escritura. El electroimán se energiza por una bobina de cobre en la cual se electrodepositan alambres relativamente gruesos (2-3 μm) a través de una mascarilla polimérica. Esta tecnología es la base de la microfabricación por electrodeposición y por LIGA. En los dispositivos más recientes, se usa una cabeza magnetorresistiva separada para la lectura de datos y la cabeza de película delgada sólo para grabar. Esto ha permitido un incremento tremendo en las densidades de área, de manera que los discos duros comerciales tienen capacidades medidas en gigabytes.[7] Cada año se hacen cientos de millones de cabezas.

Ejemplo 20-4

El ubicuo disco compacto CD (CD-ROM) es un ejemplo de la microfabricación. Combina técnicas de circuitos integrados y convencionales. El disco en sí es una pieza de plástico producida en masa. El patrón se crea por medio de técnicas de circuitos integrados sobre un sustrato de vidrio por medio de una secuencia de pasos:

El disco de vidrio (*a*) se pule hasta una rugosidad 10 nm R_a y una planicidad de 10 mm; (*b*) se limpia y seca; (*c*) se deposita un material fotorresistivo positivo y (*d*) se le hace el patrón con un rayo láser. [El patrón es en espiral con un paso de 1.6 μm. Los fosos de 0.5 μm de ancho y de nueve longitudes diferentes, entre 0.83 y 3.56 μm, portan la información. La profundidad es igual a un cuarto de la longitud de onda del láser usado para leer la información, de manera que hay reflexión total o extinción total (véase la Fig. 3-17). Cada cambio de nivel (*transición*) corresponde a 1 en el código binario; la distancia entre los cambios de nivel determina el número de ceros.] El material resistente (*e*) se revela, (*f*) el patrón maestro de vidrio (positivo) se inspecciona y (*g*) se recubre de plata para verificar la calidad. Luego (*h*) el patrón maestro de vidrio se recubre con una capa de Ni depositada por chisporroteo, que permite (*i*) el electroformado de hasta un espesor de 250-300 μm. Este patrón maestro de níquel (negativo, llamado *estampador*) se (*j*) pule en su parte posterior hasta 0.3 μm R_a, (*k*) se separa del patrón de vidrio y (*l*) después de remover el material resistente, está listo para (*m*) moldear los discos de plástico policarbonato (positivo), que luego (*n*) se recubren por medio de PVD con aluminio, debido a su reflectividad y (*o*) se protegen por un recubrimiento transparente de plástico.

El campo médico representa grandes oportunidades para la microfabricación. Se han producido instrumentos muy pequeños para cirugía de invasión mínima durante años, a un costo alto, por medio de técnicas convencionales; la microfabricación tiene la ventaja de producirlos baratos en masa. Un ejemplo es el endoscopio, un tubo dotado con una fibra de imágenes, fuente de luz y canal de trabajo a través del que se operan microherrammientas. Esas herramientas se pueden hacer por medio de la microfabricación. La punta del endoscopio se dobla con cables revestidos; éstos se pueden reemplazar por alambres de aleación con memoria de forma. La microfabricación también permite desarrollos para aplicaciones nuevas.

20-5-2 Nanotecnología

El término *nanotecnología* es un poco ambiguo. Algunas veces se aplica a los procesos capaces de hacer piezas con *tolerancias* expresadas en nanómetros (Secc. 16-9-2). Más

[7] P.C. Andricacos y N. Robertson, *IBM J. Res. Develop.* **42** (5): 671-680 (1998).

a menudo, se refiere a los procesos que hacen partes con *dimensiones* en el rango de submicrones. Algunas veces se hace una división adicional separando el rango entre 1 y 0-1 μm como el *dominio mesoscópico*. En nanorrango entonces se refiere a 10-100 nm. Esto corresponde a sólo 30-300 distancias interatómicas y de esta manera está en la escala molecular.

1. La *nanofabricación* produce partes *de arriba hacia abajo*, sobre todo por versiones a escala reducida de los procesos de circuitos integrados. Algunos productos producidos en masa ya se encuentran en el mercado.

Ejemplo 20-5

En el ejemplo 20-4 se vio que los discos compactos son dispositivos mecánicos en los que la información se embebe en la forma de pozos diminutos. Esta información se lee por láser y algunos son dispositivos que están dentro de la definición de nanoestructuras. La epitaxia de un haz molecular y la deposición química metalorgánica se usan para crear capas de sólo 100 nm de espesor; en éstas, los electrones se confinan y sólo emiten luz en longitudes de onda definidas. Esos *láser cuánticos de pozo* emiten luz a densidades de corriente mucho menores que los láser convencionales.

2. La *ingeniería molecular* es una aproximación *de abajo hacia arriba* que tiene como objetivo construir estructuras en la forma que lo hace la naturaleza. Aunque parece difícil de alcanzar, ya se han tenido algunos logros iniciales. Algunas medicinas funcionan por *autoensamble*: las moléculas de la droga caben en receptores en el cuerpo como una llave en una cerradura. La *autoorganización* de las moléculas resulta, por ejemplo, en cristales moleculares, como los polímeros de cristal líquido (Secc. 13-2-3). El ADN se hace a la medida por procesos de *autorreplicación*. Todas estas técnicas son candidatos potenciales para manufacturar no sólo reemplazos de productos naturales sino también para dispositivos, como computadoras, detectores y actuadores, actualmente hechos por medio de técnicas convencionales y microfabricación.

Ejemplo 20-6

En la sección 12-1-1 se vio que el carbono existe en una forma estable como diamante. Nos encontramos con otra forma estable hexagonal en la sección 12-4-6 como grafito, un lubricante sólido. En 1985 se descubrió una tercera forma: en la versión más conocida, 60 átomos producen esferas huecas perfectas, en una forma cristalina similar a las áreas de un balón de fútbol. La curvatura espacial en estos *buckminsterfullerenos* (o, coloquialmente, bolas de Bucky, en honor a Buckminster Fuller, inventor del domo geodésico) y moléculas mayores, no perfectamente redondas (colectivamente llamadas *fullerenos*), se obtiene combinando 12 pentágonos con $m = (n - 20)/2$ hexágonos, donde n es el número total de átomos de carbono en la molécula C_n. Los fullerenos se pueden hacer en gran cantidad vaporizando carbono en una atmósfera de helio, en arcos eléctricos, flamas y plasmas. Se han desarrollado técnicas para abrir el cristal y atrapar (enjaular) otros átomos o moléculas en ella. La composición se puede manipular por otros medios también, y se pueden hacer aislantes, conductores, semiconductores y superconductores.

Los nanotubos son estructuras relacionadas: una lámina hexagonal se dobla para formar un tubo y se cierra por extremos cónicos (muchos nanotubos consisten de varios tubos concéntricos). Estos tubos son potencialmente muy fuertes y, al atrapar otros átomos dentro, se pueden hacer alambres en nanoescala. La investigación intensa sin duda tendrá aplicaciones prácticas.

20-6 RESUMEN

Los dispositivos microelectrónicos son los agentes de la segunda Revolución Industrial. Controlan máquinas desde robots hasta hornos de microondas, desde motores automotrices hasta el aterrizaje de aeronaves; ayudan en la computación, desde calculadoras de mano hasta supercomputadoras; permiten la comunicación, desde teléfonos hasta satélites con dispositivos de fibras ópticas; colaboran para entretener y enseñar, desde el radio hasta la televisión y la instrucción asistida por computadora y son el corazón de CAD/CAM y CIM.

Los dispositivos microelectrónicos se basan sobre todo en los fenómenos eléctricos que ocurren en los materiales semiconductores, como Si inoculado y GaAs. Se forman circuitos analógicos y digitales por medio de métodos de producción en lote, en una configuración plana en la superficie de las obleas. Al disminuir el tamaño de los rasgos individuales, se pueden disponer circuitos integrados que contienen millones de componentes en un microcircuito único, cuyos lados tienen sólo algunos milímetros por lado. Los avances en el diseño y la manufactura han permitido un rendimiento elevado a costos muy reducidos, con una rapidez sin paralelo en otros campos de la manufactura.

La enorme complejidad de los circuitos, característica de VLSI y ULSI se controla con la ayuda de CAD. La densidad de los componentes exige que los rasgos se fabriquen con tamaños mínimos menores de 1 μm, y se debe desarrollar una gran cantidad de técnicas de manufactura, algunas a partir de las técnicas de laboratorio, otras por medio de procesos de manufactura de uso más común.

La operación de los dispositivos depende de la incorporación de átomos de impurezas (inoculación) en forma altamente controlada. Las impurezas no planeadas, los defectos de los cristales, el daño localizado al circuito o cristal inutilizan la operación. Por lo tanto, la manufactura se realiza en un entorno excepcionalmente limpio, con un alto grado de automatización, empleando técnicas que minimizan los eventos aleatorios. Como muchos de los químicos utilizados son tóxicos, los trabajadores necesitan protección; de la misma manera, los altos estándares de limpieza precisan la protección del producto del contacto humano. Si los trabajadores deben estar presentes, necesitan vestir trajes protectores.

Se necesita una secuencia compleja de pasos de manufactura para desarrollar dispositivos más complicados. La miniaturización depende del desarrollo y del control más estricto de técnicas litográficas y de las técnicas de deposición e implantación de película.

Algunas de las técnicas se pueden aplicar a la microfabricación, a la manufactura en lotes de dispositivos de tamaño menor de un micrón basada en principios mecánicos, electromecánicos y en otros. Cientos de millones de sensores se fabrican cada año y los

actuadores no se quedan muy atrás. Las fronteras de la investigación y de la producción se están extendiendo a productos a menor escala, por medio de varias técnicas de nanofabricación e ingeniería molecular.

PROBLEMAS

20-1 Explique cuál es la diferencia entre (*a*) silicio epitaxial y (*b*) polisilicio.

20-2 Proporcione el nombre de un proceso para la deposición de polisilicio.

20-3 (*a*) Defina el término inoculación en la manufactura de semiconductores y (*b*) nombre al menos dos procesos para realizarlo.

20-4 (*a*) Defina el término metalización y (*b*) proporcione dos procesos para realizarla.

20-5 Describa los pasos básicos necesarios para la creación del patrón de metalización en una oblea de Si.

20-6 Describa los pasos básicos para producir una mascarilla de vidrio para fotolitografía.

20-7 Realice bocetos para mostrar los resultados del (*a*) ataque químico húmedo y del (*b*) ataque químico seco. (*c*) Defina ataque químico iónico reactivo y explique por qué es adecuado para hacer lechos profundos.

20-8 Haga un boceto para mostrar la diferencia entre técnicas para montaje (*a*) a través del agujero y (*b*) en la superficie para montar microcircuitos en una placa.

20-9 Defina MEMS.

20-10 Defina los procesos (*a*) de arriba hacia abajo y (*b*) de abajo hacia arriba para fabricar un sistema micromecánico.

20-11 Sugiera la secuencia de procesamiento para producir un engrane de Si en miniatura.

20-12 Sugiera una secuencia de procesamiento para fabricar un molde de metal en miniatura para el moldeo de plástico de una pieza definida por una generatriz recta (similar a una pieza producida al troquelar una lámina, pero de forma compleja y dimensiones micrométricas.

LECTURAS ADICIONALES

Dispositivos semiconductores

Electronic Materials Handbook, vol. 1, *Packaging*, ASM International, 1989.

Chang, C.Y. y S.M. Sze (eds.): *ULSI Technology*, McGraw-Hill, 1996.

Doane, D.A. y P.D. Franzon (eds.): *Multichip Module Technologies and Alternatives*, Van Nostrand Reinhold, 1993.

Lee, T.W. (ed.): *Microelectronic Failure Analysis Desk Reference*, 3a. ed., ASM International, 1993.

Mahajan, S.: *Principles of Growth and Processing of Semiconductors*, McGraw-Hill, 1999.

Murarka, S.P.: *Metallization: Theory and Practice for VLSI and ULSI*, Butterworth-Heinemann, 1993.

Rao, G.K.: *Multilevel Interconnect Technology*, McGraw-Hill, 1993.

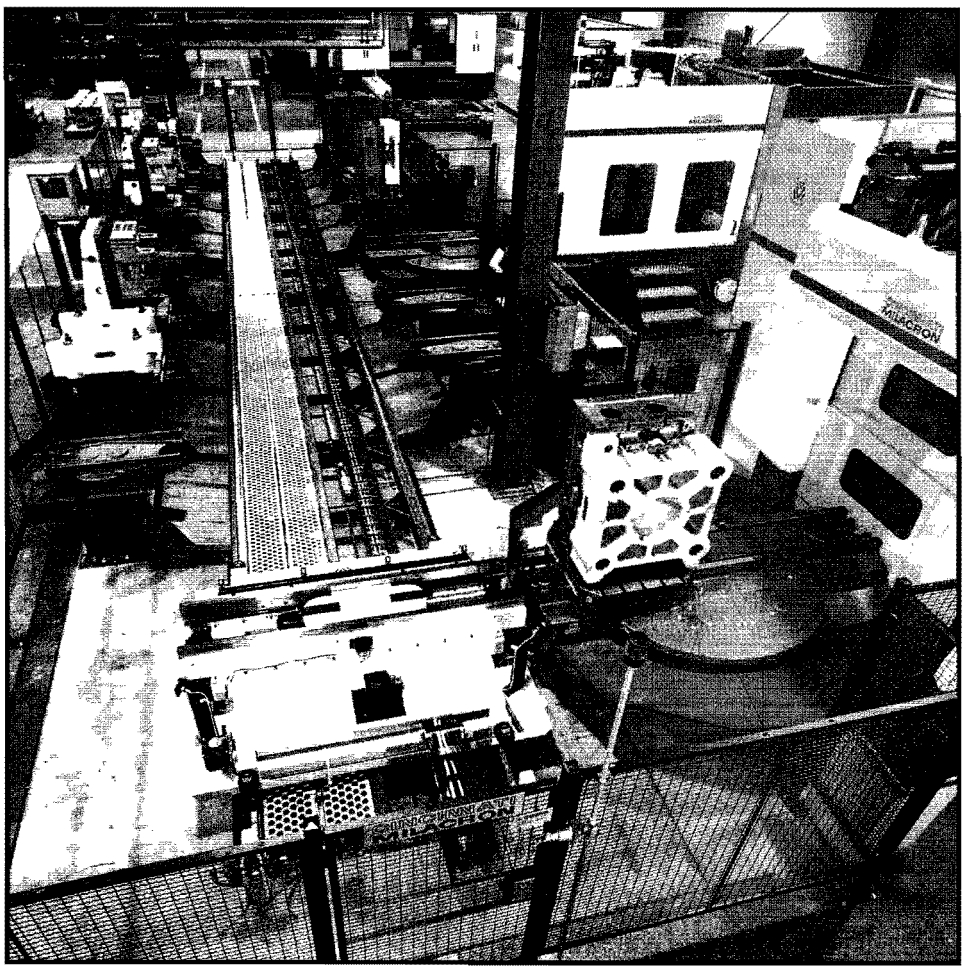
Shepherd, P.R.: *Integrated Circuit Design, Fabrication and Test*, McGraw-Hill, 1996.

Sze., S.M. (ed.): *VLSI Technology*, 2a. ed., McGraw-Hill, 1988.

Tummala, R.R. y E.J. Rymaszewski (eds.): *Microelectronics Packaging Handbook*, Van Nostrand Reinhold, 1989.
Yang, E.S.: *Microelectronic Devices*, McGraw-Hill, 1988.
Zorich, R.: *Handbook of Quality Integrated Circuit Manufacturing*, Academic Press, 1991.

Micro y nanotecnología

Andonovic, I. y D. Uttamchandani (eds.): *Principles of Modern Optical Systems*, Artech House, 1989.
Bouwhuis, G. *et al.*: *Principles of Optical Disk Systems*, Adam Hilger, 1986.
Crandall, B.C. y J. Lewis (eds.): *Nanotechnology*, MIT Press, 1996.
Dresselhaus, M.S., G. Dresselhaus y P.C. Eklund: *Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes*, Academic Press, Nueva York, 1996.
Drexel, K.E.: *Nanosystems*, Wiley, 1992.
Fatikow, S. y U. Rembold: *Microsystem Technology and Microrobotics*, Springer, 1997.
Fujimasa, I.: *Micromachines*, Oxford University Press, 1996.
Kovacs, G.T.A.: *Micromachined Transducers Sourcebook*, McGraw-Hill, 1998.
Madou, M.: *Fundamentals of Microfabrication*, CRC Press, 1997.
Nicolini, C. (ed.): *Molecular Manufacturing*, Plenum, 1996.
Regis, E.: *Nano: The Emerging Science of Nanotechnology*, Little, Brown, 1995.
Taniguchi, N. (ed.): *Nanotechnology*, Oxford University Press, 1996.
Trimmer, W.S. (ed.): *Micromechanics and MEMS: Classic and Seminal Papers to 1990*, IEEE Press, 1997.
Vaidya, R., G. Lopez y J.A. Lopez: *Nanotechnology*, en *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 4a. ed., Suppl., Wiley, 1998, pp. 397-437.



Dos centros horizontales de maquinado CNC, cada uno con su propio cambiador automático de pieza de trabajo (a la derecha); están ligados en una celda automatizada de plataforma en la que un vehículo guiado en rieles (en primer plano) transporta plataformas hacia y desde las máquinas, y hacia estaciones de carga/descarga fuera de línea. Un controlador de celda rastrea todas las actividades. (*Cortesía de Cincinnati Milacron, Cincinnati, Ohio.*)

capítulo

21

Sistemas de manufactura

Los procesos individuales de producción deben organizarse para formar un sistema funcional de manufactura. Analizaremos:

El movimiento de material, incluyendo robots

La organización para la producción en lote y en masa

La aplicación de la tecnología de grupo a las células flexibles de manufactura

La mecanización y automatización del ensamble

El tema fundamental de la administración de la calidad

El control estadístico del proceso

La función de la ingeniería de manufactura en la organización de una compañía

En la sección 2-1 se perfilaron las actividades principales involucradas en la totalidad de la manufactura, y en los capítulos del 6 al 20 se investigaron los principios relacionados con los procesos individuales. Con este conocimiento, es posible proceder a explorar los elementos de algunas características tecnológicas y organizacionales vitales de los sistemas de manufactura, incluyendo el movimiento del material dentro de una planta, la organización de las instalaciones de producción para la fabricación en masa y en lote, el aseguramiento de la calidad y la administración de la manufactura.

21-1 MOVIMIENTO DE MATERIALES

El movimiento de materiales, piezas y herramientas es un elemento esencial en todas las operaciones de manufactura, que abarca la producción de piezas y su ensamble en subensambles o productos terminados. Los estudios de las operaciones de lote en el taller han demostrado que, durante el 95% del tiempo total de producción, las piezas se transportan de un lugar a otro o sólo están esperando que algo suceda. Incluso del 5% del tiempo que pasan en una máquina herramienta, en realidad las partes se trabajan

sólo 30% de ese lapso, mientras que el tiempo restante se absorbe en la carga y descarga, posicionamiento, calibrado, o están en espera por alguna otra causa (Fig. 21-1). Si se va a incrementar la producción, primero se deben mejorar los métodos de movimiento, carga, posicionamiento, sujeción y descarga del material, y sólo entonces tendrá sentido preocuparse por la aceleración del proceso mismo. Por lo contrario, si el tiempo en el proceso es ya prolongado, existen pocos estímulos para mejorar el movimiento del material. Hay varias formas para mover materiales.

21-1-1 Movimiento manual del material

Los *operadores* pueden mover objetos con el mínimo gasto de capital, pero esta técnica suele ser la menos eficiente y la más costosa. La eficiencia se puede incrementar cargando piezas pequeñas en canastas, pero tiene la desventaja de que las piezas deben manejarse para la siguiente operación. Las piezas se pueden disponer en tarimas (plataformas o charolas) y, si se desea, se orientan de manera que se hagan más accesibles para la operación subsecuente; esta práctica se está difundiendo debido a que también protege las piezas del daño accidental.

Los *montacargas* facilitan el movimiento de material y mantienen la flexibilidad, pero necesitan pasillos sin obstrucción. Las *grúas* también aseguran flexibilidad y no necesitan espacio en el piso pero pueden interferir una guía con otra.

21-1-2 Movimiento mecanizado de materiales

El término *movimiento de materiales* normalmente se refiere a la transportación entre unidades de producción.

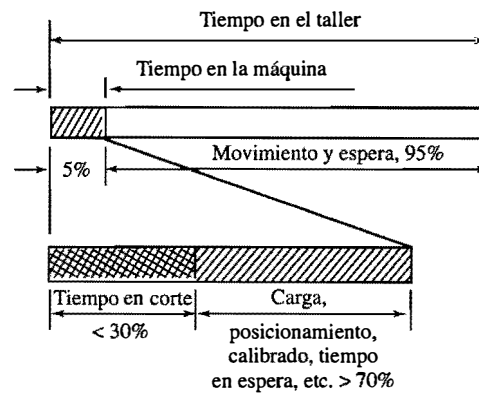


Figura 21-1 En la producción en lote, la pieza de trabajo promedio en realidad se trabaja sólo una pequeña fracción del tiempo total que pasa en el taller. (*Según C.F. Carter, en Proc. 2a. Int. Conf. On Product Development and Manufacturing Technology, pp. 125-141, MacDonald, London, 1972. Con permiso.*)

1. Transportadores de rodillos, bandas sinfín, carruseles, transportadoras elevadas, carros remolque (movidos por cadenas debajo del piso) y dispositivos similares pueden ser muy eficientes para mover piezas y tarimas, pero sólo se pueden reorganizar cambiando la disposición física del sistema.

2. El transporte flexible se asegura con *vehículos guiados automáticamente* (AGV). El vehículo se mueve, como los montacargas, sobre el piso de la fábrica, pero sigue cualquiera de varias trayectorias; por ejemplo: una guía inductiva proporcionada por guías de alambre (cable) embebidas en el piso. Las trayectorias de los vehículos individuales se pueden programar y reprogramar fácilmente para enfrentar cambios en los requerimientos de la producción, evitando choques mientras se optimiza la trayectoria de cada vehículo. Los detectores detienen los vehículos cuando encuentran un obstáculo. En un desarrollo adicional, los vehículos se equipan con detectores y programas interactivos que les permiten encontrar su propio camino.

El movimiento de material desde y hacia las máquinas herramienta a menudo requiere que la pieza se voltee, oriente, sujete y coloque en una posición predeterminada. La operación manual es la más flexible, pero también es más propensa al error por la fatiga del operador, especialmente si la tarea es repetitiva o implica el movimiento de piezas muy pequeñas o muy grandes (y pesadas). El calor, el humo, los gases o las partículas pueden hacer el entorno desagradable o poco saludable. Por lo tanto, hay poderosos incentivos para mecanizar y automatizar la carga y descarga de las partes. La automatización simple y de costo relativamente bajo se ha empleado desde hace tiempo.

1. Los *dispositivos puramente mecánicos* de grados variables de complejidad son, en general, altamente eficientes pero inflexibles. Pueden combinar el movimiento del material con la carga y descarga de máquinas. Ya se vieron ejemplos del transporte mecanizado entre las etapas sucesivas de máquinas herramientas progresivas, como cabeceadoras en frío, prensas de transferencia y máquinas automáticas de tornillos. Se puede añadir la instrumentación para proporcionar una retroalimentación sencilla, por ejemplo la presencia o ausencia de la pieza.

2. Las piezas se pueden *colocar en la tarima* en forma individual. La alineación en la máquina herramienta se obtiene de modo automático si: la tarima se hace con la precisión de un posicionador, la parte se mantiene (sujeta) en la posición exacta (a menudo con la ayuda de agujeros de localizadores) y la tarima se localiza exactamente (con la ayuda de pasadores de localización) en la cama de la máquina herramienta. El costo de las tarimas se reduce con el uso de *posicionadores modulares* construidos sobre placas de base de precisión.

3. Las piezas pequeñas con frecuencia se manejan con eficacia mediante dispositivos mecánicos sencillos. Las bandas y tazones vibratorios, las horquillas oscilantes, los discos rotarios o los dispositivos magnéticos se combinan con dispositivos sencillos pero ingeniosos para la orientación de la pieza de trabajo; a partir de ahí las piezas avanzan a través de vías de alimentación a la máquina herramienta, donde un dispositivo de medición (como un escape que funciona mecánica o electrónicamente) libera la pieza en el tiempo apropiado.

4. La carga y la descarga a menudo se realizan con brazos mecánicos, a los que generalmente se les denomina *manipuladores*. Se dividen en varios subgrupos. La clasificación se lleva a cabo por medio del método de control:

a. Los *manipuladores*, en el sentido más estricto del término, son brazos mecánicos bajo control manual, con la ayuda de botones de opresión, palancas universales de mando o dispositivos que transforman los movimientos de la mano del operador en movimientos equivalentes del brazo mecánico. Su capacidad de levantamiento varía de algunos gramos a cientos de toneladas. Algunos ejemplos son los *manipuladores remotos* empleados en ambientes peligrosos (como la industria atómica) y los *manipuladores de forja*, usados en la forja en matriz abierta de grandes lingotes. En este sentido, la programación es totalmente flexible en respuesta a los comandos del operador.

b. Los *manipuladores de secuencia fija* avanzan a posiciones predeterminadas en una secuencia establecida. La posición y la secuencia las fijan interruptores de posición, detectores de proximidad, interruptores ópticos y relevadores. Los interruptores de posición se usan también para detectar si una acción —del manipulador o de la máquina que le sirve— en efecto se ha realizado, proporcionando de esta manera una versión primitiva de retroalimentación. Ejemplos usuales son los manipuladores que mueven piezas de lámina metálica entre prensas, y transportadores de descarga usados con máquinas de fundición en matriz y en el moldeo por inyección.

c. El *Robot Institute of America* define a los robots como "manipuladores de funciones múltiples programables diseñados para mover material, partes, herramientas o dispositivos especializados mediante movimientos variables, que están programados para la realización de una variedad de tareas". Así que se distinguen de los manipuladores de secuencia fija sólo en su programación variable. Los denominados *robots de toma y coloca* son reprogramables, por ejemplo con un controlador lógico programable (PLC) o con una computadora personal (PC), pero no suelen tener un sistema de retroalimentación, así que se pueden clasificar como manipuladores programables de secuencia fija.

21-1-3 Robots

Los *dispositivos robóticos* consisten de dos elementos:

1. Una *estructura mecánica* que incluye:

a. Una *base* con partes móviles, articulada en tal forma que se logran uno o más (a menudo hasta seis) grados de libertad. Muchos dispositivos incluyen transportadores sencillos que se mueven a lo largo de varillas guía; cada transportador tiene un grado de libertad. En su forma más familiar, el robot tiene un brazo que puede estar articulado en varias formas (Fig. 21-2). Un brazo rígido que se mueve hacia arriba y hacia abajo y gira alrededor de una columna que tiene dos grados de libertad. Un brazo que se mueve (o inclina) hacia arriba y hacia abajo, gira (pivote), se mueve radialmente dentro y fuera, y tiene una muñeca con giro (pivote) y se dobla (inclina) con movimientos oscilatorios, posee seis grados de libertad.

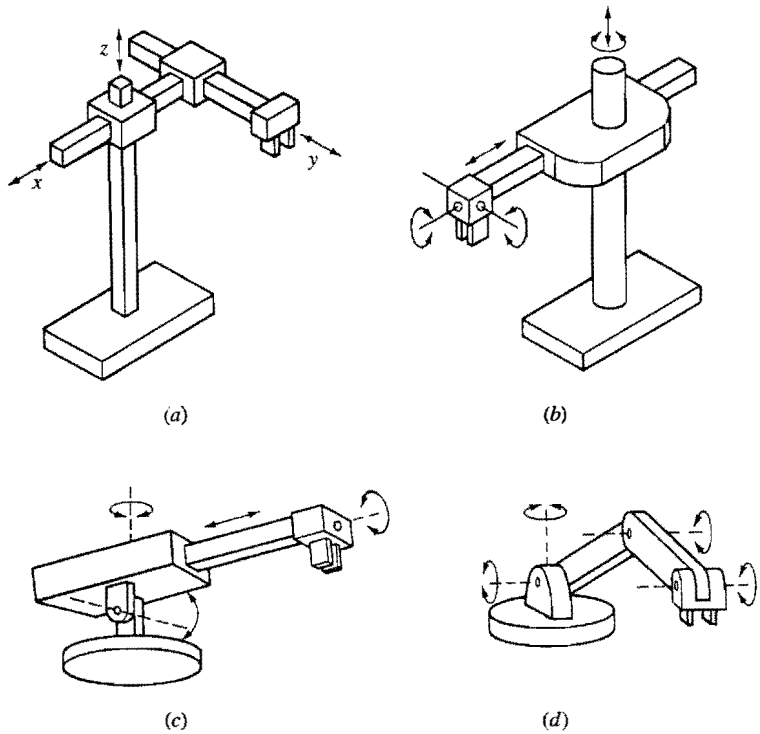


Figura 21-2 La movilidad de los robots depende de juntas prismáticas (P) y revolutas (R). Su combinación da configuraciones (*a*) cartesianas (PPP), (*b*) cilíndricas (RPP), (c) polares (RRP) y (*d*) revolutas (RRR), también llamadas articuladas. (*Según L.L. Toepperwein et al., Technical Report AFWAL-TR-80-4042, Air Force Wright Aeronautical Laboratories, Dayton, Ohio.*)

b. El *sujetador* (*mano, quijada* o, de manera más general, el *dispositivo sujetador de la pieza de trabajo* o *efecto final*) que sostiene y mueve la parte o herramienta.

c. *Elementos de impulso* que proporcionan la potencia motriz para los distintos movimientos. Los impulsores suelen ser neumáticos, hidráulicos o eléctricos, y algunas veces combinaciones de ellos. Los dispositivos mecánicos como levas, palancas y articulaciones se encuentran con menor frecuencia debido a su relativa inflexibilidad de programación. Los cilindros neumáticos, o con mayor frecuencia los hidráulicos o tornillos de bola accionados por servomotores y que están colocados en guías de precisión, generan movimiento lineal. Los motores neumáticos, los hidráulicos, los motores de pasos o los servomotores ca o cd proporcionan la rotación.

d. La mayor parte de los robots están *fijos* al piso, pero hay algunos que se mueven sobre el suelo, sobre rieles elevados o en llantas neumáticas (*robots móviles*).

Se debe notar que un robot puede mover una pieza con relación al herramental, o viceversa (ambas versiones se emplean, por ejemplo, en pintura).

2. *Sistema de control.* Los robots verdaderos se accionan con servomecanismos que incorporan un control de lazo cerrado (como en la Fig. 2-3*c*). Los sensores miden desplazamientos y alimentan una señal de regreso al controlador, de manera que el sujetador se coloca con exactitud, comúnmente dentro de 1.0 mm o mejor. En sus formas más sencillas, los robots se mueven de un punto a otro sin seguir una trayectoria definida. Los robots de trayectoria continua siguen un camino definido, así que se pueden usar para operaciones como la pintura por aspersión y la soldadura de arco. Los robots se utilizan en una gran variedad de aplicaciones, incluyendo la carga de máquinas herramienta y prensas, inspección y ensamble.

Los robots se programan en varias formas:

Los *robots de reproducción* pueden ser programados o "enseñados" usando el método de "paseo", en el cual un brazo robot (o un "brazo de entrenamiento" sustituto) se mueve manualmente a través de la trayectoria requerida, con comandos de control insertados cuando se necesite una acción particular (encender o apagar una herramienta, o esperar que una máquina herramienta realice una acción dada). En el método de "conducción" se utiliza un tablero de control ("dispositivo colgante de enseñanza") para posicionar el brazo. De cualquier forma, el controlador almacena las instrucciones así recibidas y las ejecuta, pero sin las interrupciones, retrasos y titubeos típicos del control manual.

Otros robots se programan de la misma manera que las máquinas herramienta CNC (Secc. 2-5-3). En la forma más avanzada, la base de datos establecida en el CAD/CAM se usa para preprogramar todos los movimientos y acciones del robot. Se pueden almacenar varios programas e invocarlos cuando está presente la pieza apropiada. La identificación de la pieza se proporciona mediante una estación de trabajo previa o al leer códigos de barra (similares a los que se emplean en los supermercados) aplicados a la pieza o tarima.

Un *robot inteligente* o *robot de detección* es un robot CNC equipado con una forma de inteligencia artificial, que le permite hacer frente a situaciones no fijas (piezas orientadas de manera aleatoria, piezas no presentadas en posiciones exactas) y realizar el control adaptivo de las operaciones. Algunas formas de detección ya están ampliamente disponibles:

1. La *detección visual* requiere cámaras que suelen contener elementos CCD sensibles a la luz (elementos de cuadro o pixeles). Éstos se exploran rápidamente para adquirir información sobre la distribución de las intensidades de luz. Dicha información, cuando se convierte en la forma digital requerida, se puede procesar en una computadora para el reconocimiento de la imagen (*procesamiento de la imagen*). Las tareas más complejas exigen el procesamiento de imágenes obtenidas en forma simultánea por medio de varias cámaras.

2. La *detección táctil*, en la forma más sencilla, requiere elementos de detección de fuerza construidos en el efector final. Hay muchas posibilidades para tener una retroalimentación adicional. Por ejemplo, la luz infrarroja puede conducirse a través de cables de fibra óptica en las quijadas del efector final; cuando las quijadas llegan lo suficiente cerca de la pieza para que la luz se refleje, el movimiento de la quijada se aminora y la pieza se sujeta con una fuerza prefija. Los sistemas que se aproximan más a los sentidos humanos están desarrollados continuamente.

3. El *control adaptivo* enlaza las acciones del robot con la información obtenida por los detectores. Entre otros, están implicados elementos de detección de fuerza y de par de torsión en el control adaptivo. Por ejemplo, un robot de eliminación de rebabas se puede mover a lo largo del borde de una pieza a una gran velocidad, mientras busca una rebaba. El incremento de la deflexión de la herramienta (aumento de la fuerza en el posicionador de la herramienta) indica la presencia de una rebaba, después de lo cual la rapidez de avance se reduce hasta que la rebaba se elimina. En forma similar, en una operación de pulido se puede mantener la presión correcta de pulido, sin importar la forma de la pieza, por medio de la retroalimentación de un detector de fuerza.

Aunque los robots a menudo se introducen en una planta existente, es muy probable que requieran algunos cambios. El robot es menos tolerante a las variaciones de forma y dimensiones de las piezas, en comparación con un operador humano, y con frecuencia es redituable volver a diseñar las piezas para adecuarse a las limitaciones del robot. Sin embargo, los robots pueden realizar tareas sin cansarse y, si se protegen y se mantienen adecuadamente, lo hacen de modo confiable, aún en los entornos hostiles, peligrosos o desagradables.

21-2 ORGANIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

En la sección 2-1 se vio que los problemas de manufactura se analizan mejor como un sistema. Dentro de éste, la producción de la pieza se organiza para la máxima eficiencia y el mínimo costo y que sea consistente con los estándares requeridos de calidad. No hay una forma única de organización que satisfaga todos los requisitos, así que la elección depende de las características de la producción.

21-2-1 Características de la producción

Dos factores importantes en la elección del proceso y su organización son el *número total* de piezas que se van a producir y la *tasa de producción* (es decir, el número de unidades producidas en una hora, un día, un mes o un año). La cantidad total y la tasa de producción definen el desembolso justificable en maquinaria y herramientas especiales.

La cantidad total de la producción a menudo es insuficiente para mantener una unidad de producción continuamente ocupada, de modo que la producción se hace en lotes que representan una fracción del número total de partes. El *tamaño de lote* es el número de unidades producidas en una corrida ininterrumpida. No hay definiciones estrictas, pero se acostumbra hablar de *producción de lotes pequeños* (1-100 unidades), *de lote* (más de 100) y *en masa* (más de 100 000 o incluso un millón de unidades). En general, un mayor tamaño de lote justifica la elección de los procesos con una tasa de producción inherentemente mayor, pues significa ahorros más favorables.

El tamaño de lote no se determina sólo por consideraciones técnicas. El costo de la instalación (cambio) se debe sopesar contra el costo de almacenar (trabajo de bodega)

piezas entre las corridas de producción. El cambio a la entrega *justo a tiempo* reduce los tamaños de los lotes, lo cual resulta no sólo en menor costo de almacenamiento sino también en requerimientos menores de espacio de piso.

Al evaluar el número de piezas producidas y la tasa de producción, es mejor considerar todas las piezas que presentan cualquier similitud en características y secuencias de operación (Secc. 3-1-2). Las grandes similitudes pueden permitir el agrupamiento de piezas para su procesamiento por medio de técnicas más productivas; la ausencia de similitudes requerirá mayor flexibilidad de la operación.

21-2-2 Método óptimo de manufactura

El *proceso óptimo de manufactura* se selecciona a través del conocimiento de las capacidades y limitaciones del proceso y está condicionado por las restricciones impuestas por la tasa de producción y por los tamaños de los lotes. La elección de la máquina herramienta depende de los factores de costo, aunque se pueden elaborar gráficas de rentabilidad (similar a la Fig. 21-3) para mostrar dónde es más rentable una máquina herramienta en composición con otra.

1. Las máquinas aisladas con control manual requieren menor desembolso de capital, pero su operación es de mano de obra intensa. Los costos de mano de obra no disminuyen mucho con el incremento del tamaño de lote (Fig. 21-3); de esta manera, esas máquinas están mejor adecuadas para la producción de una pieza y de lotes pequeños. El operador puede ser un artesano muy hábil, o en la producción repetitiva, puede

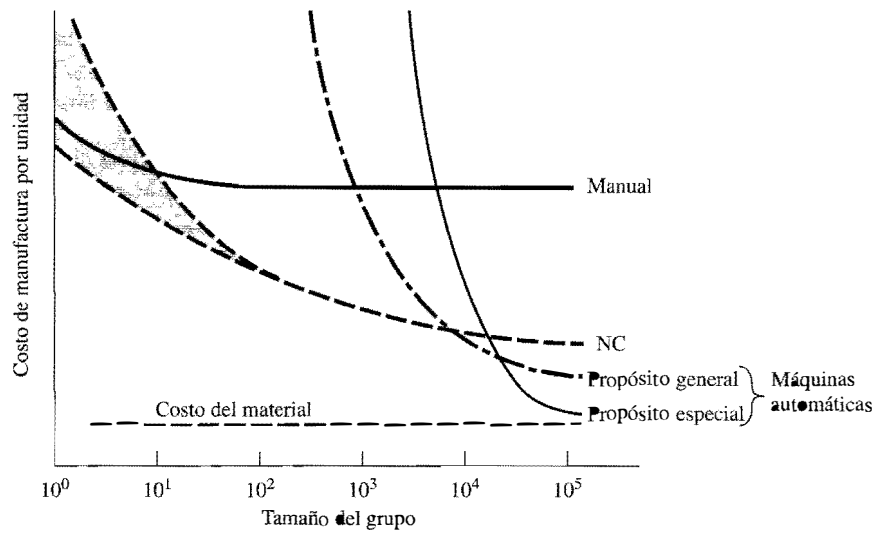


Figura 21-3 La metodología más económica para la producción depende del tamaño del grupo.

ser una persona que cumpla con los requistos necesarios por la puesta a punto de la máquina.

2. Las máquinas NC o CNC aisladas, elegidas correctamente, son más adecuadas para la producción de lotes pequeños, aunque con la tendencia creciente hacia los dispositivos de programación de uso amigable, y con la aplicación de la tecnología de grupo, se vuelven competitivas en comparación con la maquinaria operada manualmente. Una vez que la pieza de trabajo está sujeta en su lugar en la mesa de la máquina herramienta CNC, y que se establece un punto de referencia, el maquinado, doblado, soldado, cortado, etcétera, se hacen con gran precisión y capacidad de repetición. El tiempo de instalación no productivo es casi nulo; por lo tanto, el CNC puede ser económico incluso para lotes muy pequeños (Fig. 21-3) ampliamente separados en tiempo. El operador de nuevo puede ser muy hábil, esta vez con algún conocimiento de programación; un programador puede suministrar programas a la máquina para que trabaje a partir de la base de datos de un sistema CAD/CAM; en este caso el operador realiza la supervisión de la máquina y las funciones de servicio, como la carga de las tarimas.

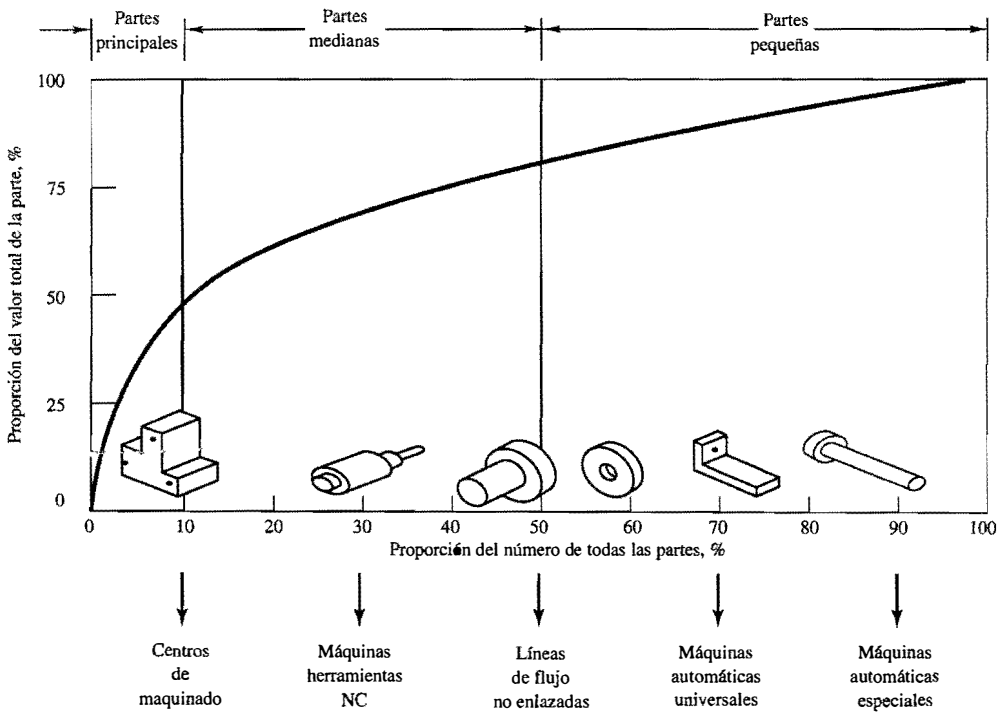


Figura 21-4 En gran medida, el valor total agregado se origina en la manufactura por lote de piezas principales complejas, en tanto que las piezas de tamaño menor se producen en masa. [*H. Opitz y H.P. Windahl, Int. J. Prod. Res.* **9**: *181-203 (1971). Se publica con autorización.*]

3. En la producción de lotes grandes las máquinas automáticas programables son las más económicas, en tanto que las automáticas de propósito especial (y a menudo de programación fija) están limitadas a la producción en masa de piezas estándares.

Los automóviles, los artículos electrodomésticos y los productos de consumo suelen clasificarse en la categoría de lote grande y se producen en forma relativamente eficiente con los métodos tradicionales. Sin embargo, ha habido un cambio marcado hacia la fabricación a la medida de muchos productos, y esto ha forzado a tener mayor flexibilidad en la producción en masa. Las máquinas herramientas, el equipo todo terreno y para ferrocarriles, la maquinaria pesada y las aeronaves suelen pertenecer a las categorías de producción en lote. Los productos de las industrias mencionadas se caracterizan por grandes desembolsos para los principales componentes con forma compleja, y un desembolso relativamente pequeño en los componentes mucho más numerosos, producidos en masa y a menudo comprados (Fig. 21-4). Desde luego, se asegura un máximo ahorro organizando la producción efectiva de las piezas principales complejas. La organización de la manufactura por lo general ha seguido diferentes filosofías para la producción en masa y para la de lote, pero las diferencias disminuyen poco a poco.

21-2-3 Organización para la producción en masa

Los grandes tamaños de lote usuales de la producción en masa economizan la instalación de máquinas de propósito especial. Cuando las piezas son de formas idénticas y sencillas, se sujetan fácilmente en la posición correcta respecto a la herramienta. Las piezas de forma irregular se trabajan después de establecer una superficie, un agujero o una saliente de referencia (*calificar la pieza*), por ejemplo, por medio del maquinado de alta velocidad. La pieza se sujeta a una base, plataforma, soporte, o se mueve por sí misma de una máquina herramienta a otra.

1. En las *líneas de transferencia* las piezas se mueven por medios fijos (como bandas transportadoras, carruseles, brazos mecánicos) entre máquinas herramientas organizadas en la secuencia de operaciones. Cada máquina realiza sólo una operación (o un grupo relacionado de operaciones) y se controla mediante una automatización fija (levas, palancas o relevadores). La instalación es manual, tardada y requiere una persona muy hábil para la puesta a punto. Los cambios al producto no se pueden hacer sin tener que reconstruir de manera sustancial la línea de producción.

Las líneas se deben balancear con cuidado para sincronizar la salida de las distintas etapas; de otra manera, la estación más tardada haría más lenta a toda la línea. Las condiciones de las herramientas y del proceso se seleccionan de manera que todas ellas se puedan cambiar al mismo tiempo, evitando paros costosos y aleatorios. Los detectores, cabezas de calibración y sondas se incorporan a la línea en lugares apropiados para confirmar que una operación ha ocurrido en efecto, y para asegurar que se puede proceder con la operación siguiente. En caso de una dificultad, se realizan varias acciones: unas luces o alarmas alertan a los operadores de la línea; las piezas defectuosas se

marcan en forma automática con pintura o tinta, la línea disminuye su velocidad, se detiene por completo.

Las líneas fijas de producción son de muy alta productividad pero virtualmente sin flexibilidad. Debido a esto, el material de entrada y los inventarios en proceso también deben ser grandes para proporcionar un *respaldo* contra perturbaciones inesperadas.

2. Las *líneas de transferencia flexibles* se han desarrollado en respuesta al incremento de la competencia global, a las demandas rápidamente cambiantes de los clientes y al alto costo del dinero. Las instalaciones para la producción en masa se han hecho más flexibles a través de varios métodos, solos o en combinación:

a. La línea de producción se agrupa en *secciones* de 5 a 12 estaciones, con un respaldo intermedio de almacenamiento más pequeño, de manera que la descompostura, el cambio de la herramienta o el ajuste en un grupo no detenga toda la línea.

b. Las operaciones que pueden perturbar el balance de la línea se realizan en las *líneas ramales*.

c. Las máquinas herramienta fijas se sustituyen por *unidades de producción con cabezal de potencia*, que consisten en una base con un mecanismo de alimentación, una unidad de impulso (husillo de potencia) y varios accesorios intercambiables, de manera que se pueden realizar varias operaciones (perforado, roscado interior, torneado, fresado, etcétera) de acuerdo con las necesidades. Estas unidades son ejemplos de equipo *modular* (algunas veces también llamado *metamórfico*). En ocasiones incluso se incorporan centros de maquinado CNC.

d. Los *portaherramientas de cambio rápido* permiten el cambio rápido de la herramienta o el cambio del portaherramienta completo con una herramienta prefija.

e. Las piezas que pertenecen a la misma familia y sólo difieren en presencia o ausencia de alguna característica (como un agujero) se procesan en la misma línea si las piezas se identifican al ingresar a ella (por ejemplo, mediante una saliente proporcionada para su detección o un código de barras en la parte o tarima); y luego se activa o desactiva la estación apropiada.

Tales líneas de transferencia flexibles se operan mediante control lógico, lo cual aumenta su flexibilidad por la facilidad de la reprogramación.

Ejemplo 21-1

A fin de producir una familia de cajas de transmisión para los automóviles LH de la Chrysler, las fundiciones de aluminio se maquinan a una tasa 200/h en una línea de transferencia flexible. Las zonas de localización se fresan y se taladran agujeros en las fundiciones en bruto para que se puedan transferir en accesorios mediante tarimas de precisión. Para evitar la distorsión de las fundiciones de pared delgada, éstas se sujetan con llaves servocontroladas, en vez de abrazaderas hidráulicas. Además de varias operaciones de fresado, se taladran numerosos agujeros en patrones correspondientes a los distintos motores. Las estrías se maquinan con tolerancias estrictas y los agujeros de la flecha se perforan en ángulo recto. Los detectores de profundidad tienen controles de retroalimentación y la temperatura se controla con mucha precisión para mantener las tolerancias. (Fuente: *Manufacturing Engineering*, 1994 (4): 73-78.)

21-2-4 Organización de la producción en lotes

La producción en lotes difiere de la producción en masa no sólo en el tamaño del grupo, sino también en la velocidad de la respuesta a las exigencias cambiantes. El máximo exponente de la producción en lote era el trabajo en taller que obtenía ganancias al proporcionar servicio a un gran número de clientes; los avances recientes han dotado a las instalaciones de producción con la misma flexibilidad.

Disposición funcional La producción por lote tradicionalmente se ha hecho en talleres organizados alrededor de máquinas herramienta individuales. Las piezas se mueven por medios flexibles (manualmente, por bandas transportadoras elevadas, grúas, montacargas) de máquina en máquina. Esto provoca un movimiento de material complejo y con frecuencia desorganizado y tardado.

La clasificación de las máquinas herramientas de un tipo en grupos (*disposición funcional*) difícilmente mejora la situación, ya que las piezas se fabrican en secuencias de producción diferentes (Fig. 21-5*a*) y el movimiento del material es caótico.

La administración de una planta como ésa también es muy exigente. Cada máquina está manejada por un operador; los planes de producción deben asegurar la utilización completa del tiempo del operador y de la máquina; mientras que a la par se asegura que las piezas se fabriquen en el número correcto para la entrega programada. Esto suele ser imposible. Las frecuentes puestas a punto de la maquinaria ocuparían la mayoría del tiempo de producción; por lo tanto, el tamaño de los lotes aumenta cuando es posible, aun a costa de incrementar el inventario en proceso. Sin embargo, así se eleva el tiempo de procesamiento y se reduce la habilidad de la planta para responder a las necesidades cambiantes de los clientes.

Tecnología de grupo Muchos problemas se resuelven si las piezas que se fabricarán se clasifican de acuerdo con los principios de la *tecnología de grupo* (GT, Secc. 3-1-2). El potencial de la tecnología de grupo se puede explotar completamente sólo si se analiza el flujo de la producción y si la planta se reorganiza. Todo el equipo necesario para producir una familia de partes se agrupa en una *celda*. En una planta más moderna, una celda puede incluir, por ejemplo, una máquina compleja (y costosa), como un centro CNC de maquinado apoyado por varias máquinas de propósito especial; en consecuencia, se logra un menor costo.

Las piezas se transfieren con un mínimo de movimientos y de tiempo de una unidad a la otra. Para tamaños mayores de lote, las máquinas se disponen a lo largo de una línea (o en forma de U o L) en la secuencia de operaciones (Fig. 21-5*b*), creando una transición entre las celdas y líneas de transferencia de construcción modular.

Por lo general, esas celdas aún necesitan operadores, pero uno de ellos puede manejar varias máquinas. De esta manera, la productividad se eleva mientras que la tarea del operador se vuelve mucho más variada e interesante.

Hay múltiples beneficios, muchos de los cuales emanan directamente de la aplicación de los principios de la tecnología de grupo:

1. La variedad y cantidad del material de inicio, así como el inventario en el proceso, se reducen.

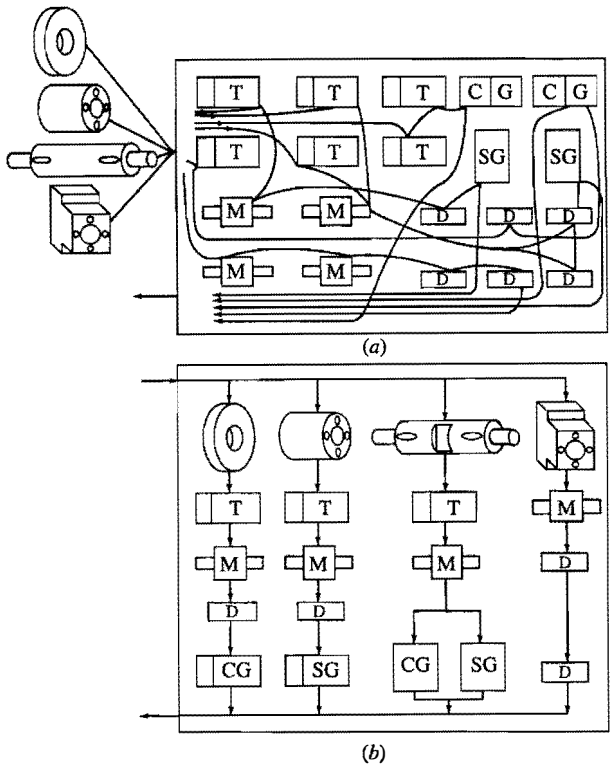


Figura 21-5 Comparación del flujo de material en plantas con distribución (a) funcional y (b) en grupo. T, torneado; M, fresado; D, taladrado; SG, esmerilado superficial; CG, esmerilado cilíndrico. (*C.C. Gallagher y W.A. Knight, Group Technology, Butterworths, London, 1973. p. 2. Con permiso.*)

2. Se simplifica la planeación de la producción y se puede recolectar mejor información para el control y la planeación de la producción.

3. Los costos de las herramientas se pueden reducir a través de la estandarización, y los tiempos de puesta a punto se minimizan.

4. El tiempo total del procesamiento se reduce, los tiempos de entrega se acortan, la respuesta a las necesidades de los clientes es más rápida y aumenta la competitividad.

Celdas de manufactura flexible (FMC) Se obtiene un incremento adicional en la flexibilidad al combinar varias operaciones en una o más máquinas CNC muy flexibles, que se alimentan por algún medio versátil de movimiento de material, como un robot o cambiador de tarimas (Fig. 21-6). En una *celda de manufactura flexible* (FMC), la tarea del operador se reduce a cargar los anaqueles, de donde el robot tomará las partes, a sujetar las piezas en plataformas, a retirar partes terminadas y a cambiar las herramien-

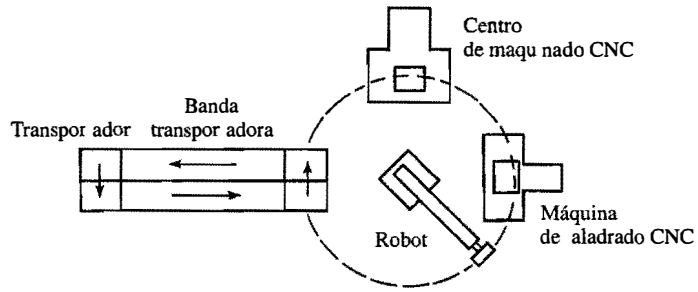


Figura 21-6 Disposición usual de una celda de manufactura flexible.

tas y otros artículos almacenados. La mayor parte de las celdas de manufactura flexible son para el maquinado e incluyen tornos, máquinas fresadoras, centros de maquinado, esmeriladoras, etc., con control CNC. Las celdas de trabajo para lámina de metal son el apilamiento de la lámina, el punzonado CNC, el corte con láser o haz de electrones, el doblado y las unidades de apilamiento de las piezas. Muchas celdas de manufactura flexible incorporan la inspección automática. (El principio de la celda de manufactura flexible no está limitado a la manufactura de piezas; una de las primeras aplicaciones fue en la elaboración de pasteles.)

Comparada con las celdas manipuladas por operadores humanos, las celdas de manufactura flexibles son más exigentes: las máquinas herramienta deben ser más rígidas, las cimentaciones más firmes para una mayor estabilidad y una mejor alineación y el mantenimiento preventivo se debe aplicar estrictamente. Las celdas de manufactura flexibles ofrecen varias ventajas:

1. Las máquinas herramienta con mayor flexibilidad son más costosas, pero pueden reemplazar varias herramientas convencionales. Por lo tanto, la inversión puede ser de 70 a 130%, en comparación con las celdas manipuladas por personas con capacidad similar.

2. El tiempo en el proceso se eleva desde menos de 5%, un valor usual para máquinas herramienta aisladas manipuladas por humanos, hasta 75 a 80%; en consecuencia la productividad, expresada como la producción por máquina, es mucho mayor y las entregas son mucho más rápidas.

3. La productividad también es mayor en términos de producción por hora de operador. No obstante, el requisito de inversión a menudo se justifica sólo si la celda de manufactura flexible funciona 24 horas al día, siete días a la semana, atendida por operadores en un solo turno (o algunas veces dos). Se ha elevado la productividad de cinco a diez veces. Para la operación sin atención, el operador carga o coloca numerosas partes en tarimas; luego el robot las identifica y llama al programa apropiado desde la memoria de la computadora de control. Se deben hacer previsiones para detectar o impedir averías o errores reales o potenciales, y formularse estrategias apropiadas para resolverlas. Por ejemplo, los detectores incorporados en un mandril de fresado indican si la fresa se fijó correctamente en el plato y, si no fue así, da una orden para volver a fijarla.

4. Una mayor flexibilidad permite la reducción del inventario de las partes en proceso, con frecuencia a un cuarto de la cantidad usual. La producción puede, si se requiere, proceder en orden aleatorio; en cierto sentido, las ventajas de la producción en línea de flujo se logran en la producción por lote, así que las corridas pequeñas son rentables. En principio, la manufactura de al menos las piezas más pequeñas se distribuye geográficamente a centros pequeños, creando empleos en muchas localidades.

5. La calidad mejora porque el error humano se elimina como fuente de problemas. Aunque la operación sin atención humana requiere que la calidad se verifique de manera rutinaria (a menudo al 100%) por medio de inspección automática. La limpieza es de extrema importancia: los fluidos, las virutas, el polvo, crean problemas en los aditamentos y también interfieren con el funcionamiento apropiado de los detectores.

Ejemplo 21-2

Las alas de las aeronaves son estructuras complejas en las que los postes actúan como rigidizadores. En cada ala de los Boeing 737 y 777 hay de 100 a 200 postes, similares en forma pero con dimensiones diferentes, con alturas de 1.5 m cerca del fuselaje, y se reducen hasta 150 mm en la punta del ala. Al instalar una celda de manufactura flexible con cinco centros de maquinado horizontal de 4 ejes servida por 44 tarimas, se pueden maquinar 600 tipos de piezas en cualquier orden. Comparado con las máquinas aisladas, el tiempo total de maquinado para el poste de nervadura disminuyó 33% y el tiempo total del ciclo 60%. [Fuente: *Manufacturing Engineering*, 1998 (3): 114-124.]

Sistema flexible de manufactura (FMS) Cuando todas las celdas de manufactura flexible (y la inspección automática) de una planta se entrelazan, se crea un *sistema flexible de manufactura*. Ésta es una tarea enorme que requiere que muchos elementos de CIM ya estén instalados. La complejidad del control por computadora es sustancial y para asegurar el control y la respuesta a situaciones en tiempo real, por lo general se necesitan varios niveles (de cuatro a seis) de control jerárquico. Una característica esencial de un sistema de manufactura flexible es la bodega de *almacenamiento y retiro automáticos* (ASR).

Un sistema de manufactura flexible suele implantarse al instalar primero varias celdas de manufactura flexible. Las plantas nuevas se diseñan como sistemas de manufactura flexible, pero la experiencia ha demostrado que la cooperación completa entre el usuario y el proveedor de dicho sistema es esencial, y que el equipo y el software se deben desarrollar como un esfuerzo conjunto. Una vez que un sistema de manufactura flexible está instalado y en operación, sobrepasa por un margen sustancial las funciones realizadas por humanos.

Una idea de los intervalos de aplicación para los diversos sistemas de manufactura se obtiene a partir de la figura 21-7. Es importante recordar que la flexibilidad es relativa y cuesta dinero. Por lo tanto, muchos sistemas de manufactura flexible se diseñan para tratar sólo con más o menos 10 productos de la misma familia; son flexibles sólo respecto a la automatización fija que reemplazan. Una de las dificultades es la comunicación entre máquinas y controladores de distintos fabricantes, aunque se ha progresado con la introducción a escala mundial de un conjunto estándar de especificaciones de

comunicación (*protocolo de automatización de la manufactura*, MAP), usando como punto de inicio el documento MAP de General Motors.

En principio, es posible, pero no necesariamente deseable, construir una fábrica completamente automatizada en donde todos los procesos unitarios, cambios de herramienta, movimiento del material e inspección se logren sin la asistencia del operador. Esto también es válido para el ensamble, aunque algunas operaciones de este tipo siguen siendo difíciles de automatizar.

21-2-5 Organización del ensamble

En la fase final de la manufactura, los componentes individuales se ensamblan para formar el producto final. Esto presenta un amplio rango de problemas, en función de las cantidades de producción.

El *ensamble manual* aún es el método preferido para la producción de lotes pequeños. En cantidades de producción mayores, la naturaleza repetitiva del trabajo, el peligro de cometer errores cuando se involucran a cientos de piezas y la baja eficiencia global condujeron a los primeros intentos por organizar y mecanizar las operaciones de ensamble.

Líneas de ensamble Al ensamblar una máquina compleja, se logran grandes avances dividiendo la operación en unidades más pequeñas; esto también facilita el manejo del material y aseguran que todas las piezas se suministran en su lugar y secuencia adecuados.

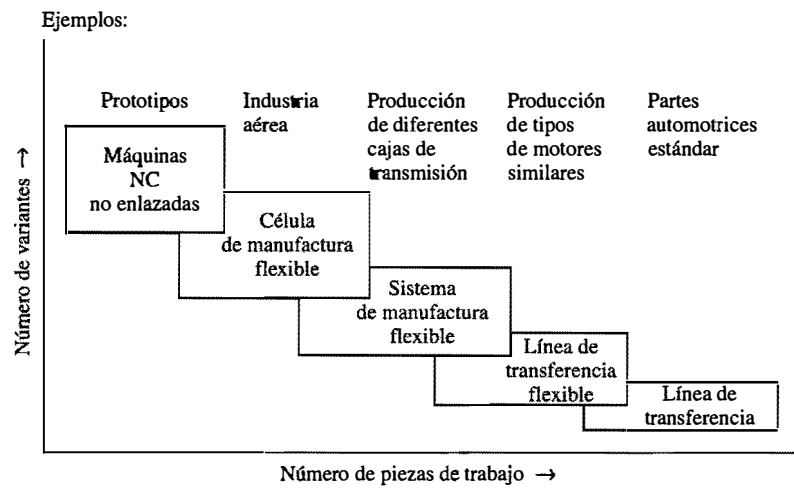


Figura 21-7 La compatibilidad de varios sistemas de manufactura para tareas específicas de producción depende de la variedad de productos y del número de piezas de trabajo. [*Según W. Eversheim y P. Herrmann, J. Manufacturing Systems* **1** *(2): 139-148 (1982). Se publica con autorización de la Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan.*]

Este concepto desembocó en la *línea síncrona de ensamble*, iniciada por Henry Ford en 1913. Las unidades que se ensamblan se mueven en una banda transportadora a una velocidad prefijada, mientras que los operadores situados a lo largo de la banda realizan sus tareas asignadas. Este método de ensamble, más que cualquier avance individual, ha hecho posible la producción en masa de productos de consumo que antes se consideraban como un lujo. Sin embargo, la monotonía del trabajo produjo alguna insatisfacción con el sistema, resultando en intentos para reemplazarlo con métodos alternos pero similarmente productivos.

Las *líneas asíncronas de ensamble* permiten el juicio del operador; las unidades se pasan cuando se terminan. Otra solución potencialmente atractiva confía en un ensamble completo (por ejemplo, un motor de un automóvil) a un grupo de operadores. En ambos casos, a los operadores se les da una libertad considerable para organizarse a sí mismos y también realizan la función del control de calidad. Las alternativas son, por supuesto, la mecanización y la automatización.

Mecanización del ensamble Algunos tipos de operaciones de ensamble se prestan a métodos mecánicos de ensamble muy sencillos. Así, se pueden asegurar tornillos o pernos y colocar las partes, suajar o remachar mediante dispositivos mecánicos (muy ventajosos son las uniones a presión, Fig. 18-3*c*). El costo se reduce, mientras que la productividad y la consistencia del producto se incrementan, pero sólo si la confiabilidad de la mecanización es muy alta. El costo de las reparaciones fuera de línea cancela rápidamente todo el ahorro. Un factor crucial del éxito es la *inspección en línea* para identificar y retirar ensambles imperfectos, ya sea durante o al final de la operación de ensamble. Muchos de los elementos usados en el ensamble automático son los mismos que en la producción y manejo de la pieza de trabajo mecanizados y pueden ser puramente mecánicos, electromecánicos, o controlados numéricamente o por computadora.

Durante el ensamble, la unidad se mueve continuamente; las *cabezas de trabajo posicionadoras* se mueven con la unidad y se retractan después de terminar su tarea, regresan, y repiten la operación en la siguiente unidad. En forma alterna, la línea se posiciona a sí misma y las *cabezas de trabajo estacionarias* realizan la operación mientras está en reposo.

En todos los casos, el ensamble se realiza en línea; es decir, a lo largo de una banda transportadora sobre la que las piezas se mueven (si es necesario, en tarimas que aseguran el posicionamiento exacto). La línea se puede configurar como línea recta o en forma de U o L. Las tarimas regresan por debajo de la línea. Ésta también puede ser oval o circular, de manera que las tarimas regresan a su posición de inicio. Cuando el número total de estaciones no es muy grande, se puede emplear un carrusel rígido para llevar a la unidad de estación a estación.

La operación de una línea puede ser *síncrona*, en tal caso cada unidad se mueve al mismo tiempo y cualquier retraso afecta a toda la línea. Al dividir la línea en módulos más pequeños, con reguladores de almacenamiento entre ellos, la operación de la línea es menos crítica.

Se asegura una libertad mayor a través del movimiento *no síncrono* de las unidades. Cada una se mueve por medio de una orden al terminarse una operación; el número total de unidades es mayor que el de estaciones de ensamble, así que siempre hay un regulador entre cada estación.

Las líneas ramales que alimentan la línea principal ayudan a mantener la salida cuando una operación de subensamble es más tardada.

Sistema de ensamble flexible (FAS) Las mismas causas que forzaron la evolución hacia las celdas de manufactura flexible y sistemas de manufactura flexible contribuyeron al desarrollo de los *sistemas de ensamble flexible* (FAS). Esos sistemas propician la economía del ensamble mecanizado en la producción en lotes. Se incorporan muchas de las técnicas que se usan para el ensamble operado y mecanizado. La diferencia es que muchos, y algunas veces todos, los operadores se sustituyen por máquinas de ensamble flexible, por lo general robots. Estos robots varían desde dispositivos de elección y colocación, hasta robots complejos completamente articulados. Por definición, se controlan por computadora, y algunas veces tienen inteligencia artificial, particularmente en el reconocimiento de patrones, para tomar piezas orientadas de forma aleatoria de un depósito o banda transportadora y para localizar las partes en el ensamble, con la posición correcta. El robot mismo puede realizar la operación de ensamble o presentar la pieza a una máquina de ensamble, como una prensa o apretador de tuercas.

El ensamble automático es exitoso sólo si los diseños existentes del producto se modifican para tomar en cuenta las limitaciones y capacidades del ensamble automático.

21-2-6 Programación del ensamble

En el modo tradicional de operación de una línea de ensamble, se *almacenan* grandes inventarios de partes por varias razones. Primero, el proveedor de piezas reduce costos de producción enviando lotes mayores. Segundo, estos inventarios proporcionan un regulador en el caso de una disrupción del abastecimiento por cualquier razón (problemas técnicos, disputas de trabajo, averías del transporte). Tercero, si no hay seguridad de que todas las piezas recibidas en realidad cumplan con los requisitos, las piezas pueden rechazarse, mientras el ensamble continúa.

Muchas industrias encuentran inaceptable el costo y las implicaciones de calidad de este método y han recurrido al sistema *justo a tiempo* (JIT,) desarrollado en Japón. Se hacen entregas frecuentes a la línea de ensamble (todos los días o varias veces al día) de modo que sólo las piezas que se necesitan de inmediato se almacenan directamente en ella. El sistema *jala* suministros según requiera el consumo en la línea de ensamble, en vez de *empujar* suministros con base en las predicciones. Esto presenta varias ventajas, así como retos:

1. La inversión en espacio y en inventario disminuye en forma drástica, elevando la economía de la aplicación.

2. El ensamble es más flexible porque los programas de producción se pueden cambiar en ausencia de inventarios grandes. Sin embargo, el ensamble también es más sensible a cualquier mal funcionamiento en la línea de ensamble.

3. La confiabilidad del abastecimiento es una preocupación particular porque en una eventual interrupción de los insumos, las piezas requeridas para un cambio temporal en el perfil de la producción simplemente pueden no estar disponibles.

4. Los proveedores de piezas deben adoptar técnicas de manufactura flexible para responder a la demanda. Los problemas de calidad se deben corregir de inmediato: el mantenimiento del equipo y de buenas relaciones laborales son críticos; la falla del abastecimiento a tiempo puede significar una pérdida permanente del negocio.

5. A menudo ni hay tiempo ni disposición para inspeccionar el material de entrada; tampoco hay un almacén que ayude a reducir el efecto de un lote malo. La responsabilidad del aseguramiento de calidad se desplaza, en gran medida, al proveedor.

6. Las entregas frecuentes requieren que los proveedores estén dentro de localizaciones geográficas cercanas (la distancia estará en función del modo de transporte). Las piezas se envían en empaques cuidadosamente diseñados, con frecuencia reutilizables, para asegurar que las piezas lleguen en perfecta condición y, a menudo, también con la orientación correcta. En el desarrollo más reciente, las partes se producen en líneas ramales que alimentan la línea de ensamble de acuerdo con la demanda; esto representa un verdadero sistema de inventario cero.

La entrega justo a tiempo puede funcionar sólo si existe una cooperación muy estrecha entre el productor y el consumidor de piezas. Ello requiere esfuerzos conjuntos en el control de la calidad, transferencia de tecnología e incluso en el diseño de piezas. El concurso competitivo basado solamente en el precio no se utiliza como la base de otorgamiento de contratos.

21-3 ADMINISTRACIÓN DE LA CALIDAD

El objetivo de la manufactura es la creación de productos confiables, es decir, productos que realizarán su función propuesta, bajo condiciones establecidas, durante un periodo específico. La *confiabilidad* es la probabilidad de que un producto cumplirá las expectativas, y a menudo se expresa como un porcentaje. Así, cuando decimos que un producto tiene una confiabilidad de 98% para un servicio de 1 000 h, queremos decir que 98 de 100 unidades funcionarán sin descomponerse.

Suponiendo que el producto fue diseñado de modo correcto y que se eligieron las operaciones adecuadas de manufactura, se deben tomar medidas para que la confiabilidad planeada se pueda lograr. Para ello, se debe controlar la calidad del producto. La *calidad* comúnmente se define como el apego a las especificaciones escritas, pero se debe considerar que hay aspectos de la calidad que son difíciles de definir con exactitud, pero que se pueden juzgar fácilmente en forma subjetiva.

La metodología del control de la calidad ha cambiado con el tiempo. En los días anteriores a la industrialización, la calidad se aseguraba a través del orgullo del artesano y con el control ejercido por los gremios. En los primeros días de la Revolución Industrial, la responsabilidad de la calidad estaba dividida entre el operador y la administración. Siguiendo el trabajo de Frederick W. Taylor a principios del siglo xx, las tareas se organizaban con responsabilidades claramente identificadas, así que el control de la calidad se desplazaba a los departamentos de control de calidad. A partir de los años 20, se aplicó la estadística: W.A Shewhart de la Bell Telephone Laboratories intro-

dujo el control estadístico del proceso y las gráficas de control; asimismo, H.F. Dodge y H.G. Romig desarrollaron muestreos de aceptación. El enorme aumento de la producción durante la Segunda Guerra Mundial hizo necesaria una metodología sistemática y unificada, y se redactaron varias especificaciones militares, algunas de las cuales aún están en uso.

La necesidad de un criterio más amplio fue reconocida por líderes como W. Edwards Deming y Joseph M. Juran en Estados Unidos, pero sus conceptos se adoptaron primero en Japón. De esta manera, el *mapa de caminos de la calidad* de Juran parte desde el cliente hacia un proceso probado y un producto final de calidad; los *14 puntos* de Deming enfatizan la cooperación entre los departamentos, el personal de servicio de la calidad y el cliente. Genichi Taguchi contribuyó al concepto de una *función de pérdida de calidad*: la merma de la calidad representa una pérdida para el productor debida al costo de rechazos, reparaciones e insatisfacción del cliente, así como para la sociedad por el mayor costo de operación, reparación y mantenimiento. Esta pérdida aumenta según una función cuadrática con desviación desde el valor normal (objetivo), incluso si las variables están dentro del intervalo de tolerancia (Fig. 21-8). Este aspecto contrasta con el concepto tradicional de la calidad, el cual acepta con igual valor todo evento dentro la banda de tolerancia, y sólo se preocupa cuando se exceden los límites de tolerancia superior o inferior. Así, el enfoque de Taguchi tiene como objetivo producir un valor objetivo, en lugar de sólo permanecer dentro de especificaciones, lo cual propicia un incremento apreciable en la calidad. La filosofía está apoyada en el diseño fraccional factorial de experimentos para evaluar los factores principales que afectan al

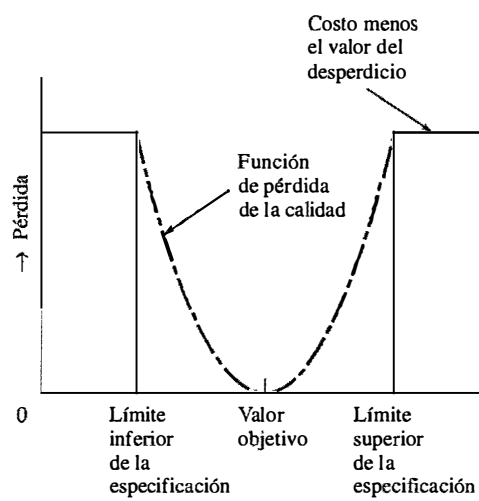


Figura 21-8 Tradicionalmente se considera que los productos tienen igual valor, siempre y cuando estén dentro de las especificaciones (línea continua); de acuerdo con Taguchi, se da una pérdida cuando el producto se desvía del valor objetivo (línea discontinua).

proceso. Ésta es una de varias técnicas de *diseño de experimento* (DOE) y ha probado ser exitosa para la evaluación inicial. En un proceso maduro, donde se buscan los últimos porcentajes de mejoramiento, otras técnicas, incluyendo el análisis de regresión múltiple, pueden servir mejor.

21-3-1 Aseguramiento de calidad

El aseguramiento de calidad ha desarrollado su propio lenguaje y acrónimos. El *control de la calidad* (QC) se ocupa sobre todo de la inspección y el análisis de defectos; tiene como objetivo simplemente mantener los estándares de calidad. El aseguramiento de calidad (QA) se define como la totalidad de las acciones planeadas y sistemáticas necesarias para proporcionar la confianza de que un producto o servicio tendrá la calidad requerida. El *control total de la calidad* (TQC) es una actividad más amplia, que inicia con la interacción con el diseño y se extiende sobre la mayor parte de los aspectos de la manufactura, incluyendo la formulación y auditoría de los programas de control de calidad; requiere un esfuerzo de la compañía en su totalidad y una devoción total hacia el concepto y su realización. La *administración total de la calidad* (TQM) tiene como meta el mejoramiento continuo para satisfacer las necesidades y deseos del cliente. Una herramienta es la *implementación de la función de la calidad* (QFD): una metodología para determinar las necesidades del cliente y trasladarlas a pasos específicos para fabricar productos que cumplan con estos requisitos. Todas estas técnicas se ajustan con facilidad a la ingeniería concurrente.

El *mejoramiento continuo* es central para obtener mayor calidad. Un camino es la serie de normas ISO 9000. Éstas son genéricas; describen qué elementos deben ser parte de un sistema de calidad, pero no imponen ningún método específico. Crean *modelos para aseguramiento de calidad*: la más amplia es la ISO 9001 (para todas las actividades de la empresa, incluyendo diseño/desarrollo, producción, instalación y servicio); más limitadas son la ISO 9002 (para la producción e instalación) y la ISO 9003 (para la inspección final y prueba). Una guía para la instalación de sistemas de calidad se da en la ISO 9004. Una compañía que desee obtener el registro tiene que documentar su sistema de aseguramiento de calidad y debe incluir controles para: documentos, comunicación, procedimientos operacionales, programas de entrenamiento, métodos de medición y calibración, métodos para el tratamiento de productos no conformes, acciones correctivas y, de forma particular, el involucramiento y la responsabilidad de la gerencia. En la preparación para el registro, la compañía realiza una inspección interna de sus operaciones y procedimientos e involucra a todos los empleados; esto suele revelar áreas de debilidad y propicia a mejoras que tienen beneficios a largo plazo en la productividad y en el costo. El registro puede ser por planta o de toda la compañía. Se eligen calificadores externos acreditados para realizar la auditoría. Si los calificadores encuentran que el sistema de calidad opera como se documentó, emiten una *certificación* que se debe renovar periódicamente (note que no es un producto sino la compañía la que se certifica). Muchas compañías requieren en la actualidad que sus proveedores estén certificados bajo el ISO 9000; además, las normas ISO a menudo son parte de las normas de calidad propias del ramo, como la norma QS-9000 adoptada por los fabricantes de automóviles y camiones de Estados Unidos.

21-3-2 Aspectos estadísticos de la manufactura

El aseguramiento de calidad parte del reconocimiento de que todas las propiedades de los productos manufacturados están sujetas a variaciones aleatorias. Cierto margen se establece cuando el diseñador especifica las tolerancias dimensionales (Secc. 3-2-2) o pide alguna resistencia mínima, sabiendo bien que la resistencia de las piezas individuales presentará variación por encima de ese mínimo. Al tratar con variaciones aleatorias, el aseguramiento de calidad se basa en gran parte en conceptos estadísticos; de ahí que con frecuencia se hable del *control estadístico de la calidad* (SQC).

En la sección 3-4-1 se repasaron los aspectos estadísticos de las mediciones dimensionales. Estos aspectos también se aplican a otras *variables* medibles (como el acabado superficial o las propiedades mecánicas o eléctricas) y a *atributos* (datos cualitativos como defectos superficiales, melladuras, defectos en las uniones soldadas, etcétera).

Las variaciones son cambios en el valor de las características medidas. Son de dos tipos: las *clases asignables* (*atribuibles, especiales*) se pueden monitorear hasta solucionar la situación. Aun entonces, permanecerán variaciones pequeñas y aleatorias. Esas *variaciones de causa común* son inherentes en cualquier proceso; aunque siempre y que existan sólo dichas variaciones aleatorias, el proceso será estable y tendrá un *control estadístico.*

El análisis de las variaciones se ilustra mejor mediante la figura 3-7*a*, en la que se grafican las mediciones tomadas en una pieza cilíndrica (un eje). Los puntos de información se pueden graficar como una función del tiempo (*gráfica corrida*); esto revelará de inmediato si algo está muy mal, a fin de que se pueda tomar una acción correctiva. Suponiendo una corrida uniforme de producción, se toma una muestra de 100 partes consecutivas: la excentricidad en el husillo del torno, las variaciones de la fuerza de corte y por tanto la deflexión total, etcétera, se reflejan en las variaciones aleatorias en el diámetro del eje. Los puntos de información se pueden organizar agrupándolos en intervalos dimensionales estrechos mediante una gráfica de barras (Fig. 3-7*a*). Para un proceso con control estadístico, la distribución se aproxima a la distribución normal (Fig. 3-7*b*) y se caracteriza por el promedio estadístico $\bar{x}$ y el rango R o, más comúnmente, la desviación estándar σ (véase la Secc. 3-4-1). Por supuesto, puede suceder que las muestras tomadas presenten una distribución no estándar: el proceso no está bajo control estadístico porque una variable no aleatoria afecta los resultados. Esas variaciones de causa especial se pueden atribuir a máquinas defectuosas, a un error del operador, al material equivocado, a herramienta desgastada, etcétera. Una proporción sustancial de las piezas producidas puede estar entonces fuera de los límites de especificación.

Hay muchos atributos que no pueden medirse, pero no por ello son menos importantes. Por ejemplo, el maquinado puede revelar inclusiones de escoria en algunos de los ejes, o un acabado de pintura puede presentar defectos. Entonces podemos contar el número de defectos en una pieza (unidad) o el número de piezas defectuosas (unidades) en un lote de producción.

21-3-3 Control de aceptación

Idealmente, las especificaciones aseguran que ninguna pieza defectuosa llegue al ensamble y que ningún ensamble defectuoso llegue al cliente final. El *control de acepta-*

ción se basa en pruebas aplicadas a las piezas y productos terminados por el fabricante y/o cliente. Las pruebas pueden involucrar:

1. Inspección del ciento por ciento. Cuando la inspección la realizan seres humanos, no hay garantía de que se encontrará el 100% de las piezas defectuosas; debido a fatiga y al aburrimiento, la inspección humana sólo es efectiva en 80 a 85%. Con la disponibilidad más amplia de las técnicas de inspección automática (Seccs. 3-4-4 a 3-4-6 y Secc. 4-8), la inspección del 100% puede ser del todo efectiva y en muchos casos también económica. Integrada con el proceso, permite la retroalimentación instantánea para el control del proceso. El análisis de los datos proporciona pistas importantes respecto a los efectos de las variables del proceso, permitiendo el perfeccionamiento de los límites del control.

2. Muestreo de aceptación. La inspección del ciento por ciento quizá no sea económica, y si implica pruebas destructivas, es imposible. Entonces se probará un número limitado de muestras. Este número y los métodos para obtenerlo se establecen con base en la teoría de probabilidad. El plan de muestreo se planea de manera que el riesgo de rechazar lotes buenos (riesgo del productor) se minimice, sin que haya un aumento indebido en el riesgo de aceptar lotes malos (riesgo del consumidor).

Esta metodología es esencialmente *reactiva*. La inspección se lleva a cabo después del hecho; si se detecta una proporción inaceptablemente alta de piezas o ensambles no conformes, la tasa de muestreo se incrementa y, si es necesario, las partes que no cumplen las especificaciones se separan clasificándolas. La corrección implica trabajo y reinspección, o bien desecho. El origen de las piezas rechazadas puede ser difícil de determinar, y para el tiempo que la información regresa al productor, quizá ya se hayan producido lotes adicionales de buena o mala calidad. En cierto sentido, la *calidad se inspecciona en el producto*. Aunque el control de calidad se puede realizar mediante personal muy calificado empleando el mejor equipo y plan de inspección, puede ocurrir la aprobación de piezas no conformes; el propósito de la inspección sólo es asegurar que la proporción de piezas no conformes no exceda un valor predeterminado. Los ensambles que consisten de muchas piezas podrán resultar defectuosos en una proporción significativa de casos, destruyendo la competitividad del producto. Las normas de calidad más estrictas pueden ser satisfechas sólo con un costo mayor. Ahora, la calidad tiene un costo.

21-3-4 Control estadístico del proceso

Una probabilidad mucho mayor de éxito se obtiene si el control de calidad se aplica en el curso de la producción misma. Como se mencionó, los inicios del *control estadístico del proceso* (SPC) datan de los años 1920, pero su ejecución solía asignarse a los departamentos de control de calidad, con inspectores que tomaban muestras durante las corridas de producción. Esto conducía a una relación desfavorable con los operadores y reducía la efectividad del control.

A principios de la década de los 50, los expertos estadounidenses, principalmente W.E. Deming, introdujeron la técnica al Japón en forma modificada, confiando la eje-

cución del control de calidad al operador. Esta metodología toma en cuenta que sin una guía apropiada, el operador no es capaz de controlar la calidad; puede tomar decisiones cuando no se necesitan, y a la inversa, no tomarlas cuando sí son necesarias. Por lo tanto, la gerencia (a través del departamento de aseguramiento de calidad) debe proporcionar las herramientas adecuadas: no sólo instrumentos de medición, sino también el plan de control basado en principios estadísticos. Así, el operador puede realizar las mediciones, evaluar la importancia de los resultados y realizar la acción correctiva inmediata. La función clave realizada por el operador a menudo se reconoce por el nombre de *control del proceso por el operador* (OPC). El éxito fenomenal de este enfoque ha apresurado su aceptación también en Estados Unidos y otros lugares. El principio del OPC es muy simple:

1. La calidad no se considera como un punto separado, que se deba controlar de manera aislada del proceso. En vez de ello, todo el sistema de producción se revisa y se evalúan los factores que afectan la calidad en varias estaciones de trabajo.

2. Con este repaso se identifican las variables o atributos críticos y se fijan los límites del control. Las mediciones e inspecciones se prescriben a intervalos (o número de unidades de producción) para que aseguren la validez estadística.

3. El operador realiza las mediciones prescritas e inmediatamente representa los datos en gráficos apropiados (o los coloca en un programa de computadora). Si las tendencias sugieren que las desviaciones pueden alcanzar valores que se aproximan a los límites de control, se aplica una acción correctiva antes de que se produzcan piezas no conformes.

Así, aunque un evento aleatorio puede provocar la producción de una pieza defectuosa, esto será extremadamente raro; muchas de las piezas serán aceptables sin inspección adicional: la *calidad se incorpora al producto*. El productor se beneficia porque todas las piezas que se manufacturan también son enviadas. Asimismo, el comprador se beneficia: la necesidad de reinspección y de trabajo adicional o reparación de los ensambles desaparece. La competitividad aumenta con la mayor calidad y los costos disminuyen debido a la mayor productividad. La técnica incluso permite mejoras del proceso. Al identificar las variaciones atribuibles a una fuente definida (causa asignable), se pueden encontrar los medios para eliminarlas, los límites del control se reducen y se producen piezas de mayor calidad. Esto repercute en un costo menor.

Ejemplo 21-3

Los elementos básicos de esta metodología se ilustran regresando al ejemplo de la fabricación de un eje en un torno (Fig. 3-7). El operador controla el diámetro del eje y tiene como objetivo mantenerlo dentro de los límites especificados de 9.90 mm y 10.00 mm. Se proporciona un micrómetro para la medición. Antes de evaluar la capacidad de la máquina herramienta o del proceso para producir la pieza, es preciso establecer si el instrumento de medición tiene la exactitud requerida.

1. Evaluación del dispositivo de medición. Esta tarea la realiza el departamento de aseguramiento de calidad, por ejemplo, midiendo dos calibres tipo tapón con precisión para calibra-

ción, de 9.900 y 10.000 mm de diámetro. El dispositivo de medición debe tener las graduaciones correspondientes cuando menos a un décimo de la tolerancia (en este caso, graduaciones de 0.01 mm).

2. Evaluación de la reproducibilidad. Una vez que se determina que el micrómetro es exacto, la reproducibilidad y repetibilidad combinadas de la medición se evalúan en la planta (la separación de ambas requiere pruebas más extensas). Dos operadores (A y B) miden, sólo una vez, cinco ejes seleccionados al azar. Las estimaciones de las lecturas se redondean a la mitad de la graduación más cercana. Entonces el error del calibrador se calcula como se muestra en la tabla 21-1 (el multiplicador 4.33 proviene de la teoría estadística y es una función del número de operadores y muestras). Si el error es mayor de 10% del intervalo de tolerancia, el micrómetro se ajusta, se cambia, o si el error del calibrador no se puede reducir, se deben determinar otros medios de medición. En las aplicaciones menos críticas, un error de 20% es tolerable. Sin embargo, un calibrador menos exacto rechazará partes que en realidad están dentro de la tolerancia.

3. Determinación de la capacidad del proceso (es decir, si el proceso es capaz de cumplir con las especificaciones). Para obtener una imagen instantánea del proceso, se establece la *capacidad a corto plazo* mediante el muestreo. Para asegurar que los resultados sean estadísticamente significativos, el tamaño de la muestra debe ser grande; pero por economía, éste se debe mantener pequeño. Un buen compromiso es $n = 5$ piezas (o, con mayor frecuencia, 4 piezas) por *muestra* (*subgrupo*). Se toman al menos 10, pero preferiblemente 20 muestras (100 piezas consecutivas); durante este periodo no se realizan ajustes. Los diámetros medidos (tabla 21-2) se grafican en un histograma (Fig. 3-7*a*). Si la distribución está cerca de la normal, proceda con el análisis. Si la distribución normal está centrada fuera de 9.95 mm, vuelva a calibrar el equipo y repita el muestreo. Si la distribución es bimodal, encuentre la fuente del efecto (por ejemplo, si el eje se tornea en dos etapas, analice cada una). Si la distribución es oblicua, encuentre la fuente (por ejemplo, una desviación debida al desgaste de la herramienta). Si la oblicuidad no se puede eliminar, proceda con el análisis, pero anote la causa de la derivación.

De los datos, calcule el diámetro promedio $\bar{x}$ [ecuación (3-2)] y el intervalo R para cada muestra de 5 piezas (tabla 21-2; note que las mediciones sólo se dan hasta el centésimo más

Tabla 21-1 Verificación del error del calibrador

Parte Núm.	Operador A	Operador B	Intervalo, mm
1	9.945	9.960	0.015
2	9.925	9.930	0.005
3	9.940	9.940	0.000
4	9.935	9.930	0.005
5	9.955	9.945	0.010

Sumatoria de los intervalos $\Sigma R = 0.035$

Intervalos promedio $\bar{R} = \Sigma R/n = 0.035/5 = 0.007$ mm

Intervalos de tolerancia = 10.00 − 9.90 = 0.10 mm

Error del calibrador (repetibilidad y reproducibilidad GRR) = $4.33\bar{R} = 0.0303$

GRR como porcentaje de la tolerancia = (0.0303/0.100) 100 = 30.3%

Tabla 21-2 Evaluación de promedios y rangos*

		Muestra número									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Datos	1	9.92	9.95	9.98	9.99	9.93	9.96	9.97	9.94	9.95	9.96
de la	2	9.94	9.96	9.94	9.92	9.95	9.97	9.94	9.96	9.93	9.92
muestra	3	9.93	9.96	9.95	9.93	9.99	9.94	9.92	9.95	9.97	9.92
x_i	4	9.95	9.97	9.97	9.94	9.93	9.98	9.92	9.96	9.96	9.94
mm	5	9.93	9.94	9.93	9.92	9.94	9.99	9.93	9.92	9.98	9.93
Total	Σx	49.67	49.78	49.77	49.70	49.74	49.84	49.68	49.73	49.79	49.67
Promedio	$\bar{x}$	9.934	9.956	9.954	9.940	9.948	9.968	9.936	9.946	9.958	9.934
Intervalo	R	0.03	0.03	0.05	0.07	0.06	0.05	0.07	0.04	0.05	0.04

*Sólo se plantean 10 muestras de 20. $\bar{\bar{x}} = 9.947 \approx 9.95$ mm; $\bar{R} = 0.049$ mm.

cercano y que en la tabla sólo se incluyen 10 de las 20 muestras, de ahí que los promedios y la desviación estándar no son exactamente los mismos, como se indica en la Fig. 3-7). Calcule la media de los promedios (*gran promedio*)

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\Sigma \bar{x}}{(n)} \tag{21-1}$$

y la media $\bar{R}$ de los intervalos R para las $(n) = 20$ muestras (de nuevo, sólo hay 10 muestras en la tabla 21-2). Ahora se puede obtener una estimación de la desviación estándar de

$$\sigma = \frac{\bar{R}}{d_2} \tag{21-2}$$

donde d_2 se toma de la tabla 21-3. Como se espera una dispersión de $\pm 3\sigma$ en la manufactura, es normal comparar 6σ a la tolerancia para expresar la *relación de la capacidad de la máquina*

$$C_r = \frac{6\sigma}{\text{tolerancia}} \tag{21-3}$$

Es deseable que 6σ sólo ocupe una fracción de la banda de tolerancia; en la práctica, $C_r = 0.75$ es aceptable. En $C_r = 1.00$ el proceso difícilmente es aceptable, y $C_r > 1.00$ no lo es (o las piezas producidas se tendrían que ordenar). La *capacidad de proceso* a menudo se expresa por el recíproco

$$C_p = \frac{\text{tolerancia}}{6\sigma} \tag{21-4}$$

Entonces un proceso aceptable tiene una capacidad mínima $C_p = 1/0.75 = 1.33$. Esto sólo expresa el potencial del proceso; si, por ejemplo, la herramienta se colocó mal, la curva de la campana se desplazaría y se producirían rechazos (Fig. 3-7*d*). Por lo tanto, también es necesario calcular

$$C_{pk} = \frac{\text{USL} - \bar{x}}{3\sigma} \tag{21-5a}$$

Tabla 21-3 Factores para los límites de control

Número de observaciones en la muestra, n	d_2	A_2	D_3	D_4
2	1.128	1.880	0	3.267
3	1.693	1.023	0	2.575
4	2.059	0.729	0	2.282
5	2.326	0.577	0	2.115
6	2.534	0.483	0	2.004
8	2.847	0.373	0.136	1.864
10	3.078	0.308	0.223	1.777
15	3.472	0.223	0.348	1.652
20	3.735	0.180	0.414	1.586
25	3.931	0.153	0.459	1.541

$$C_{pk} = \frac{\bar{x} - \text{LSL}}{3\sigma} \qquad \textbf{(21-5b)}$$

donde USL y LSL son los límites superior e inferior de la especificación, respectivamente. Si C_{pk} es menor que 1.33, algunas piezas estarán fuera de tolerancia, pero al reajustar la herramienta se corregirá el problema.

4. Cálculo de los límites de control. Si el proceso es capaz, los *límites de control* se calculan para los promedios:

$$\text{UCL}_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} + A_2\bar{R} \qquad \textbf{(21-6)}$$

$$\text{LCL}_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} - A_2\bar{R} \qquad \textbf{(21-7)}$$

y para los rangos:

$$\text{UCL}_R = D_4\bar{R} \qquad \textbf{(21-8)}$$

$$\text{LCL}_R = D_3\bar{R} \qquad \textbf{(21-9)}$$

donde para 3 desviaciones estándar de la media, A_2, D_3 y D_4 se toman de la tabla 21-3. En nuestro ejemplo

$$\text{UCL}_{\bar{x}} = 9.95 + (0.577)(0.049) = 9.976 \text{ mm}$$
$$\text{LCL}_{\bar{x}} = 9.95 - (0.577)(0.049) = 9.919 \text{ mm}$$
$$\text{UCL}_R = (2.115)(0.049) = 0.1036 \text{ mm}$$
$$\text{LCL}_R = (0)(0.049) = 0 \text{ mm}$$

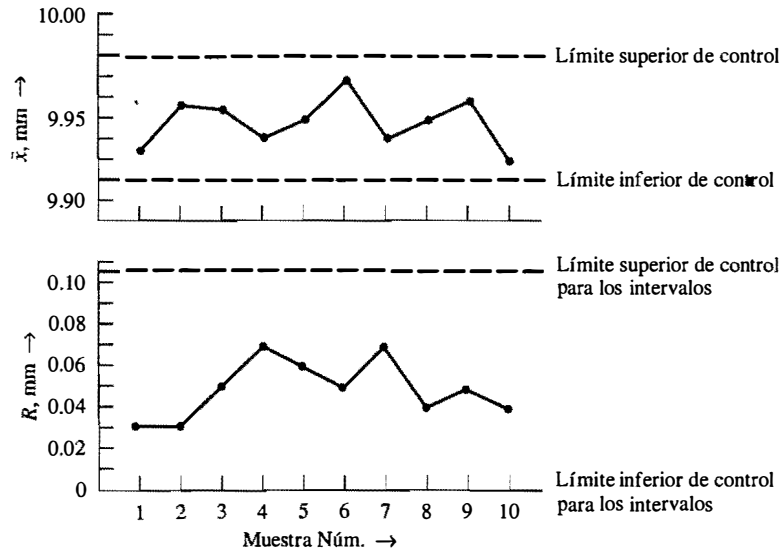


Figura 21-9 Al tornear un eje sencillo de 9.95 ± 0.05 mm de diámetro, el proceso está bajo control estadístico porque ninguno de los promedios o intervalos de las muestras está fuera de los límites de control establecidos.

Estos límites se grafican posteriormente en las denominadas gráficas $\bar{x}$–R (x testada–R), figura 21-9; éstas *no* muestran los límites de especificación. Para un proceso bajo control, los puntos se distribuyen de forma aleatoria dentro de los límites.

5. Control de la calidad del operador. En este punto, el operador toma el control y grafica, sobre las gráficas de control proporcionadas, $\bar{x}$ y R para las muestras tomadas a intervalos predeterminados (Fig. 21-9). Siempre y cuando las variaciones sean aleatorias y estables, el proceso permanece en un estado de control estadístico; el intervalo de muestreo se puede extender con el consentimiento del departamento de control de calidad. Las gráficas $\bar{x}$–R alertan al operador de que hay condiciones que provocan variaciones mayores que la normal, de manera que se pueda aplicar una solución *antes* de que se produzcan partes fuera de tolerancia; algunos ejemplos se muestran en la figura 21-10.

Cuando se practica el control estadístico del proceso, el comprador de piezas tiene la seguridad de que no se le entregarán piezas fuera de especificación. Cada vez más los clientes comprarán partes sólo de productores que mantienen un control estadístico del proceso; además están dispuestos a cooperar con los proveedores en la instalación de un procedimiento significativo para este propósito.

El ejemplo que aquí se muestra se aplica a muchos, pero de ninguna manera a todos, los procesos y productos. Existe una vasta literatura sobre el tema y se dispone de muchos productos de software para ayudar a introducir el control de la calidad y para analizar los datos. Cuando los procesos se operan bajo control estadístico, una difusión muy pequeña de R indica que algo está mal con la medición, o que el proceso está mejor controlado que el común; al seguir pistas, de nuevo es factible realizar mejoras.

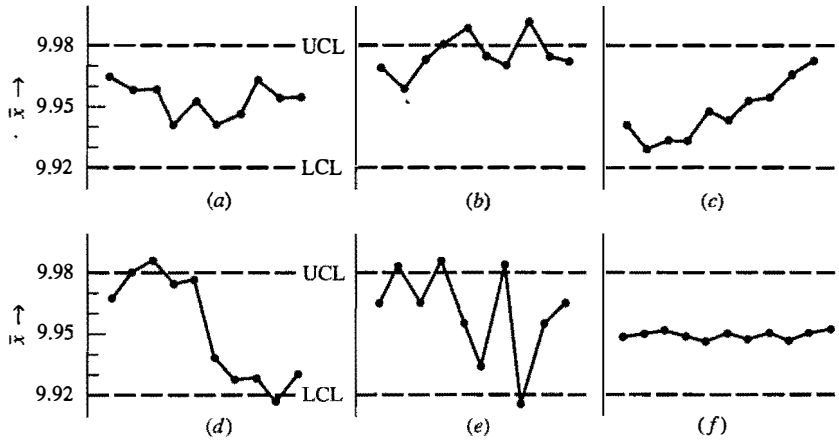


Figura 21-10 El control estadístico del proceso proporciona claves valiosas: (a) el proceso está bajo control estadístico, (b) herramientas colocadas de manera inadecuada, (c) desgaste rápido de la herramienta, (d) lote mezclado de material de dos durezas, (e) proceso fuera de control y (f) algo va muy bien y vale la pena investigar.

En algunos casos, las tolerancias son tan estrictas que ningún proceso existente es capaz de satisfacerlas. Las piezas se deben separar en subgrupos a partir de la inspección del 100% para el *ensamble selectivo*, por lo que las piezas ensambladas ya no son intercambiables.

En muchas aplicaciones la medición directa de una variable no es posible, por lo que el control del proceso se basa en el número o relación de elementos defectuosos en una muestra o en la cantidad de defectos en una unidad. Las gráficas de control de calidad también se pueden preparar para esos atributos.

21-4 ADMINISTRACIÓN DE LA MANUFACTURA

Una planta equipada con máquinas herramienta eficientes y que utiliza los mejores medios de movimiento de material y ensamble aún puede perder dinero. Para la producción rentable, la tecnología y los medios físicos de producción se deben administrar efectivamente. Regresaremos a este tema en el capítulo 22; aquí sólo analizaremos algunos esquemas usuales de organización y la función de la ingeniería de la manufactura dentro de ellos.

21-4-1 Organización de la compañía

Ni las organizaciones empresariales ni la terminología usada para describir los elementos organizacionales están estandarizados. No obstante, la *gráfica de organización* de la figura 21-11 es muy característica en la práctica estadounidense.

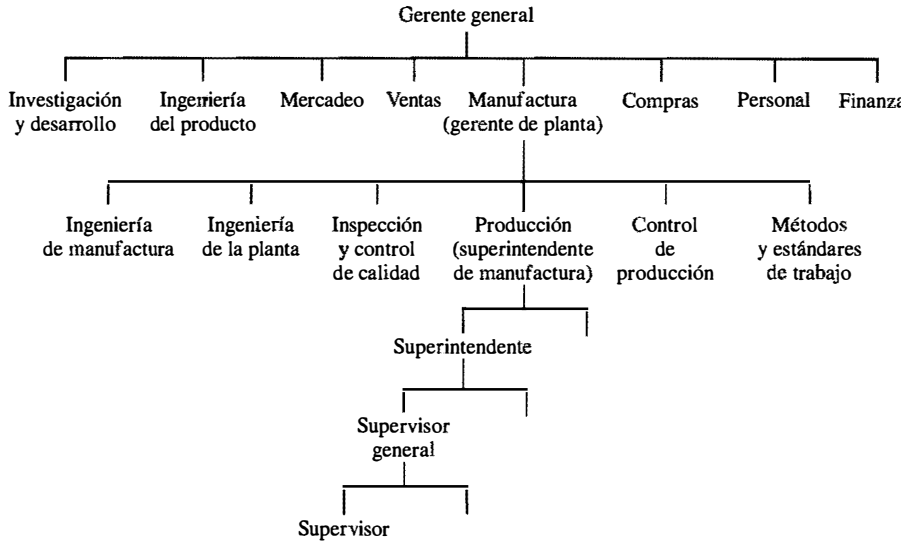


Figura 21-11 Ejemplo de una posible estructura organizacional.

A nivel de la compañía, todas las preocupaciones de la manufactura tienen departamentos de finanzas, de personal, de compras y de ventas. Los departamentos de *comercialización, desarrollo* e *investigación de mercado y desarrollo* son esenciales para el crecimiento. Según sea la naturaleza de las operaciones, también puede hacerse una *ingeniería del producto*, la cual se encarga del desarrollo, diseño, prueba y evaluación de los productos nuevos; idealmente, involucrará por completo al grupo de manufactura de la compañía y de los proveedores externos. Estos grupos constituyen en conjunto el talento para la ingeniería concurrente.

A nivel de la planta, todas las facetas de la producción están bajo la dirección del gerente de planta. La producción real está coordinada por el superintendente de manufactura, con la asistencia de subalternos, supervisores generales y supervisores. En muchas plantas se eliminan varios niveles de supervisión y a los técnicos altamente calificados, o a los asociados, se les dan responsabilidades más amplias y autoridad. Para mantener la producción en máxima eficiencia, otros departamentos proporcionan apoyo.

1. La *planeación y el control de la producción* determinan el tamaño económico de los lotes y establecen programas para la manufactura y el ensamble a través de varias técnicas. La *planeación del proceso asistida por computadora* (CAPP) se apoyan en la *planeación de los requerimientos de materiales* (MRP), basada en el programa maestro de producción, la lista de materiales y los registros del inventario relacionados con las materias primas, los componentes comprados, las piezas por entregar, los materiales y piezas en proceso, los productos terminados y las herramientas y artículos de mantenimiento. Con esta información como punto de partida, la MRP administra los inventarios con la debida consideración del programa de requisitos del material. En detalle,

proporciona avisos para liberar órdenes, programación y reprogramación, cancelación, estado del inventario, informes de desempeño, desviaciones de los programas, etc. Un buen sistema MRP propicia tiempos reducidos de entrega, mínimo inventario, respuesta más rápida a los pedidos de los clientes e incremento de la productividad. Un desarrollo adicional es la *Planeación de los recursos para la manufactura* (también llamada MRP-II o MRP de circuito cerrado), que integra un sistema completo del control de la manufactura. Se incorporan la planeación de la producción, la programación maestra, la planeación de los requerimientos de capacidad y las funciones necesarias para ejecutar el plan de producción (incluyendo programas de los proveedores y listas de entrega), y se hacen previsiones para su actualización continua. Todas estas técnicas a menudo se consideran como elementos de un Sistema de información gerencial (MIS). Más recientemente, el MIS representa un sistema de información para la manufactura.

2. La tarea primaria del grupo de *métodos y estándares de trabajo* era el suministro de los estudios de tiempos y movimientos y de las normas. Ahora el énfasis suele estar en el análisis de todo el proceso; algunas veces en cooperación con el *departamento de ingeniería del proceso.*

3. La *ingeniería de la planta* es responsable del mantenimiento preventivo del equipo, el reemplazo de maquinaria y el suministro de servicios (electricidad, calefacción, iluminación, etcétera). Como el tiempo fuera de servicio provoca pérdidas grandes económicas, el mantenimiento es particularmente crítico con el equipo computarizado y los robots; así que y el *mantenimiento productivo total* (TPM) tiene como objetivo que el equipo permanezca en operación todos los tiempos programados.

4. La *inspección y el control de la calidad* son actividades vitales que se informan a un nivel superior de gerencia; y de manera simultánea se integran cada vez más a la producción.

5. La *ingeniería de manufactura* es central para nuestras consideraciones y se analiza por separado.

Se debe notar que la organización mostrada en la figura 21-11 no es por ningún motivo universal y tampoco la mejor necesariamente. Tiende a fomentar la separación de los esfuerzos departamentales; por esta razón existe una tendencia creciente hacia un esquema de *organización horizontal, donde todos los departamentos informan al gerente de planta*, asegurando de esta manera la cooperación interdepartamental.

21-4-2 Ingeniería de manufactura

El grupo de *ingeniería de manufactura*, también llamado *ingeniería del proceso*, comúnmente está encabezado por el *ingeniero en jefe.* Es en este grupo donde reside la conciencia tecnológica; de modo que la competencia de su personal determina si la compañía será competitiva y rentable. En la actualidad, el personal de este grupo debe entender los procesos y su control; además, debe saber sobre materiales, mecánica, electrónica, computadoras y análisis de sistemas.

Sus tareas usuales incluyen la evaluación de la factibilidad y el costo de la manufactura, la selección de los procesos y las secuencias del proceso óptimo del equipo de

producción, herramientas, plantillas y aditamentos (su diseño y manufactura y el control del taller de herramientas); los métodos y equipo para movimiento de materiales y la distribución de la planta. Además de los procesos unitarios analizados en este libro, el grupo también elabora especificaciones para los procesos auxiliares y de acabado y, en general, para el trato y manejo de las piezas individuales y de ensambles terminados. El análisis de costo (Secc. 22-2) a menudo se realiza aquí, así que el grupo también tiene una función central en el análisis de valor. El grupo coopera de manera estrecha con los especialistas de investigación y desarrollo, y delega sus miembros a los equipos de ingeniería concurrente.

Con el incremento de la mecanización y de la automatización, y particularmente con las demandas especiales impuestas por el control numérico y computarizado, las actividades del departamento de ingeniería de manufactura son responsables de una parte sustancial del costo total de producción, de modo que existen razones convincentes por las que al menos algunas de estas actividades se deben considerar como mano de obra directa, en vez de indirecta (Secc. 22-2). La relación costo-efectividad real de las nuevas tecnologías de manufactura se puede juzgar, entonces, revelando así la necesidad de una reorganización completa de las instalaciones de producción. Esto es particularmente cierto en el control por computadora, el cual con frecuencia no produce ningún ahorro a menos que se cambie todo el concepto de manufactura.

21-5 RESUMEN

Los procesos unitarios analizados en los capítulos del 6 al 20 pueden originar una producción competitiva sólo si se integran en un sistema de manufactura. De importancia especial son los puntos siguientes que no se analizaron antes:

1. El movimiento de materiales quizá sea el que consuma más tiempo y el que limite la productividad de las máquinas herramienta. Por lo tanto, las partes y las herramientas se deben transportar manualmente o con dispositivos mecánicos, de manera que estén disponibles de inmediato, a medida que se necesiten. Los dispositivos programables, como los robots (sobre todo los dotados con elementos de inteligencia artificial), y los vehículos guiados automáticamente combinan flexibilidad y productividad. La colocación de las piezas en aditamentos o tarimas permite una planeación ágil y exacta.
2. La cantidad y la rapidez de producción, así como las similitudes en las características y secuencias de operaciones determinan el método más apropiado de la organización de la producción. La producción de lotes pequeños de unidades muy variables precisa máquinas herramienta aisladas; a medida que la similitud en las características y las secuencias de operación se incrementa, la FMC o incluso la FMS son factibles y económicas para la producción de lotes pequeños y grandes. La producción en masa aún se suele realizar en máquinas automáticas y en líneas de producción dedicadas; sin embargo. la flexibilidad apenas se está introduciendo en éstas, así que la distinción entre una línea de transferencia flexible y la FMC resulta confusa. La tecnología de grupo es el apoyo más importante en la organización de la producción.

3. El ensamble también puede ser manual o automático; la automatización puede ser flexible o fija, en función del número y variedad de los productos. Un cierto grado de flexibilidad a menudo es factible incluso en la producción en masa, la cual está apoyada por la introducción de la entrega justo a tiempo de pequeños lotes de componentes.
4. La producción con un mínimo costo se logra cuando cada una de las piezas producidas satisface los requisitos de calidad. De esta manera, el control estadístico del proceso, que asegura que la calidad se propicia, en vez de investigar, el producto, quizá sea más rentable y también tal vez ayude a asegurar los mercados en un entorno competitivo.
5. Los mejores procesos fallarán, a menos que una administración fuerte los respalde; a la inversa, la mejor administración no podrá hacer nada en un proceso fundamentalmente no competitivo.

PROBLEMAS

21-1 Defina la diferencia entre un (*a*) manipulador y un (*b*) robot.

21-2 ¿Cuál es el equipo mínimo en una FMC?

21-3 Establezca la diferencia entre (*a*) una línea de transferencia y (*b*) una línea de transferencia flexible.

21-4 Defina las líneas de ensamble (*a*) síncronas y (*b*) asíncronas.

21-5 Explique el término capacidad del proceso.

21-6 Realice una gráfica $\bar{x}$–R para un proceso de corte (*a*) bajo control estadístico, (*b*) sujeto a un desgaste gradual de la herramienta y (*c*) con una herramienta colocada de manera impropia.

21-7 Dé ejemplos de causas (*a*) asignables y (*b*) aleatorias para variaciones en el diámetro de un eje torneado..

21-8 Se indicó que $C_p = 1.33$ es deseable. (*a*) Exprese esto en términos de la desviación estándar. (*b*) Encuentre el número de defectos que se producirían en un lote de 10 000 partes.

21-9 Si un proceso tiene $C_p = 1.00$, ¿cuántas piezas estarán fuera de tolerancia (*a*) por millón y (*b*) en un lote de 10 000?

LECTURAS ADICIONALES

Tool and Manufacturing Engineers Handbook, vol. 4, *Quality Control and Assembly*, 1987; vol. 5, *Manufacturing Management*, 1988; vol. 7, *Continuous Improvement*, 1993; vol. 9, *Material and Part Handling*, 1998; Society of Manufacturing Engineers.

Badiru, A.: *Industry's Guide to ISO 9000*, Wiley, 1995.

Clausing, D.P.: *Total Quality Development*, ASME, 1994.

Clements, R.B.: *Handbook of Statistical Methods in Manufacturing*, Prentice Hall, 1991.

Craid, R.J.: *The No-Nonsense Guide to Achieving ISO 9000 Registration*, ASME, 1994.

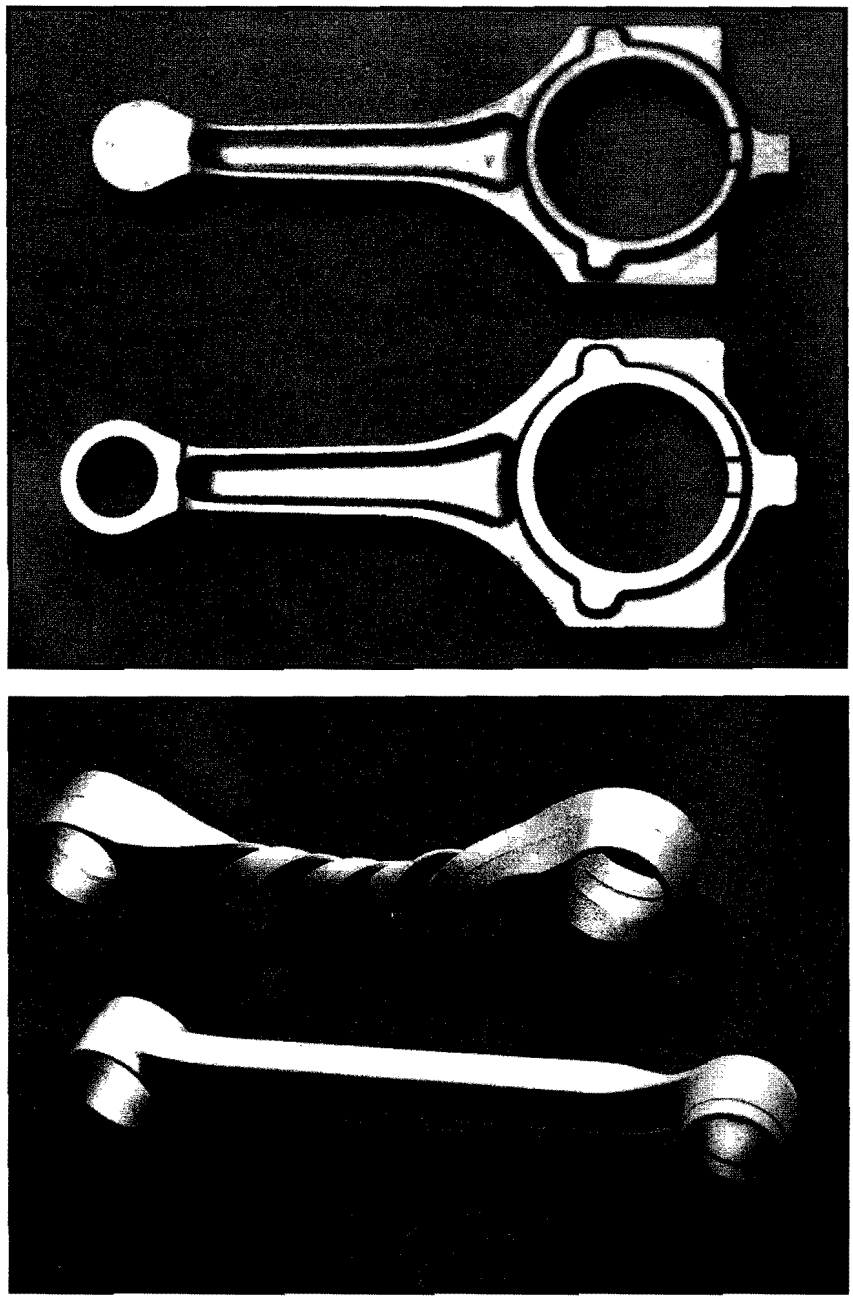
Deming, W.E.: *Out of the Crisis: Quality, Productivity and Competitive Position*, MIT Press, 1982.

Doty, L.A.: *Statistical Process Control*, 2a. ed., Industrial Press, 1996.

Griffith, G.: *Statistical Process Control Methods*, 2a. ed., ASQC Quality Press, 1996.

Hodson, W.K.: *Maynard's Industrial Engineering Handbook*, McGraw-Hill, 1992.

Hoyle, D.: *ISO 9000 Quality Systems Handbook*, Butterworth-Heinemann, 1994.
Juran, J.M.: *Juran on Leadership for Quality*, Free Press, Nueva York, 1989.
Juran, J.M. y A.B. Godfrey: *Juran's Quality Handbook*, 5a. ed., McGraw-Hill, 1999.
Koenig, D.T.: *Manufacturing Engineering: Principles for Optimization*, 2a. ed., Taylor and Francis, 1994.
Kolarik, W.J.: *Creating Quality: Process Design for Results*, McGraw-Hill, 1999.
Nof, S.Y., W.E. Wilhelm y H.-J. Warnecke: *Industrial Assembly*, Chapman and Hall, 1998.
Novack, J.L.: *The ISO 9000 Documentation Toolkit*, Prentice Hall, 1995.
Oakland, J.S.: *Statistical Process Control*, 3a. ed., Butterworth-Heinemann, 1996.
Rabbitt, J.T. y P.A. Bergh: *The QS-9000 Book*, Quality Resources, Nueva York, 1998.
Schoonmaker, S.J.: *The Complete ISO 9001 Reference for Engineers and Designers*, McGraw-Hill, 1996.
Salvendy, G.: *Handbook of Industrial Engineering*, 2a. ed., Wiley, 1991.
Taguchi, G.: *Introduction to Quality Engineering*, Asian Productivity Organization, Tokyo, 1986.
Tempelmeier, H. y H. Kuhn: *Flexible Manufacturing Systems*, Wiley, 1993.
Singh, N. y D. Rajamani: *Cellular Manufacturing Systems*, Chapman and Hall, 1995.
Askin, R.G. y C.R. Standridge: *Modeling and Analysis of Manufacturing Systems*, Wiley, 1993.
Nee, A.Y.C., K. Whybrew y A.S. Kumar: *Advanced Fixture Design for FMS*, Springer, 1994.
Williams, D.J.: *Manufacturing Systems*, 2a. ed., Chapman and Hall, 1994.
Wu, J.-K.: *Neural Networks and Simulation Methods*, Dekker, 1994.



Un ejemplo de lo competencia entre procesos: los bielas paro motor de combustión interna normalmente se forjan en caliente (arriba) o en polvo (centro; note lo mejor definición de los rasgos y el agujero en el extremo pequeño); pero la fundición de acero al vacío también puede producir bielas de pored delgada y muy dúctiles, como se muestra por la parte torcida (*Arriba: cortesía de lo Ford Motor Co., Dearborn, Michigon, abajo: cortesía de la American Foundrymen's Society, Des Ploines, Illinois.*)

capítulo

22

Aspectos competitivos de los procesos de manufactura

La manufactura es una actividad dinámica en constante desarrollo, y para sobrevivir, cualquier empresa debe tener un grado muy alto de adaptabilidad. Los elementos del éxito son:

Hacer más con menos: manufactura esbelta

Responder a un cambio rápido: manufactura ágil

Control de costos, incluyendo los costos indirectos

Elección del proceso óptimo para una tarea dada

Reconocer la competencia entre materiales

En la sección 1-2 se argumentó que el bienestar económico de una nación depende en gran medida de una industria de manufactura competitiva y que la productividad es un punto clave para asegurar una posición competitiva en el mundo.

En este libro, el énfasis se puso sobre los procesos unitarios necesarios para fabricar piezas discretas. En los capítulos 2 y 21 se mostró que estos procesos se deben organizar en un sistema de manufactura bien coordinado, que opere con los principios de la ingeniería concurrente. En el sentido más estricto del término, las funciones del diseño y de la manufactura se deben entrelazar; cuando resultó apropiado, estos puntos también se resaltaron en los capítulos 3 al 20. Sin embargo, existe el peligro de que la inevitable masa de detalles oscurezca lo prioritario; ahora es necesario tener una vista panorámica y examinar los aspectos competitivos de la manufactura.

22-1 COMPETENCIA EN LA ECONOMÍA GLOBAL

La competencia, en sentido cotidiano, a menudo alude a la competencia entre corporaciones y naciones. En efecto, aun sin ningún conocimiento técnico, sería difícil ignorar

la competencia global: los bienes que compramos se producen en todo el mundo, y los periódicos están llenos de historias de éxito (y fracaso) de compañías que se enfrentan a la competencia. La estructura de la competencia global es muy compleja. Con seguridad, hay competencia entre naciones, así que una fuerza de trabajo altamente capacitada es un requisito básico en una era donde la riqueza se crea por medio del conocimiento. También existen otros factores que determinan la competitividad y las corporaciones multinacionales (o como se les llama con frecuencia, transnacionales) cambiarán la producción a países donde las condiciones sean más favorables. Sin embargo, recientemente la competencia se da entre productos.

Mucho se habla de *productos de clase mundial*. Se debe tomar en cuenta que éstos son blancos móviles; lo que hoy aparece en el mercado ya es tecnología y diseño de ayer. Por lo tanto, una compañía que se esfuerza por conseguir un nivel de clase mundial usará todas las técnicas descritas en las secciones 2-1, 2-3, 2-4, y en el capítulo 21 por hacerlas, en su interpretación más amplia, parte de la cultura de la compañía. Éste es el objetivo de la *ciencia de la administración*, una disciplina multifacética fuera de nuestro alcance de investigación. También está sujeta a cambios rápidos y al nacimiento de técnicas nuevas, descritas por varios acrónimos. En efecto, el acrónimo MBF se ha acuñado para *administración por capricho*, una referencia para las muchas técnicas muy recomendadas que resultarán de poco valor a largo plazo.[1] No obstante, existen algunas técnicas y tendencias que han resistido la prueba del tiempo. Así, la ingeniería concurrente siempre se practicará para llevar nuevos productos al mercado en un tiempo mínimo. La prueba en el laboratorio será un proceso continuo para comparar procesos y prácticas contra el mejor en la industria, en un esfuerzo conjunto entre dos socios. El suministro justo a tiempo (JIT) implicará un esfuerzo continuo para eliminar la actividad sin valor agregado. Únicamente se producirá *lo* que se necesite *cuando* se necesite, brindando el tiempo de entrega más corto posible, con el mínimo de errores. El requisito para agilizar el proceso de producción con un inventario mínimo conduce a cambios con consecuencias sociales, como el agrupamiento de proveedores en localizaciones geográficas cercanas al ensamblador final. El resultado es la *manufactura esbelta*, un conjunto de prácticas que elimina todo el desperdicio del sistema de manufactura y produce un valor máximo con mínimos recursos (un concepto originalmente recomendado por Juran).[2]

La manufactura también debe responder a nuevas exigencias. Una tendencia claramente discernible es la adaptación a la medida de la producción en masa: en el caso de automóviles, aeroplanos e incluso computadoras, ahora los clientes esperan productos fabricados de acuerdo con sus deseos, pero a precios de producción en masa. Una respuesta es la *manufactura flexible* que, en su sentido más general, se relaciona con la habilidad para fabricar una variedad de productos con un costo efectivo y a tiempo. La *manufactura ágil* es más amplia: un esfuerzo de principio a fin de toda la empresa para ajustar operaciones y procesos en un entorno de cambio continuo e impredecible, capaz de una respuesta rápida a las exigencias del cliente, creando y produciendo productos de manera económica en lotes pequeños. Para lograr esta agilidad se recurre a la *manu-*

[1] *Enhancing Organizational Performance*, National Academy Press, Washington, D.C., 1997.
[2] J.M. Juran: *Juran on Leadership for Quality*, Free Press, Nueva York, 1989.

factura virtual, que es la aplicación integrada de la simulación, al modelado y al análisis para realzar
producción.

En el sentido más estricto, también hay competencia entre los enfoques técnicos. No existe una solución absoluta y eterna para cualquier problema de manufactura. Sólo se define la función del producto, e incluso ésta se redefine de manera continua. Para productos de función bien establecida, no sólo existe una competencia constante entre los diversos procesos y secuencias de procesos, sino también entre los varios materiales y procesos implícitos en la elección del material. La competencia se basa en servir para una función a un costo mínimo, de ahí que las consideraciones de costo siempre entren en la elección de los procesos de manufactura.

22-2 COSTOS DE MANUFACTURA

Al elegir un proceso de manufactura no se puede tomar una decisión, ni siquiera preliminar, sin considerar al menos los elementos principales del costo. Un análisis completo del *costo de manufactura* está fuera del alcance de este libro y aquí sólo se da un perfil aproximado.

22-2-1 Costo y productividad

En la manufactura, el *costo* suele manifestarse en una unidad monetaria por unidad de producción. La *productividad* es un término más difícil de definir. En la forma más sencilla, se considera el valor de la producción por empleado. Esta *productividad de la mano de obra* es útil como una medida muy general, pero no toma en cuenta el capital empleado para generar la producción. Este aspecto se ha hecho particularmente significativo con el incremento de la automatización. La *productividad del capital* (manteniendo fijas la calidad y cantidad de otras entradas) aumenta sólo si la eficiencia de los nuevos insumos de capital crecen más rápido que su precio. La productividad del capital es mucho más difícil de medir y, por lo tanto, más controversial que la productividad de la mano de obra. Lo que se aprecia con facilidad es que debe existir un *límite económico* sobre la automatización, en donde una inversión adicional produce *ingresos disminuidos* en términos de la reducción del costo.

Ejemplo 22-1

Para ilustrar estos puntos, será instructivo analizar un ejemplo tomado de la industria automotriz, con valores simbólicos en dólares que no tienen relación con la realidad presente. Más de la mitad de la masa total de un automóvil, en la producción actual, es aún de acero, la mayor parte en forma de piezas de lámina de metal trabajadas en prensa. Un ejemplo es el lienzo exterior de una puerta, que es un producto muy complejo con una curvatura poco profunda, un perfil exterior complicado y varios cortes.

Diversos modelos de automóvil de un solo fabricante comparten la misma puerta y la cantidad de producción de un modelo de 4 años, en un periodo usual, sumará varios millones de

Tabla 22-1 Comparación de las productividades y costos en una operación de trabajo de lámina de metal

	Producción en masa	Producción en lote
Producción, unidades	6×10^6	1.2×10^4
Valor generado, $	1.8×10^7	3.1×10^5
Número de operadores	9	5
Número de empleados	27	7
Productividad, unidades/operador	6.7×10^5	2.4×10^3
$/operador	2×10^6	6.25×10^4
Productividad, unidades/empleado	2.2×10^5	1.7×10^3
$/empleado	6.4×10^5	4.4×10^4
Desembolso de capital, total $	10×10^6	4×10^5
Amortización, $/año	4×10^6	8×10^4
Costo de las herramientas, total $	5×10^5	1×10^5
Amortización, $/año	3×10^5	4×10^4
Costo de los cambios de las herramientas, $/año	1×10^4	1×10^4
Costo de mano de obra, $/empleado	2×10^4	2×10^4
Total $/año	5.4×10^5	1.4×10^5
Costo de producción, $/año	4×10^6	8×10^4
	$+ \ 3 \times 10^5$	$+ \ 4 \times 10^4$
	$+ \ 1 \times 10^4$	$+ \ 1 \times 10^4$
	$+ \ 5.4 \times 10^5$	$+ \ 1.4 \times 10^5$
	4.85×10^6	2.7×10^5
Costo de producción, $/unidad	0.86	22.50
Costo del material, $/unidad	1.50	2.00
Costo total, $/unidad	2.36	24.50

NOTA: todos los valores son ficticios y no tienen ninguna relación con cualquier operación de un fabricante existente.

unidades para los automóviles producidos en masa. Esto justifica una línea de producción de propósito especial (una línea de transferencia), en la que varias prensas realizan la secuencia de operaciones requerida, con medios mecánicos para pasar la pieza de una prensa a otra. Con la necesidad creciente de una respuesta rápida a las exigencias del cliente, la línea estará equipada con juegos de matrices de cambio rápido. La línea estará atendida por unos pocos (digamos, tres) operadores en cada uno de los turnos y su productividad será elevada (tabla 22-1). Una medida aplicable de manera más general en la productividad de la mano de obra es el valor producido, y si se supone (sin justificación adicional) que el lienzo de la puerta vale $3.00 para el fabricante, la productividad se puede expresar en el valor producido por operador.

En el otro extremo de la escala, algunos automóviles de lujo se fabrican en pequeñas cantidades por compañías especializadas. Los costos del equipo y de las herramientas se tienen que reducir, por ejemplo, mediante técnicas de formado por estirado y deformado de piezas brutas por técnicas con bajo costo (como el realizado por caucho). La planta opera tal vez un turno y se puede suponer que cinco operadores producen los 4 000 lienzos de puerta requeridos por año.

Por supuesto, esto se dividirá en varios lotes repartidos en todo el año, y podemos suponer que se producen partes equivalentes durante el resto del tiempo para un total de 1.2×10^4 unidades por año. El lienzo de la puerta, en el mercado de lujo, cuesta ahora \$26.00 para el fabricante, y de nuevo se pueden calcular las productividades (tabla 22-1).

Cuando se comparan las productividades, ya sea con base en unidades o en dólares, parecería que no hay espacio para el automóvil producido en lotes en el mercado de lujo. Sin embargo, en nuestro cálculo se ignoraron varios factores importantes. Primero, los nueve operadores de la línea de transferencia están apoyados por un equipo de, digamos, 18 personas en mantenimiento, supervisión, control de calidad, programación y por varios niveles de administración. Los cinco operadores de la planta de producción en lote realizan algunas de estas funciones ellos mismos y sólo se apoyan en dos personas. Las productividades ahora cambian (tabla 22-1).

Estos números no revelan nada acerca de los *costos* o *ganancias*. Para ello, también se deben considerar los medios de producción. El capital se invierte en la compra de prensas y de equipo auxiliar, en su instalación y en los edificios y servicios requeridos. Este capital debe recuperarse en el periodo considerado desde que se tomó como base para la decisión de inversión. La recuperación anual real (amortización) depende de las tasas de interés, el tratamiento de impuestos y los procedimientos de contabilidad. El mismo argumento se aplica al costo de las herramientas, excepto que ésta debe recuperarse en un lapso más corto.

El *costo de producción* por unidad aún es muy diferente (tabla 22-1) entre la producción en masa y la de lote; además, la diferencia permanece cuando se agrega el precio del material (un poco mayor en la producción en lote debido a que se suman las pérdidas mayores en el formado y en el estirado por caucho). Después de deducir otros costos no tomados en cuenta en la tabla 22-1 (por ejemplo, mantenimiento de un inventario de piezas), se obtiene la ganancia para las dos operaciones.

Este ejemplo, aunque muy escueto, ilustra que siempre se deben considerar varios elementos de costo. También muestra que antes que se pueda hacer algún cálculo significativo, es preciso identificar el material de inicio y la secuencia principal de producción. También es obvio que el valor no está simplemente relacionado con la utilidad; el mercado tiene segmentos diferentes, cada uno con sus propios valores, así que el diseño del producto debe considerarlos.

22-2-2 Costos de operación (costos directos)

Los *costos directos* se pueden asignar claramente al producto y son proporcionales al número de unidades producidas.

Costos del material El *costo neto del material* es el costo de comprar la *materia prima* (ya sea una fundición, forja, sección o placa laminada, polvo metálico o cerámico, polímero, o cualquier otro material inicial), menos el valor del desperdicio producida. Así se determina el peso del material inicial comprado, W_0 (incluyendo la pérdida de peso en el recorte, etcétera), y de la pieza terminada, W_f. Si el precio unitario del material de inicio es C_0 y el del desperdicio es C_S (separado en desperdicio ligero y pesado si su valor de reventa difiere mucho), el costo por pieza del material, C_P, es

$$C_P = W_0 C_0 - (W_0 - W_f)\, C_S \qquad \textbf{(22-1)}$$

En general, un proceso que produce menos desperdicio, o que lo genera en una forma más valiosa (separado de acuerdo con su composición y por lo general más pesado), es más económico.

Costos de mano de obra Con una posible secuencia de proceso y un equipo apropiado establecidos, el *número y habilidad del personal de operación* también se puede predeterminar. De la experiencia, estudios de tiempo, o una división de las funciones del operador en elementos identificables de acción físicos y mentales, se calcula el tiempo necesario para terminar una pieza.

Hablando estrictamente, el *tiempo neto de producción* es el periodo durante el cual el material se conforma o procesa; de esta manera, en el maquinado (Secc. 16-7-5) el tiempo neto de corte t_c es el tiempo durante el que los materiales en realidad se remueven. Sin embargo, en otros procesos en donde el tiempo productivo verdadero sólo es una fracción de un ciclo mayor pero esencial, el tiempo de ciclo total suele considerarse como el productivo. Por ejemplo, en el trabajo de prensa el tiempo durante el que ésta se mueve en realidad (y no sólo se forma) se denomina como productivo.

Si el tiempo necesario para mover el material del piso a la máquina y viceversa se considera productivo o no, es un asunto de filosofía; un punto de vista más real de la productividad se tiene si se lo clasifica como no productivo. En el análisis del costo, normalmente aparece en el tiempo total o de piso a piso, y se costea con base en la tasa de la mano de obra directa, especialmente si el movimiento lo realiza personalmente el operador de la máquina herramienta.

Cuando los *costos de la energía* son una fracción significativa del costo total, éstos también se asignan directamente a las unidades de producción, al igual que las herramientas y matrices si se usan para ese propósito particular.

22-2-3 Costos indirectos

Como se analiza en el ejemplo de carga y descarga, la distinción entre el costo directo y el indirecto puede ser confusa.

Los *costos indirectos* se originan de las funciones y servicios que contribuyen al desempeño eficiente del proceso de producción. Suelen incluir: mano de obra indirecta (movimiento de material, servicios de limpieza, etc.), reparación y mantenimiento, supervisión (del supervisor al superintendente de la planta), ingeniería (manufactura e ingeniería industrial, control de calidad, laboratorio, etc.), investigación y desarrollo; ventas, toda la jerarquía de la administración de la compañía, iluminación y calefacción (y algunas veces todos los artículos y materiales no usados de manera directa en la producción), gastos de oficina y de venta, etc. Algunos son un poco flexibles y pueden variar con el volumen de la producción, pero la relación nunca es tan directa como con los costos de operación.

Si se controlan apropiadamente, las actividades indirectas representan una parte indispensable del esfuerzo total de producción. En el desarrollo último de un proceso de manufactura completamente automatizado, no habrá costo de mano de obra en el sentido clásico, pero, muchos de los costos indirectos, incluyendo la programación y otras actividades requeridas para la operación de un sistema de manufactura integrado por computadora, obviamente deben considerarse en relación directa con la produc-

ción. Similarmente, el desarrollo, e incluso la investigación a largo plazo, si se administra de manera adecuada, son una parte vital del proceso de producción, y se podría argumentar que incluso éstos se consideran costos directos.

Los costos indirectos también se denominan *generales* o, algunas veces, *carga*. A menos que se controlen apropiadamente, los costos indirectos se pueden convertir, en efecto, en una carga que finalmente nulifica las ganancias por productividad en la producción directa. Por lo tanto, es esencial la división de los costos indirectos en sus elementos, y éste es uno de los propósitos de la CIM, examinada en la sección 2-4. Con mucha frecuencia, el proceso de producción se analiza con cuidado, se mejora, y se hace más productivo, en tanto que el sector del costo indirecto crece fuera de toda proporción. Esto afecta a final de cuentas la posición competitiva de la compañía; así, el crecimiento descontrolado de los costos indirectos puede destruir una economía nacional.

En los estimados de costo de manufactura, el costo indirecto puede aparecer como un factor de multiplicación aplicado a los costos directos de mano de obra, como un costo fijo por producto unitario, o como un costo fijo por hora trabajada en una máquina. Sin embargo, esto puede ser demasiado confuso porque ignora el costo de las actividades indirectamente relacionadas con la producción. Como resultado, los productos sencillos producidos en masa por lo general se sobrecargan, en tanto que el costo de productos complejos se subestima. Esto se corrige con el *costeo basado en la actividad*, el cual condensa el costo de todas las actividades relacionadas con un producto.

22-2-4 Costos fijos

Los *costos fijos* incluyen los costos del equipo, edificios y de las instalaciones totales en general, tomando en cuenta la depreciación, intereses, impuestos y seguros. Para un desembolso dado de capital, los costos fijos dependen de las tasas de interés prevalecientes en el momento de la compra y durante la vida del equipo, el tratamiento de los impuestos según las inversiones y la vida útil de la instalación de producción. En general, la vida del equipo se puede prolongar, pero sólo a expensas de costos de mantenimiento que se elevan rápidamente y que conocen el peligro de obsolescencia; tarde o temprano se debe decidir un reemplazo.

En los estimados de costo de manufactura, los costos fijos se asignan con base en la utilización anticipada del equipo. Así, si una prensa se compró con la premisa de que se usaría en una operación de dos turnos, el costo fijo por producción unitaria se incrementa al doble si sólo se puede mantener un turno. A la inversa, el desembolso de capital para sistemas de manufactura flexibles normalmente justifica la operación de tres turnos, siete días a la semana, de esos sistemas. En el procedimiento de estimación más simple, el costo fijo aparece como una tasa por hora-máquina.

22-3 COMPETENCIA ENTRE LOS PROCESOS DE MANUFACTURA

Hemos visto varias veces que también existe competencia entre los procesos de manufactura. Al analizar varios procesos, se vio que cada uno tiene sus capacidades y limita-

ciones particulares (véanse las tablas 7-3, 9-1, 10-2, 11-2, 12-1, 14-1, 16-7 y 18-3). La forma de la pieza es, obviamente, un factor primordial (Secc. 3-1-1), y el agrupamiento en la figura 3-1 da una idea de los grados de complejidad.

También se vio que el tamaño máximo producible por cualquier técnica muy frecuentemente está limitado simplemente por la disponibilidad de equipo de gran tamaño. Sin embargo, en algunos procesos se encontraron limitaciones debidas a las condiciones del proceso mismo. Un molde de fundición quizá no soporte los tiempos de solidificación excesivos impuestos por paredes muy gruesas, un proceso de soldadura puede estar limitado a un espesor máximo de metal si sólo se permite la soldadura de una sola pasada, o el espesor de partes de plásticos se restringe a la baja conductividad térmica del material.

Sin embargo, con frecuencia los límites están en el tamaño o en el espesor de pared mínimo producible. Como la dificultad de llenar un molde o de deformar una pieza se incrementa con la distancia que el material debe moverse, el espesor de pared mínimo obtenible es una función del alcance (ancho) de la sección más delgada. En consecuencia, el espesor de pared de una fundición estaba limitado por la fluidez del metal (Fig. 7-28), y el de una forja por las presiones desarrolladas en la matriz, al elevar las razones *w/h* (Fig. 9-25). Las piezas más delgadas, más pequeñas y más grandes se pueden producir bien, pero por lo general bajo circunstancias especiales y a un costo extra.

En la sección 3-5-2 se estipuló que las tolerancias y el acabado superficial innecesariamente estrictos son una causa importante de costos excesivos de la manufactura. En la figura 3-22 se vio que varios procesos de manufactura son capaces de producir partes con un cierto acabado superficial y rango de tolerancias sin desembolso extra. Si se requieren tolerancias más estrictas o superficies más lisas que lo normal, el costo por lo general se eleva. Al tomar como ejemplo una parte forjada en caliente, el proceso se vuelve más estricto con un preformado más cuidadoso en varias cavidades de la matriz, usando una de acabado sólo para una cantidad limitada de trabajo, o con operaciones adicionales subsecuentes como el maquinado o el esmerilado. El diseñador consciente del costo especificará las tolerancias más amplias y las superficies más rugosas posibles que aún cumplan la función planeada. A menudo es necesario especificar tanto una rugosidad máxima como una mínima para el funcionamiento adecuado y/o facilidad de manufacturar la pieza.

Las industrias de manufactura han respondido a las presiones competitivas restringiendo las tolerancias, reduciendo los espesores mínimos de pared y a menudo mejorando la calidad sin elevar necesariamente el costo de sus productos.

22-4 COMPETENCIA ENTRE MATERIALES

El diseñador siempre tiene la oportunidad de considerar materiales alternos, como se vio con anterioridad en el capítulo 5. Algunas veces son posibles los ahorros sustanciales. Por ejemplo, los costos de maquinado pueden cambiar en varios órdenes de magnitud, como muestran los datos de la tabla 22-2 (las razones reales han cambiado con la aparición de herramientas recubiertas, pero la observación que se quiere hacer perma-

Tabla 22-2 Costos de maquinado relativos para una parte dada* (torneado, vida de la herramienta de 60 min)

Material	Dureza	Costo de maquinado
Al 7075-T6		10
Acero 1020	BHN 111	25
Acero inoxidable 410	BHN 163	40
Acero inoxidable 310	BHN 168	55
Ti-6Al-4V		75
Acero 4340	52 R_C	100
Inconel		170
Inconel 700 (envejecido)	BHN 400	340

*De *Profile Milling Requirements for Hard Metals 1965-1970.* Informe de la Ad Hoc Machine Tool Advisory Committee para el Department of the U.S. Air Force, mayo 1965.

nece válida). Si no hay otros costos de compensación o restricciones impuestas por los requisitos del servicio, pueden haber grandes ahorros si se cambia el material metálico.

La aparición de los plásticos de ingeniería (de alto rendimiento) dio una nueva dimensión a la competencia entre materiales. Primero los plásticos representaban retos para las aleaciones de zinc, aunque la industria de fundición de zinc en matriz tuvo éxito al mantener gran parte del mercado desarrollando métodos de fundición de pared delgada. En fechas recientes, los plásticos se han convertido en alternativas atractivas para partes de lámina de metal, fundiciones de aleaciones de zinc y aluminio, e hierro fundido. La competencia es particularmente intensa en el campo automotriz, donde la reducción de la masa es uno de los medios para disminuir el consumo de combustible. En sólo una década (de 1975 a 1985), la masa promedio de los automóviles estadounidenses se redujo de casi 1 720 kg a 1 230 kg; la masa del aluminio se incrementó de 10 kg a 60 kg por automóvil, y la de las piezas de plástico de 40 kg a 100 kg por automóvil. Las primeras aplicaciones se dieron en cuestiones obvias: tableros de instrumentos, accesorios interiores y otros componentes sin demandas de soporte de carga. Actualmente, las piezas estructurales como defensas, tanques de líquidos de frenos y algunas piezas de la carrocería también se fabrican de plástico. Aun dentro del campo del acero, ocurrieron cambios hacia un uso más extenso de HSLA y de lámina galvanizada.

Ejemplo 22-2

En el capítulo 1 se indicó que la manufactura es una de las fuentes principales de la riqueza de las naciones. Su desarrollo implicó grandes cambios sociales; además, un producto que ha tenido una enorme influencia es el automóvil. Por lo tanto, fue oportuno que la industria y el gobierno de Estados Unidos formaran la Asociación para una Nueva Generación de Vehículos (PNGV, ejemplo 5-6) con el objetivo de desarrollar un automóvil de tamaño mediano que, comparado con un modelo 1993 característico, consuma mucho menos combustible, cueste lo mismo y sea reciclable en un 80%. Una mayor eficiencia de combustible, menores emisiones, facilidad de reciclado y seguridad son metas técnicas, pero con implicaciones sociales obvias. Aunque el

programa se concentra en un vehículo usual de tamaño mediano, los hallazgos hechos tendrán una aplicabilidad mucho más amplia y finalmente beneficiarán a toda la humanidad.

Un factor clave para alcanzar estas metas es la reducción de 40% de la masa total del vehículo. A lo largo de este texto se establecieron ejemplos de cómo se pueden lograr estas metas con la aplicación tanto de tecnologías establecidas como de nuevas tecnologías. Hay una oportunidad limitada para reducir la masa de la planta de potencia y de la transmisión; así, una reducción significativa de la masa debe ser en la "carrocería en blanco" (la carrocería básica sin puertas, tapa de la cajuela y cofre). Ya se vieron varios enfoques. La iniciativa ULSAB logró la reducción requerida de masa (ejemplo 5-1) usando acero de alta resistencia (ejemplo 10-16), sustitución de material (ejemplo 18-11) y técnicas como prensado de piezas en bruto a la medida (ejemplos 10-12 y 18-9) e hidroformado (ejemplo 10-16). La meta también la logró Ford con un monocasco hecho en su mayor parte de aluminio, y por la General Motors con un monocasco de material compuesto con vidrio. Otra aproximación es manufacturar una armazón atornillable (con capacidad de carga y resistente a impactos) sobre la que se sujetan tableros metálicos o plásticos (esta técnica se emplea en la producción de los vehículos Saturn de la General Motors). La Armco Steel redujo la masa con una armazón de acero inoxidable, y la construcción únicamente de aluminio se utiliza en el vehículo eléctrico EV1 de General Motors y en el Boxter de Porsche. Una reducción adicional de masa puede darse en otros componentes. De esta manera un número creciente de bloques del motor y casi todas las cabezas de los cilindros se fabrican de aluminio. Chrysler está usando fundiciones de aluminio para las monturas de los motores en sus minicamionetas; la precisión dimensional se asegura mediante el enderezamiento automático, la libertad de porosidad a través de la inspección con rayos x al 100%. Los rines de las ruedas de aleación de aluminio se usan mucho; además, la aleación de magnesio gana popularidad en los rines y en algunas partes que se habían hecho de plástico.

22-5 IDENTIFICACIÓN DEL ENFOQUE ÓPTIMO

En la situación ideal de manufactura, la ingeniería concurrente asegura que el diseñador coopere con el ingeniero de manufactura. En conjunto aseguran que la pieza tenga características que la hagan eminentemente producible por medio de un proceso seleccionado y óptimo (*diseño para manufacturabilidad*). La selección del proceso se hace de acuerdo con un procedimiento formal.

En un enfoque, los miembros de un grupo se reúnen en una *sesión creativa*. La regla básica es que ninguna idea se considere como demasiado ridícula; no se permiten las críticas hasta que todas las ideas emerjan, y sólo entonces comienza el proceso de la reducción progresiva de alternativas. Los procesos que resisten las críticas concentradas se evalúan en detalle y finalmente se elige el óptimo, a menudo después de realizarse un escrutinio detallado realizado por estimadores y diseñadores que trabajan con CAD.

La misma función se lleva a cabo, pero en una forma mucho más organizada, por los *grupos de ingeniería de valor* dentro del equipo de ingeniería concurrente. Su tarea es revisar los requisitos funcionales y la facilidad de manufactura de la pieza, y asignar un valor a las funciones y procesos. La retroalimentación del grupo sirve para iniciar cambios en el diseño que facilitan la manufactura (incluyendo el ensamble). Además, los aspectos económicos también se analizan minuciosamente. No es extraño que, como resultado de análisis de valor, una pieza se vuelva a diseñar por completo, o que varias

piezas que forman un ensamble se conviertan en una sola unidad. Con el crecimiento del CAD/CAM, algunas de estas funciones se incorporan dentro de las actividades del grupo de diseño.

En muchas compañías pequeñas la situación es bastante diferente. El ingeniero o tecnólogo de manufactura quizá tenga que basarse en sus propios recursos, sin el beneficio de interacciones con especialistas en otros campos. Entonces existe un peligro real de aceptar la primera solución obvia, condicionada por la experiencia con un proceso dado. Como mínimo, el ingeniero de manufactura debe considerar alternativas en una "sesión creativa" consigo mismo. La disponibilidad de paquetes CAD de bajo costo y el acceso cada vez mayor a bases de datos computarizadas mejora en gran medida la situación.

En muchos casos, una compañía realiza sólo operaciones de ensamble, o sólo posee instalaciones de maquinado de su propiedad. La materia prima se compra en forma de forjas, fundiciones, piezas estampadas de lámina de metal, molduras de plástico, y productos semifabricados como barras, tubos, perfiles, placa y lámina. Así el departamento de compras cumple una función vital, y transmite la información a los proveedores; con frecuencia también actúa como un intermediario entre el diseñador (o especialista de manufactura) y el proveedor. La identificación de métodos alternos de producción y la localización de los proveedores con capacidad apropiada es esencial. Sin una coordinación adecuada entre compras y manufactura, la parte es a menudo "separada del sólido". Aunque hay casos en los cuales este enfoque es en efecto la más económica, siempre se deben explorar las alternativas.

Primero, uno supondría que el diseñador obtuvo todas las ventajas de los innumerables componentes estandarizados y semiestandarizados obtenibles de los productores especializados, quienes emplean técnicas de producción en masa y pueden garantizar la más alta calidad al menor costo. Tornillos, remaches, chavetas, resortes, empaques, sellos, cojinetes, engranes, etcétera, se encuentran disponibles en casi cualquier tamaño y material justificable, y rara vez se deben fabricar a la medida.

Segundo, las partes geométricamente similares con frecuencia se pueden producir idénticas sin sacrificar el desempeño funcional, o en una familia adecuada para el tratamiento por tecnología de grupo (Secc. 3-1-2).

Tercero, al especificar materiales, se debe considerar la función así como la facilidad y el costo de manufactura. Una buena decisión sólo es posible si la función real de la pieza se conoce y no se imponen restricciones innecesarias.

Ejemplo 22-3

El análisis precedente ha mostrado que, con más frecuencia que la que se piensa, varios procesos son candidatos potenciales para producir cualquier pieza. En efecto, muchos de estos procesos coexisten para la manufactura de piezas que cumplen los requisitos de las especificaciones (diseño) del producto. Esto es en particular válido para piezas con forma relativamente poco compleja, como se demuestra en el ejemplo de la pieza con forma de carrete en la figura 22-1 (forma T2, Fig. 3-1). Las opciones dependerán en gran medida del material, el tamaño, las tolerancias y el volumen de producción.

Para propósitos ilustrativos, suponga que la pieza se fabrica de un material ferroso, con una resistencia mínima a la tensión de 280 MPa (40 kpsi); la ductilidad no es una preocupación mayor. Primero tome las dimensiones siguientes: diámetro del agujero 50.00 mm, espesor de

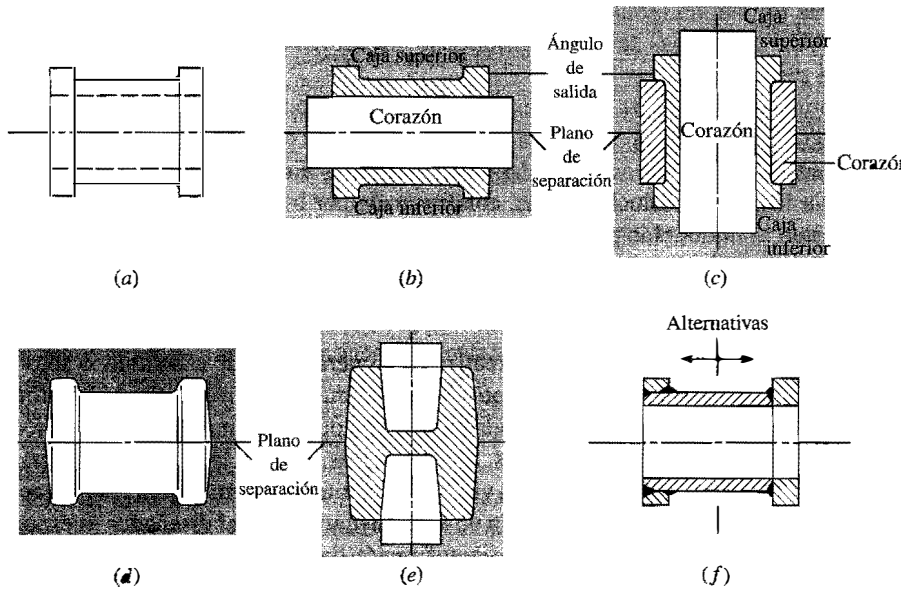


Figura 22-1 Algunos métodos posibles para producir una parte en forma de carrete: (a) maquinado de una barra o tubo, (b) fundición en una posición horizontal, (c) fundición en una posición vertical, (d) forjado en una posición horizontal, (e) forjado en una posición vertical y (f) soldadura.

pared 2.50 mm, diámetro de la brida 75.00 mm, ancho de la brida 10.00 mm y longitud total 100.00 mm. Las tolerancias de ±0.025 mm se aplican sólo al diámetro del agujero y a la longitud total. Para un rango de tolerancia de 0.05 mm sobre una dimensión de 25 mm, la figura 3-22 indica que solamente una operación de maquinado puede proporcionar la calidad requerida. Esto se aplica aún más a las dimensiones mayores de la pieza. Como el acabado maquinado se necesita sin importar el método de manufactura, hay gran libertad al elegir el proceso inicial para crear la forma.

1. La forma es adecuada para el torneado (tabla 16-7). El maquinado a partir de una barra sólida (Fig. 22-1*a*) provoca una pérdida de recorte de 6 mm y la utilización del material sólo es del 18%. Iniciando con un tubo (mucho más costoso) de 46 mm de diámetro interior, la utilización del material sólo se incrementa ligeramente a 25%.

2. La fundición es viable por medio de todos los procesos de molde desechable (tabla 7-3). El vaciado en posición horizontal requiere un núcleo cilíndrico barato (Fig. 22-1*b*). Con una holgura de maquinado de 2 mm en todas las superficies, el espesor de pared es de 6.5 mm; esto toma en cuenta una posible excentricidad del núcleo. Este espesor debe alimentarse sobre una distancia de 76 mm; de acuerdo con la figura 7-28, esto puede hacerse posible incluso para una fundición de acero, pero en vista de los modestos requisitos de resistencia, un hierro fundido nodular será suficiente. La utilización del material se incrementa 37%.

3. El vaciado en posición vertical (Fig. 22-1*c*) complica el molde, pero permite la alimentación desde el fondo. En vista del tamaño pequeño de la pieza, el beneficio difícilmente vale el costo.

4. Si la demanda de resistencia aumentara hasta el punto en que el hierro fundido fuera insuficiente y, especialmente si la pieza se somete a carga por fatiga, se podría considerar un grado mayor de hierro nodular o acero fundido. El forjado también llega a ser otra alternativa. El forjado en posición horizontal (Fig. 22-1*d*) ahorra poco material y la rebaba se forma en una posición donde las líneas de flujo crean una debilidad potencial bajo una carga rotatoria axial.

5. El forjado en posición vertical (Fig. 22-1*e*) proporciona una escasa utilización del material y la orientación de la fibra aún no es óptima. Si se realiza en una máquina horizontal de forjado se crea una pieza con un flujo de material favorable, muy cercano a la pieza terminada, y las holguras de maquinado se podrían reducir. Sin embargo, se requerirían herramientas muy costosas con un inserto deslizante.

6. La metalurgia de polvos por medio del prensado en matriz se podría usar para producir un tubo, con un diámetro exterior igual al diámetro de la brida y un diámetro interior al agujero menos la holgura de maquinado. Como hay bridas en ambos extremos, el diámetro exterior no se puede prensar directamente, así que la economía del proceso es dudosa. El prensado isostático en un molde deformable sería mucho más cercano a la forma final. El moldeo por inyección de polvo podría producir una pieza con forma neta, pero el ahorro es dudoso para una pieza tan grande y sencilla.

7. En principio, la pieza se puede producir soldando un anillo (Fig. 22-1*f*, izquierda) o una brida (Fig. 22-1*f*, derecha), aunque se requeriría un maquinado de acabado, de modo que es muy improbable que este método sea competitivo.

La elección final se reduce al maquinado del sólido para la producción de un lote pequeño, y a la fundición o recalcado horizontal para grandes volúmenes de producción. El presupuesto cambiaría si la pieza fuera mucho más larga, pero con la misma brida: el recalcado de los extremos de tubo o el soldado de bridas a un tubo sería mucho más atractivo.

Incrementar el diámetro de la brida a 100 mm cambiaría la evaluación. El maquinado desde una barra resulta en una utilización de 18% del material y no vale la pena considerar un tubo de pared gruesa. La fundición se convierte en un claro favorito con una utilización del material de 56%. El recalcado horizontal de la brida de 56 a 100 mm de diámetro es posible, pero puede agotar la capacidad del proceso (el material se debe reunir en varias cavidades). Si la longitud de una pieza con la brida mayor se incrementara, la opción de maquinado sería aún menos favorable. La fundición aún es atractiva. El trabajo de recalcado horizontal es viable sólo hasta una cierta longitud (a menudo, una razón longitud-diámetro del agujero menor de 4), aunque es posible forjar un carrete sólido. El ensamble con soldadura puede ser el más económico, dependiendo del costo de la tubería. El tubo estirado en frío eliminaría la necesidad del maquinado del agujero, a condición que la soldadura se realizara sin causar distorsión o pérdida de las propiedades.

En general, el rango de las operaciones del proceso se estrecha al aumentar la complejidad de la forma, y como se muestra en el ejemplo anterior, incrementando las diferencias de las dimensiones de varias porciones de las piezas. Entonces quizá sea necesario regresar a la etapa de diseño y considerar geometrías y opciones de materiales alternos. El número de procesos posibles se eleva en gran medida si se quitara la restricción en el material (aleación ferrosa) y si el criterio de la resistencia se relajara, puesto que tanto los materiales no ferrosos como los plásticos reforzados serían candidatos viables.

Ejemplo 22-4

Un tanque de almacenamiento cilíndrico de aceite no presurizado de $D = 750$ mm de diámetro y $L = 2\,000$ mm de longitud se fabrica de placa de acero dulce de 5 mm de espesor. El diseño (Fig.

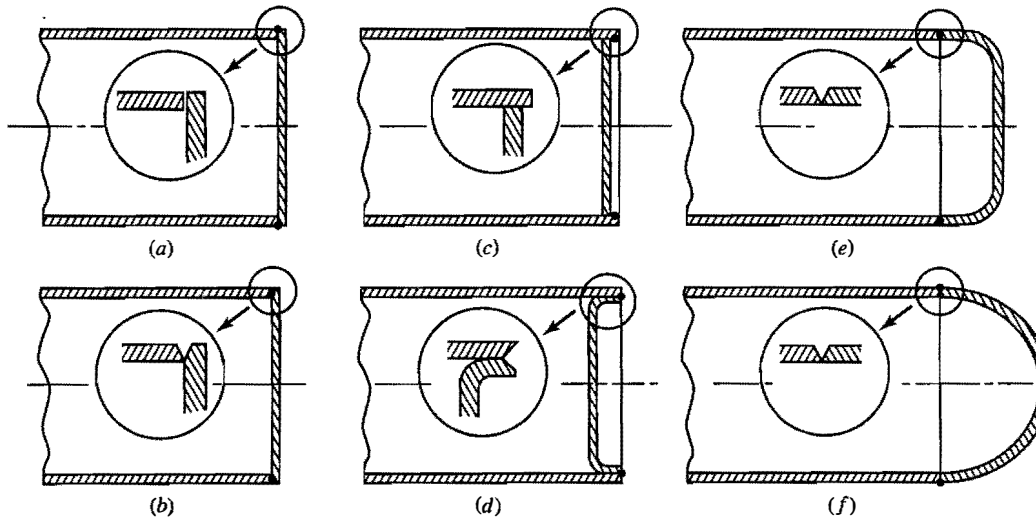


Figura 22-2 El diseño de un recipiente tiene implicaciones para la facilidad de la manufactura.

22-2*a*) prescribe soldar discos planos en los extremos de un cuerpo cilíndrico. (Ignoraremos los aditamentos de llenado y drenado.)

El cuerpo cilíndrico se puede hacer por medio del doblado con tres rodillos con una costura longitudinal soldada. La soldadura necesaria para cerrar los extremos es desfavorable, puesto que la penetración total del espesor es difícil y la separación remanente actuaría como un concentrador de esfuerzos (sin embargo, se podría cuestionar la necesidad del espesor de pared prescrito, dependiendo del soporte de la estructura). El chaflanado (Fig. 22-2*b*) es útil, pero requiere tornos muy grandes e implica un gasto extra. Si se cambia el diseño a discos colocados en los extremos del cuerpo facilita la soldadura, aunque todavía hay concentraciones altas de esfuerzos (Fig. 22-2*c*). La soldadura de partes de igual espesor siempre es preferible; si las cantidades de producción lo requieren, los extremos convexos (producidos por repujado o estirado sin un sujetador) se podrían prensar en los extremos para asegurar espesores iguales de pared (Fig. 22-2*d*; note, sin embargo, que aún existe separación). Los extremos en domo permiten soldaduras circunferenciales y, si la penetración es completa, no hay concentradores de esfuerzos (Fig. 22-2*e*).

La tarea es mucho más abierta si en los requisitos del diseño simplemente se exige un recipiente de almacenamiento. Supongamos que es para agua; entonces, dependiendo de la calidad del agua, la corrosión del acero dulce podría ser un asunto serio, agravado por la corrosión potencial de la grieta si las soldaduras dejan separaciones pequeñas en el interior. La protección con una capa de esmalte es viable pero podría ser muy costosa, a menos que se justifique por otras necesidades. Para el almacenamiento de agua, un recubrimiento plástico se podría aplicar por medio del moldeo rotario. El acero inoxidable austenítico sería justificable si el tanque formara parte de un sistema de procesamiento de alimentos. En forma alterna, un tanque de plástico merece ser considerado; un tanque no reforzado tendría que tener paredes gruesas, y un compuesto reforzado con fibra de vidrio es una elección más probable.

La situación cambia completamente si los contenidos están presurizados. Para una presión interna de 3 MPa, los espesores de pared con acero dulce se deben incrementar a 8 mm, y los

extremos se tienen que hacer con forma de domo (por ejemplo, hemisféricos, Fig. 22-2*f*). En este espesor, los domos muy probablemente se repujarán y los bordes se recortarán y achaflanarán. El cuerpo cilíndrico debe tener el mismo espesor y es factible la soldadura circunferencial después de la preparación del borde.

La naturaleza muy abierta del problema indica que ésta es una tarea de un equipo de ingeniería concurrente, especialmente si el tanque se producirá en grandes cantidades.

Ejemplo 22-5

En el ejemplo 7-9 se introdujo una pieza genérica (una brida) como fundición. Luego se examinó para la producción por forjado (ejemplo 9-23), por trabajo de lámina de metal (ejemplos 10-14 y 10-15) y por metalurgia de polvos (ejemplo 11-8 y problema 11C-6), y se consideró el maquinado (problemas 16B-20 y 16C-6). En forma colectiva, estos ejemplos mostraron con algún detalle los pasos a seguir. Si las alternativas de producción se consideraran sólo por una persona, sin el beneficio de consultar a otras, existe el peligro de descartar alternativas rentables. Esto se evita siguiendo el *proceso de eliminación*; es decir, primero se consideran todas las alternativas, se descartan las imposibles, y luego se concentra en las posibles. La tarea en realidad es más difícil para una pieza de forma muy sencilla porque la elección final dependerá de un análisis económico bastante detallado.

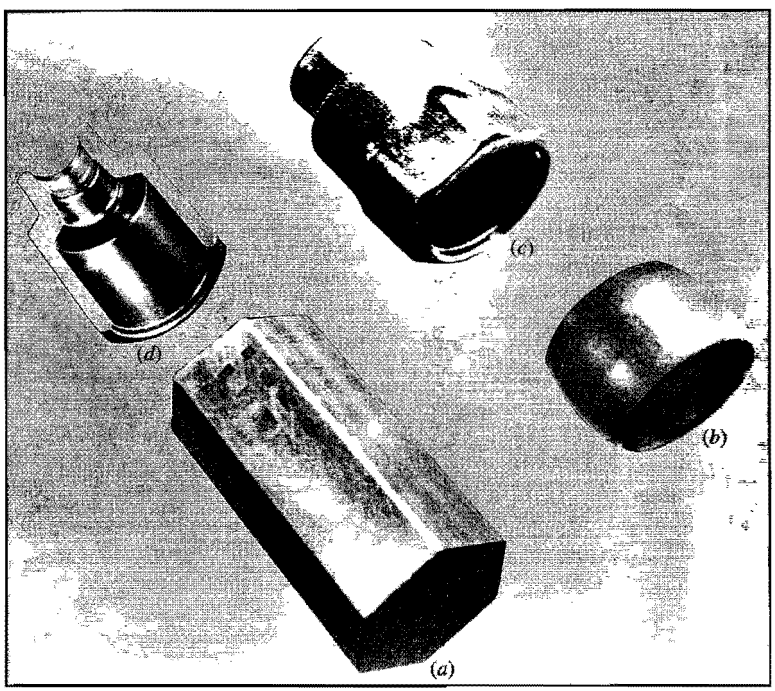


Figura 22-3 El ahorro logrado al cambiar el método de manufactura se ilustra en el cuerpo de una bujía. (*a*) Originalmente se fabricaba por maquinado a partir de una barra hexagonal; ahora (*b*) una pieza de trabajo redonda se recalca y (*c*) se extruye en frío en una concha de (*d*) pared delgada, para un ahorro de material de 70%. (*Cortesía de la Braun Engineering Co., Detroit, Michigan.*)

Ejemplo 22-6

El ahorro obtenible mediante un cambio radical en los procesos se muestra en la figura 22-3. Los cuerpos de las bujías se fabrican de acero de bajo carbono y se necesitan decenas de millones. Por lo general se maquinaban de una barra hexagonal, en máquinas automáticas para tornillos, con un cuerpo terminado cada 4 o 6 segundos. Gran parte del material se convertía en viruta de bajo valor (a menudo sólo un vigésimo del precio de la barra). El proceso ya no fue competitivo cuando la introducción del sistema de lubricación de fosfato-jabón permitió la extrusión en frío del acero. El material de inicio es alambre redondo (barra), cizallado y recalcado en frío (preformado) en una cabeceadora en frío a una tasa de 250 a 400 por minuto para formar una pieza de trabajo que, después de la aplicación del sistema de fosfato-jabón, se extruye en frío a 160/min en un solo golpe. (Muchos cuerpos también se forman progresivamente en frío a tasas similares.) El cuerpo se termina, a 60/min, con maquinado mínimo, ahorrando 70% del material que antes se usaba.

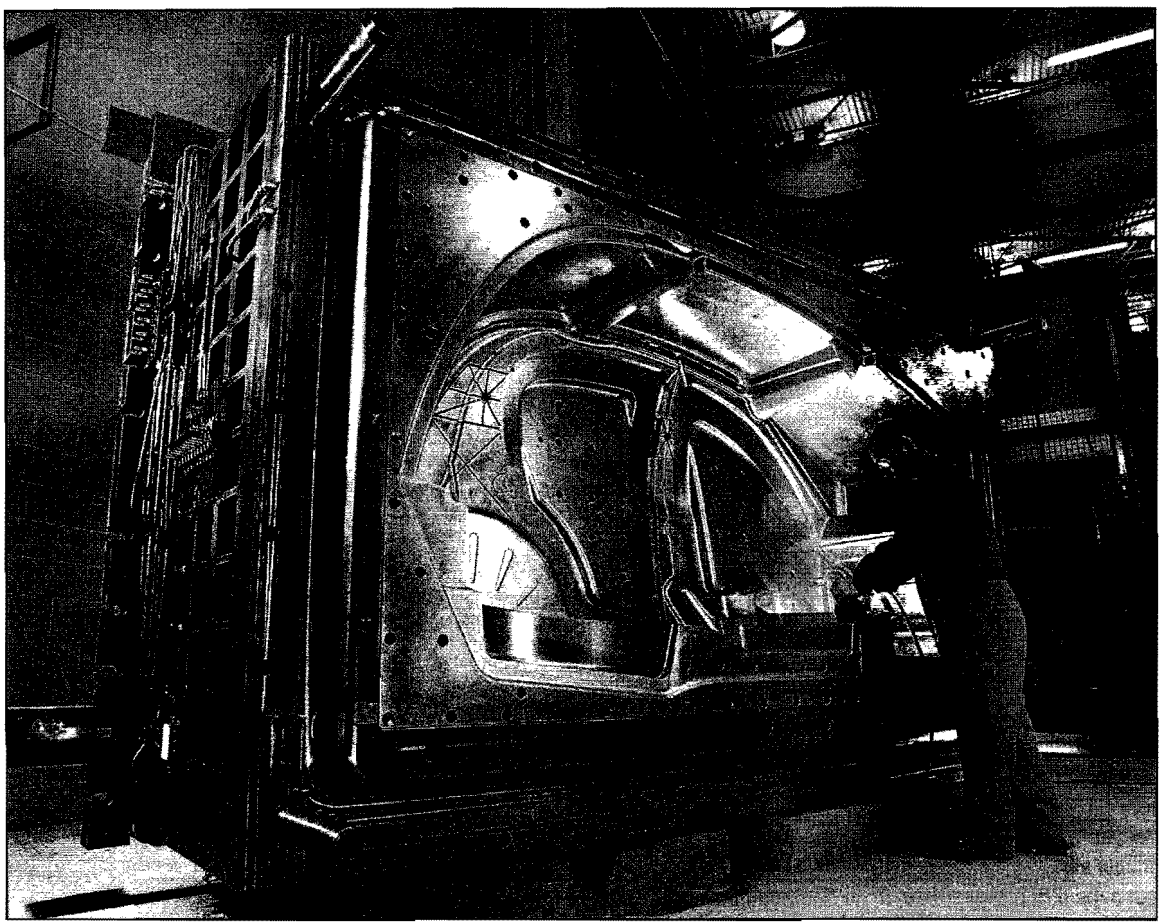


Figura 22-4 Puliendo el molde para el moldeo por inyección del cuerpo del Chrysler Composite Vehicle, que se muestra en la fotografía de apertura del capítulo 15. *(Cortesía: Nickel Tooling Technology, una división de Weber Manufacturing, Midland, Ontario.)*

Ejemplo 22-7

La manufactura de moldes y matrices es uno de los elementos principales del costo en los procesos de formado y moldeo. Un ejemplo de ahorro de tiempo y de costo alcanzable por medio de atajos en procesos lo proporciona el proceso de deposición al vapor de níquel (NVD). Como se indicó en las secciones 11-2-1 y 19-7, el níquel puro se obtiene de su carbonilo de acuerdo con la ecuación (19-6). En lugar de producir un polvo, el níquel se puede depositar directamente sobre el positivo (mandril) de la forma que se va a moldear. El mandril se fabrica de cualquier metal, de preferencia de una aleación de aluminio altamente maquinable. Se coloca en una cámara presurizada a 177°C; el níquel se deposita átomo por átomo del gas carbonilo a 0.25 mm/h. La concha formada de esta manera se puede endurecer a HRC 38-42 agregando diborano (B_2H_6) durante la deposición. Se separa fácilmente del mandril de modo que es posible producir conchas múltiples sobre este mismo mandril. La superficie puede ser altamente pulida, y empleando técnicas especiales, se reproducen con fidelidad detalles superficiales complejos y auténticos que asemejen las superficies de cuero o madera.

La concha retirada se puede reforzar con un armazón de tubo de cobre, acero o acero inoxidable para proporcionar calentamiento o enfriamiento. Los epóxicos rellenos con metal, el concreto, las soldaduras de acero o las fundiciones de aluminio se utilizan separadamente y en varias combinaciones para dar apoyo estructural a la concha de níquel (Fig. 22-4). Una guía completa del diseño (*Design Manual for NVD Nickel Shell Molds*) está disponible en *Industrial Research and Development Institute*, Midland, Ontario. (Fuente: Nickel Tooling Technology, una división de Weber Manufacturing Limited, Midland, Ontario.

22-6 RESUMEN

Para que una compañía sobreviva, debe adoptar prácticas que le permitan competir en la economía global. Debe aprender a crear máximo valor con mínima entrada, responder rápidamente a las demandas cambiantes del cliente, y llevar al mercado productos nuevos en el tiempo más corto posible con la mayor calidad. La base para todo ello es la ingeniería concurrente. En el sentido más amplio, un equipo de ingeniería concurrente sopesará todas las implicaciones de las decisiones de ingeniería. En una concepción más estricta, el diseño del producto procederá con la completa apreciación de los procesos de manufactura.

En este libro nos concentramos en los principios que subyacen a los procesos unitarios de la manufactura. También se indicó, aunque en un sentido mucho más general, cómo estos procesos se pueden conjuntar en un sistema viable. Se recalcó la importancia de mantener una mente abierta, ya que una pieza con una función dada a menudo se fabrica mediante varias técnicas, partiendo de materiales diferentes. Se mostró cómo el diseño se puede adaptar a las capacidades y limitaciones del proceso, y se establecieron los cambios menores en el diseño que pueden mejorar en gran forma la factibilidad y la economía de manufactura. Como mínimo, el conocimiento adquirido aquí permitirá la participación activa en un equipo de ingeniería concurrente. En la situación menos que ideal, donde un diseñador de un producto debe trabajar sin el apoyo de un equipo, aún es necesario que esté consciente de las implicaciones de la manufactura mientras se esfuerza para satisfacer los requisitos funcionales. Esto exige familiaridad con los procesos y disposición para analizar el diseño con los especialistas de manufactura. Cada vez más, muchas de las alternativas se sopesan con la ayuda de software especializado,

pero sigue siendo esencial la relación con los procesos para el uso adecuado de dichos programas. Siempre vale la pena considerar algunas reglas básicas:

1. Especificar la tolerancia más amplia y el acabado superficial más áspero que satisfagan los requisitos funcionales.
2. Someter el diseño a un análisis de valor, formal o informalmente. Iniciar con las funciones reales, eliminar todas las restricciones innecesarias y buscar alternativas con la colaboración temprana de personal con conocimiento de varias técnicas de manufactura (en oposición a especialistas de un solo campo).
3. Recordar que un cambio aparentemente menor en la forma, espesor de pared o radio puede convertir a la pieza en adecuada para la manufactura con una técnica diferente, más económica.
4. Analizar la relación de las piezas en conjunto; bien puede suceder que varias piezas sean más fáciles de producir como unidad individual.

La manufactura es una mezcla peculiar de ciencia, arte y economía, con implicaciones sociales muy amplias. No sería razonable esperar que los diseñadores o ingenieros de manufactura consideren formalmente todos estos elementos cuando se toma una decisión de detalle. El punto de vista amplio debe, no obstante, guiar la aproximación general a la profesión; sin bases científicas bien fundadas, la manufactura permanece como una colección de innumerables reglas aisladas; sin sentido práctico ni económico, la mejor teoría e investigación fallarán y no harán impacto, y sin una atención consciente a la calidad y al costo, el producto y el proceso mejor diseñados perderán contra la competencia.

PROBLEMAS

22-1 Un componente cilíndrico, fabricado de acero tratado térmicamente, falla en servicio por fatiga. El análisis de laboratorio revela la presencia de esfuerzos superficiales residuales de tensión. Describa los métodos que cambiarían los esfuerzos residuales a esfuerzos de compresión, suponiendo que la causa original de los esfuerzos de tensión superficiales no se puede eliminar.

22-2 Trace el sistema coordenado de la figura 3-22 sobre papel transparente, luego dibuje una línea que corresponda a una tolerancia de 20 R_a. De la figura 3-22 juzgue si un acabado superficial 0.4 μm R_a especificado para una chumacera de 25.00 ± 0.01 mm de diámetro se puede producir (*a*) por esmerilado y (*b*) por estirado en frío. (*c*) Si la respuesta a (*a*) y/o (*b*) es afirmativa, ¿es razonable el acabado superficial elegido? (Refiérase a la línea dibujada arriba.)

22-3 Reúna al menos tres tipos de latas de metal, seleccionadas de entre envases para bebidas efervescentes, jugos de frutas, alimento para bebés, carne enlatada y sardinas. Asegúrese que tenga muestras de envases de dos y tres piezas. Córtelos cuidadosamente (protegiendo su mano) e investigue su estructura. Escriba un ensayo que describa su método de manufactura deducido de la evidencia disponible; para apoyar su análisis, cite los números de figura

relevantes de este texto. (Éste es una extensión del problema 10B-18, y ahora incluye los métodos de unión de la lata.)

22-4 Inspeccione cuidadosamente las tapas de las cajuelas de al menos dos automóviles. Escriba un reporte breve con sus juicios sobre (*a*) cómo se hicieron la tapa y el miembro interior de refuerzo, (*b*) cómo se unieron y (*c*) si se aplicó amortiguador de sonido. (*d*) Presione sobre la tapa; analice cómo se formó la tapa para mayor rigidez.

22-5 ¿Qué procesos y materiales podría imaginar para fabricar (*a*) un cilindro para gas de alta presión, (*b*) un cartucho de CO_2. (*c*) Sugiera otros 3 procesos y materiales viables si la pieza tuviera la forma F5 (Fig. 3-1), sin necesidad de mantener presiones internas.

22-6 Se van a cortar círculos de 300 mm de diámetro de una placa de acero al bajo carbono de 10 mm de espesor. (*a*) Elabore una lista numerada de todos los procesos potenciales que usted pueda identificar en este libro. (*b*) Clasifique los procesos con base en la calidad de la superficie del corte (si dos son similares, asigne la misma clasificación). (*c*) Elija el que parezca más económico para una rapidez de producción de 10 000 piezas/mes, sin requisitos especiales respecto a la superficie del corte. (*d*) Elija los procesos que parecen ser económicos para una rapidez de producción de 500 piezas/mes y una superficie perpendicular del borde; clasifíquelos en orden de la calidad anticipada.

22-7 Se ha dicho que el cliente no compra una broca sino la expectación de un agujero. (*a*) Enumere todos los métodos que usted pueda pensar para hacer agujeros (la calidad y cantidad de producción no se especifican). (*b*) Establezca (por número) los métodos adecuados para hacer agujeros pasados de 50 mm de diámetro en una placa de aleación de Al 7075-T6 de 20 mm de espesor y juzgue su conveniencia asignando un orden de preferencia (si dos o más métodos son iguales, asígneles la misma preferencia). Justifique con afirmaciones breves (pobre superficie, costoso, desgaste rápido de la herramienta, etc.).

22-8 Repita el problema 20-7*b* para una lámina de 2 mm de espesor, pero con un agujero de forma irregular, en cantidades pequeñas.

22-9 Repita el problema 20-7*b* para un agujero de 1 mm de diámetro en una superaleación de 20 mm de espesor (Hastelloy X).

22-10 Repita el problema 20-7*b* para un agujero de 50 mm de diámetro en (*a*) un termoplástico de 2 mm de espesor y (*b*) un termoplástico reforzado con fibra de vidrio.

22-11 Repita el problema 20-7*b* para un agujero de 5 mm de diámetro en alúmina de 2 mm de espesor.

22-12 Liste todos los materiales y métodos para producir polveras de rines automotrices (la pieza terminada debe tener una apariencia metálica). Si el método requiere varios pasos de manufactura (incluyendo tratamiento superficial), indique la secuencia.

22-13 Obtenga dos muestras de cada tornillo tipo Allen y de tornillos de cabeza indentada y ranurada. Con la ayuda de una lupa o, de preferencia, un estereomicroscopio, analice las cabezas para hallar evidencias del método de manufactura. Informe de sus hallazgos, incluyendo cualquier defecto descubierto, de manera profesional.

22-14 Lleve a cabo las tareas descritas en el problema 22-13, pero reúna seis tornillos autorroscantes diferentes e incluya la parte roscada en su investigación. Si dispone de instalaciones, monte los tornillos en plástico y corte secciones longitudinales. Ataque químicamente para revelar las líneas de flujo. Note cualquier defecto que pueda estar presente y saque conclusiones respecto a sus efectos posibles en el desempeño de los tornillos.

22-15 Realice las tareas del problema 22-13, pero en seis tornillos para madera.

22-16 Haga una encuesta sobre los productos que se utilizan para poner en el mercado líquidos en unidades aproximadamente de 1 litro. Describa por lo menos cinco productos, identificando los materiales de construcción y los métodos probables de manufactura.

22-17 Se van a producir en masa engranes rectos ligeramente cargados de 50 mm de diámetro y

3 mm de espesor, con 50 dientes. Sugiera todos los métodos viables si el material es (*a*) acero, (*b*) una aleación de aluminio, (*c*) una aleación de zinc, (*d*) latón, (*e*) nailon o (*f*) resina fenólica. Para cada material, indique el proceso candidato más probable.

22-18 Los productos para recreación, como los palos de golf, a menudo precisan materiales y procesos de tecnología de punta. Sugiera tantos materiales como le parezcan aplicables para producir el vástago; para cada material, determine la secuencia probable de los pasos de manufactura.

22-19 Se fabrican engranes pequeños de una aleación de aluminio por medio de piezas brutas convencionales. Indique todos los procesos para la remoción de rebabas.

22-20 De la información disponible en este libro, analice el método por el cual se puede fomentar el crecimiento de hueso en los implantes de la junta de cadera.

22-21 Sugiera al menos tres enfoques para fabricar el casco de un bote de remo de 3 m de longitud.

22-22 A partir de la información contenida en este libro, sugiera formas para elevar la temperatura de operación permisible para álabes de turbina (considere materiales, procesos de manufactura y recubrimientos superficiales).

22-23 Las láminas nervadas tienen una rigidez deseable en dirección longitudinal. Haga una tabla para listar todos los procesos aplicables si las nervaduras son (en la columna 1) ahusadas, (en la columna 2) rectangulares y (en la columna 3) en forma de T. En filas separadas, muestre los procesos relevantes para (*a*) una aleación de Al 6061, (*b*) acero 4140, (*c*) epoxi reforzado con fibra de vidrio. (Las nervaduras deben ser integrales con la base.)

LECTURAS ADICIONALES

Brimson, J.A.: *Activity Accounting*, Wiley, 1997.

Brown, J.: *Value Engineering: A Blueprint*, Industrial Press, 1992.

Cosumano, M.A.: *Thinking Beyond Lean*, The Free Press, 1998.

Creese, R.C., M. Adithan y B.S. Pabla: *Estimating and Costing for the Metal Manufacturing Industries*, Dekker, 1992.

Ernst and Young Guide to Total Cost Management, Wiley, 1992.

Mahoney, R.M.: *High-Mix Low-Volume Manufacturing*, Prentice Hall, 1997.

Meyers, F.E.: *Motion and Time Study for Lean Manufacturing*, Prentice Hall, 1998.

Miller, J.: *Activity-Based Management*, Wiley, 1995.

Miller, J.G.: *Benchmarking Global Manufacturing*, Irwin, 1992.

Montgomery, J.C. y L.O. Levine (eds.): *The Transition to Agile Manufacturing*, ASQC Quality Press, 1996.

Murphy, S.: *The Fat Firm*, McGraw-Hill, 1997.

Niebel, B. y A. Freivalds: *Methods, Standards, & Work Design*, 10a. ed., McGraw-Hill, 1999.

Oleson, J.D.: *Pathways to Agility: Mass Customization in Action*, Wiley, 1998.

Shunta, J.P.: *Achieving World Class Manufacturing Through Process Control*, Prentice Hall, 1995.

Vollman, T.E.: *Manufacturing Planning and Control Systems*, Irwin, 1997.

Womack, J.P., D.T. Jones y D. Roos: *The Machine That Changed the World*, Simon & Schuster, 1990.

Womack, J.P. y D.T. Jones: *Lean Thinking*, Simon & Schuster, 1996.

apéndice
A

Factores de conversión de unidades inglesas convencionales (USCS) a unidades métricas (SI)

	Para convertir de unidades USCS			Para obtener la Unidad SI	
Cantidad	**Símbolo**	**Nombre**	**Multiplicar por**	**Símbolo**	**Nombre**
Longitud	in	pulgada	* 25.4	mm	milímetro
	ft	pie	*0.3048	m	metro
Área	in^2	pulgada cuadrada	$*6.4516 \times 10^{-4}$	m^2	
Volumen	in^3	pulgada cúbica	1.639×10^{-5}	m^3	
	gallon	galón estadunidense	3.785×10^{-3}	m^3	
Tiempo	min	minuto	*60	s	segundo
Velocidad	ft/min		$*5.08 \times 10^{-3}$	m/s	
Masa	lb	libra	0.4536	kg	kilogramo
	ton	tonelada corta	0.9072	tonne	tonelada (Mg)
Aceleración	ft/s^2		*0.3048	m/s^2	
(gravitacional)	(32 ft/s^2)		*(9.80665)	m/s^2	
Fuerza	lbf (o lb)	libra fuerza	4.448	N	newton
	tonf	tonelada fuerza (2 000 lb)	8.9	kN	
	kgf	kilogramo fuerza	*9.80665	N	
Esfuerzo (presión)	lbf/in^2	psi	6.895×10^3	Pa	Pascal (= N/m^2)
	ksi (o kpsi)	1 000 psi	6.895	MPa	(o N/mm^2)
	torr	mm Hg	133	Pa	
Par de torsión (trabajo)	lbf · ft	libra-pie	1.356	N · m	Newton-metro
Energía (trabajo)	Btu	unidad térmica británica	1 055	J	joule (= N · m)
	cal	caloría gramo	*4.1868	J	
Potencia	hp	550 ft · lb/sec	*746	W	watt (= J/s)
Viscosidad	P	poise (dina · s/cm^2)	0.1	Pa · s	(o N · s/m^2)
Intervalo de temperatura	°F	grado Fahrenheit	0.5555	C o K	grado Celsius o kelvin
Temperatura	^tF	grado Fahrenheit	($^tF - 32$) 5/9	^tC	grado Celsius o
	^tC		$^tC + 273.15$	^tk o T	grado absoluto

NOTAS: los factores de conversión exactos se registran con un asterisco. El grado Celsius a menudo se escribe °C para evitar confusión con el C (coulomb). Los multiplicadores que se usan con más frecuencia:

	Prefijo	**Símbolo**
10^9	giga	G
10^6	mega	M
10^3	kilo	k
10^{-3}	mili	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n

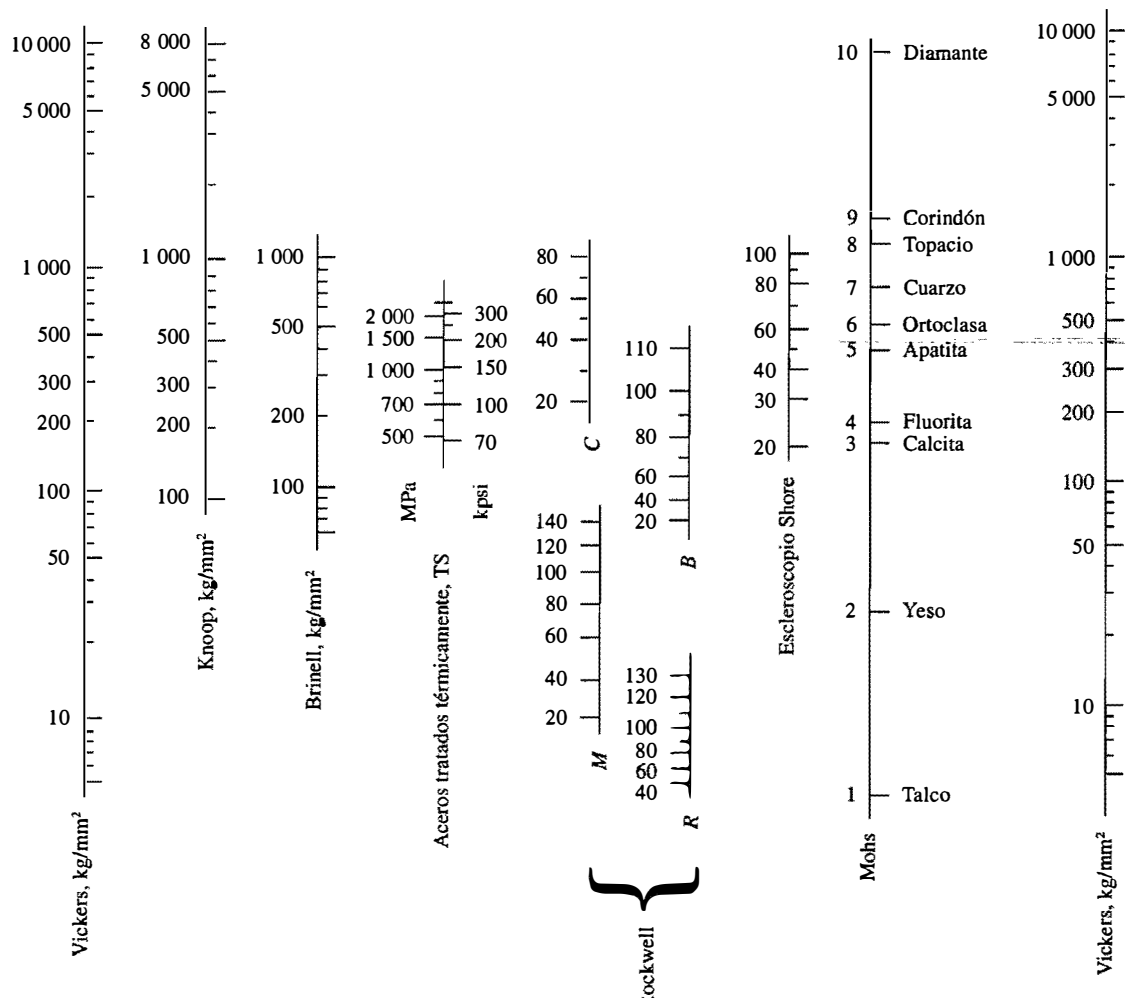
El Comité Internacional de Pesos y Medidas (CIPM) modernizó el sistema métrico en 1960. Las unidades SI resultantes actualmente se emplean mundialmente en la literatura; todas las naciones industrializadas ya se han comprometido a la conversión al Sistema Internacional (SI).

Para un análisis detallado véase, por ejemplo, *Standard for Use of the International System of Units (SI): The Modern Metric System* IEEE/ASTM SI 10-97, o *Canadian Metric Practice Guide*, CAM/CSA-Z234. 1-89 (R1995).

apéndice

B

Conversión aproximada de valores de la dureza



apéndice

C

Soluciones a problemas numéricos selectos

3C-2 Eje: calibrador de anillo, diámetro PASA = 24.980 mm, NO PASA = 24.959 mm. Cojinete: calibrador de inserción, diámetro PASA = 25.000 mm, NO PASA = 25.033 mm.

3C-4 Cambio = 0.0025 mm (12% de la tolerancia total).

3C-6 (*a*) Error = 0.0372 mm; (*b*) no; (*c*) R_t = máx. 8 μm; R_a = 8 μm.

3C-8 Error = 0.0224 mm.

4C-2 Dureza mínima = HRC 39.

4C-4 $0.5T_m = 73°C$ para Zn, 405°C para Cu, 591°C para Ni: Zn fluirá.

4C-7 (*b*) $e_t = 82\%$; (*c*) $e_c = 0.45$; (*d*) $e_{c\,\text{tensión}} = 0.45$, $e_{c\,\text{compr}} = 0.87$; (*e*) presión hidrostática.

4C-11 TS = 206 MPa.

4C-13 Límite elástico YS = 239.7±9.6 MPa; TS = 332.4±9.1 MPa; el. = 42.7±1.9%.

6C-2 Rango de solidificación $(T_L - T_s)/T_S = 0.022$, 0.025, 0.07 para las tres aleaciones; segregación intragranular en Al-5Mg.

6C-5 Para $d = 10^{-2}, 10^{-1}, 10^{0}, 10^{1}, 10^{2}$; el valor de $\sigma = 11.4, 4.16, 2.0, 1.316, 1.1$.

6C-8 (*a*) Al atemperatura ambiente es $<<0.5\,T_m$: use grano fino. (*b*) Fluencia: use grano grueso.

6C-11 87.5%.

7C-5 (*a*) 93 cm³/100 g acero; (*b*) 87.86%; (*c*) 6.27 cm /min.

7C-7 (*a*) Deformación unitaria $e = 0.0046$. (*b*) $\varepsilon = 7.67(10^{-6})\ s^{-1}$. (*c*) $\sigma_f = 36.9$ MPa. (*d*) Deformación plástica.

7C-9 (*b*) 943 kN (106 tonf).

7C-11 837.5 kg 70/30 chatarra; 1 163.75 kg Cu.

7C-13 $d = 77.1$ mm, $h = 92.5$ mm.

8C-1 $m = 0.174$.

8C-3 $\varepsilon = \ln(1 + e_t) = \ln(1 - e_c)$

8C-5 $r = 0.56$.

9C-2 (*a*) $p_a = 1\,282$ MPa; $P_a = 227$ kN. (*b*) $p_a = 3\,012$ MPa; $P_a = 532$ kN.

9C-5 Con m^* para adherencia: $p_p = 5\,967$ MPa; lubricada: $p_p = 3\,397$ MPa.

9C-8 (*a*) a 500°C: $p_a = 61$ MPa, $P_a = 420$ kN; (*b*) a 400°C, $p_a = 153$ MPa, $P_a = 1\,050$ kN.

9C-11 $h/L = 4.12$: la deformación es inhomogénea. Utilice un ángulo menor en la matriz: para $h/L = 2$, $\alpha = 20°$.

9C-13 (*b*) $p_e = 242$ MPa; $P_e = 4\,280$ kN; $p_i = 519.2$ MPa.

9C-15 (*a*) 417MPa; (*b*) 5 240 N, 5.24 kW; (*c*) 4 866 N.

9C-17 (*a*) para los cuatro estirados, $\sigma_{\text{salida}} = 100, 175, 223, 53$ MPa; (*b*) $P_{dr} = 1\,602, 2\,245, 2\,278, 528$ N; (*c*) P segura = 4 623, 5 087, 4 904, 4 866 N; (*d*) sí.

9C-19 (*a*) No. (*b*) Para las dos pasadas, $P_r = 31.0$, 59.0 kN; (*c*) potencia = 1.57, 2.99 kW.

9C-22 $\sigma_f = 572$ MPa.

9C-24 $P_r = 4\,190$ kN; potencia = 296 kW.

9C-27 Para rodillos de 800, 300, 30 mm de diámetro. $P_r = 6\,559, 3\,443, 907$ kN; potencia = 359, 308, 257 kW.

9C-29 $v = 0.033$ mm/s.

10C-1 (*a*) $P_s = 1\,442$ kN.

10C-3 (*a*) P_s = 18 kN; (*b*) 44; (*c*) escalonada, 283 mm de ancho, 67.95% de utilización del material.

10C-5 Una sola fila: 61.7%, fila doble: 67.75%, fila triple: 69.97%; utilizando cortes: 68.0%, 74.45%, 76.89%.

10C-7 R_f = 2.016, 10.405, 62.06, 163.56, 877.2 mm para R_b = 2, 10, 50, 100, 250 mm.

10C-9 Con Al ($\sigma_{0.2}/E$ = 0.00207).

10C-11 Para SS 410, (*b*) estricción en n = 0.1, (*c*) q de fractura = 65%; (*d*) para 1008, n = 0.25 (mucho mejor), q = 70% (ligeramente mejor).

10C-13 (*c*) Verifique n y la el.; SS 302 será mucho mejor.

10C-15 (*a*) d_0 = 295.5 mm; (*b*) 845 kN; (*c*) DR = 1.508; (*d*) D_p = 196 mm; P_d = 647 kN.

10C-17 (*b*) Sí; (*d*) P_{dr} = 189.5 kN.

11C-1 l/d = 6.1.

11C-4 (*a*) 6.932 g/cm^3; (*b*) 88.08%; (*c*) 11.92%.

11C-6 (*b*) Fuerza = 1 209 kN; (*c*) fuerza del expulsor = 246 kN (mín.)

11C-8 (*a*) Diámetro 1.5684; (*b*) sí, en superficie abarrilada; (*c*) contener en lata; (*d*) no.

12C-1 (*a*) 27.1%; (*b*) 13.33%; (*c*) 8.667 × 17.334 × 130 mm; vol. 19.53 cm^3.

12C-4 (*a*) 40 kN; (*b*) 74 MPa; (*c*) 94.2 MPa.

13C-1 (*a*) Cuando m = 1, n = 1; (*b*) cuando m = 0, $n \rightarrow \infty$.

13C-3 26.23 MPa.

13C-5 (*a*) T_g = −18°C; (*b*) sí; (*c*) use la forma cristalina.

13C-7 Poliimida (T_g > 310°C; temperatura de deflexión por calor. 340°C a 1 850 kP) nylon 6,6 relleno de vidrio (temperatura de deflexión por calor 255°C a 1 850 kP).

14C-1 (*a*) En la cintura, 0.417 mm, en la protuberancia, 0.265 mm. (*b*) Suponiendo que 0.265 mm es suficiente, fabrique el tubo con un diámetro interior = 28.74 mm en la cintura.

14C-3 Hay un ahorro de 13.4%.

14C-4 Prensa = 589 kN; abrazadera = 1 080 kN.

14C-6 (*a*) 239 kg/h; (*b*) 40.8 cm/s; (*c*) 32.6 kW.

15C-1 (*a*) CTE = 17.92 (10^{-6})/°C; (*b*) E_c transversal = 89.6 GPa; (*c*) ejemplo 15-4: CTE = 16.4 (10^{-6})/°C (ligeramente menos); E_c = 96 (ligeramente mejor).

15C-3 De la ecuación (15-5), E_c = 197.8 GPa; de la ecuación (15-6), E_c = 95 GPa. Valor medido 110 GPa (mejor que transversal).

15C-5 l_{cr} = 583 μm.

15C-7 Longitud = 498.82 mm; ancho = 299.86 mm.

16C-2 Tasa de remoción 5.55, 25, 3.13 pulg^3/min; 1 554, 7 460, 820 mm^3/min.

16C-4 Multiplique mm^3/W · s por 2.73 para obtener pulg^3/hp · min.

16C-5 A una velocidad 20% mayor, 9.69 min; a una velocidad 40% mayor, 2.07 min.

16C-8 (*b*) v = 1.8 m/s, f = 0.25 mm; (*c*) 140 s.

16C-9 (*b*) v = 1.8 m/s, f = 0.5 mm; (*c*) 7 978 W; (*d*) 126 s; (*e*) 4 432 N; (*f*) 532 N · m.

16C-12 (*a*) v = 0.35 m/s; (*b*) 1 114 r/min; (*c*) 0.06 mm/r; (*d*) 1.1142 mm/s; (*e*) 0.421 kW.

16C-14 v = 360 ft/min.

16C-17 (*b*) D_m = 5 pulg, 7 dientes; (*c*) v = 1 500 ft/min; (*d*) f = 0.112 pulg/r; (*e*) t_c = 0.117 min.

16C-20 $v_{c\,min}$ = 345 ft/min.

16C-22 (*b*) v = 3.9 m/s, f = 2.8 mm/r, profundidad de corte = 4 mm; (*c*) t_c = 0.768 min; (*d*) potencia = 25.4 kW.

16C-24 (*b*) v = 2.016 m/s; (*c*) 0.25 mm/r; (*d*) profundidad de corte = 0.65 mm; (*e*) 1 283 r/min; (*f*) 327.6 mm^3/s; (*g*) 1 956 W; (*h*) P_c = 679 N; (*i*) 37.4 s.

17C-1 Tiempo = 5.976 min.

17C-5 Tiempo de maquinado 0.9 h a 200 cm^3/min, 12 h a 0.15 cm^3/min.

18C-4 (*a*) 140 kA; (*b*) 3.3%; (*c*) 560 kVA; (*d*) 18.5 kVA; (*e*) 37 kW; (*f*) 0.103 kWh/20 juntas; (*g*) 40 kN.

18C-6 (*a*) Sí. (*b*) 6.7% (*c*) 120 kVA; (*d*) 8.04 kVA; (*e*) 16.08 kW; (*f*) 8.93 W · h/soldadura.

18C-8 L = 10.9 mm.

19-18 (*a*) ΔT = 62.7°C; (*b*) ΔT = 128.65°C.

ÍNDICE

No se proporciona un glosario por separado, sin embargo, las definiciones de los términos generalmente se encontrarán en la primera página a la que se hace referencia. Los números de las páginas en *cursivas* indican tablas.

A

Ablandamiento por deformación
  en el trabajo en caliente, 278
  en el trabajo en frío, 428
Abrasivos, 725-726
Abrasivos revestidos, 732-733
Abrillantado, 735
Abultamiento, 420, 438; *véase también* Moldeo por soplado
Abultamiento de la matriz, 581
Acabado
  engranes, 708
  forjados, 341
  fundiciones, 240
  partículas, 473
  vidrios, 520
Acabado en barril, 735
Acabado por cepillado, 407
Acabado superficial, 67, 115; *véase también* Diseño de piezas: Capacidades del proceso; Rugosidad superficial
  de matrices, 363, 606, 703
  efecto en la reflectividad, 118
  en el maquinado, 648, 668
  y tolerancias, 67-69
Acabado vibratorio, 735
Acción capilar, 811
Acero, 162
  forjado, *291,* 302-303
  fundiciones, 199, *200*
  lámina, *170*, *172*, 396-399, *396*
  maquinabilidad del, 672-673
  soldadura del, 788, 791-792
  tratamiento superficial del, 182-183, 844
  tratamiento térmico del, 178-182, *182*
  tratamiento termomecánico del, 179, 284-285
Acero al bajo carbono, 265, 302, 394-399
  propiedades del, *172*, *200*, *291*, *396*
Acero al carbono, 170, 179-182, 201, 302, 396
  propiedades del, *181*
  tratamiento térmico, 179-181
Acero al silicio, 267
Acero calmado, 302, 397
Acero de fase doble, 398
Acero fundido, 199, *200*
Acero inoxidable, 182, 303, 399
  maquinabilidad del, 672
  propiedades del, *200,* 285, *291*
  unión de, 792, 812, 815
Acero libre de impurezas intersticiales, 397
Acero ordinario al carbono, 161
  maquinado de, 670
Acero para alta velocidad (HSS), 676
  desgaste de las herramientas, 663-665
  dureza de los constituyentes en el, *674*
  herramientas, 681-682
  por metalurgia de polvos, 460, 477, 676
  velocidades de corte y de alimentación, 710-713
Aceros aleados, 181, 303, 672, 785, 792
Aceros de alta resistencia, 397-398
Aceros de baja aleación y alta resistencia (aceros HSLA), 286, 303, 398
Aceros dulces, 302
Aceros efervescentes, 302, 396-397, 522
Aceros HSLA; *véase* Aceros de baja aleación y resistencia alta
Aceros marenvejecidos, 284
Aceros TRIP, 284
Acículas, 168
Acondicionamiento del polvo, 460
Actuador final, 919
Acuñado, 345
Adelgazado por forja, 330
Adelgazamiento (de fibras), 518
Adhesión, 111-115; *véase también* Soldadura de estado sólido; Desgaste
Adhesivos, 819-821
Adhesivos de fusión caliente, 820
Adhesivos estructurales, 817-821
Aditivos para polímeros, 549-551
Administración de la calidad, 933-943
Administración de la manufactura, 943-945
Aeronave, 2, 20, 29, 102
  componentes, 85, 230, 233, 625, 755, 928
Afianzar, 776
Afinado, 515
Agentes de liberación del molde, 503
Agentes de nucleación, 158, 191, 203, 205, 219, 514, 605
Agentes reforzadores, 551
Aglomeración de partículas, 459-501
Aglomerante vitrificado, 727
Aglomerantes
  para abrasivos, 679, 680, 724, 735
  para cerámicos, 522

para moldes de arena, 224-225
para partículas, 461, 471, 501-503
para pintura, 858
Agrietamiento en caliente; *véase* Grietas
Agrietamiento por esfuerzo-corrosión, 102, 118, 297, 514, 789, 819
Agrietamiento por velocidad, 360
Agujeros vías, 887
Agujeros, diseño de; *véase* Diseño de piezas
AGV; *véase* Vehículos guiados automáticamente
Aislantes, 116, 867-868, 885
Ajuste (de resistencias), 901
Ajuste a presión, 777
Ajuste por contracción, 363, 776
Ajustes, 49-51
Alabeo; *véase* Distorsión
Alargamiento en el punto de cedencia, 265, 396
Alargamiento total, 85; *véase también* Propiedades mecánicas
efecto en el trabajo de lámina de metal, 421
factores de influencia en la, 280
Aleación metálica, 461
Aleación templada, 207
Aleaciones con base de estaño, *200*, 203, *292*, 304
soldaduras blandas, *815*
Aleaciones con base de níquel, 206, 306; *véase también* Superaleaciones
propiedades de las, *200*, *292*
unión de 2, 710, 793
Aleaciones con base de zinc, 204, 304
anisotropía de, 165
maquinado de, 672
propiedades de, *200*, *292*
soldadura de, 763
Aleaciones con memoria de forma, 777, 909
Aleaciones de aluminio, 131, 173, 304
anisotropía, 271
fluencia en diente de sierra, 264, 399
forjadas, 304-305, *292*
fundición, 205, *200*
laminado, 375
maquinabilidad, 673
propiedades, *178*, *273*, *285*, *412*
tratamiento térmico, 285
Aleaciones de base de cobalto; *véase* Superaleaciones
Aleaciones de base de cobre
forjado, 305, *291*
fundición, 206, *200*
maquinabilidad de las, 673
soldadura de las, 794
Aleaciones de magnesio, 165, 204, 304
maquinabilidad de las, 673
propiedades de las, *200*, *292*
soldadura de, 794
Aleaciones de maquinado libre, 648, 668-674
Aleaciones de titanio, 147, 207, 306
anisotropía de las, 165, 271
maquinabilidad de las, 673
propiedades de las, *292*
soldadura de, 780, 793
trabajado de, 285, 343, 441
Aleaciones forjadas, 198, 301-306
Aleaciones fundidas, 199-205
propiedades de las, *200*
Aleaciones metálicas refractarias, 207, 306; *véase también* Molibdeno; Tungsteno
soldadura de, 794-807
Aleaciones poliméricas, 534
Aleaciones ternarias, 382
Alfarería, 506
Alimentación (en el corte), 650-652, 685, 717
efecto en la vida de la herramienta, 665
valores comunes de, 710-714, *713*
Alimentación y compuertas
para metales, 214-217
para polímeros, 587-589
Alimentado, 683
Alineación molecular, 545, 582, 587, 597, 603
Alivio de esfuerzos, 554-555
Almacenamiento y recuperación automática (ASR), 929
Altura límite del domo, 421
Alúmina, 499, 507, 726
Aluminizado, 845
Amasado, 225
Ambiente, 26, 115, 137-139, 209, 294, 505, 555, 820, 858
Ampollado, 171, 173, 360
Análisis de la forma, 430-431, 958
Análisis de modo y efecto de falla (AMEF), 24
Análisis del valor, 946, 960
Ángulo de admisión, 380
Ángulo de alivio, 638, 724
Ángulo de aproximación, 652
Ángulo de ataque, 638, 687
efectivo, 644, 650
en el maquinado abrasivo, 722-725
valores usuales del, *688*
Ángulo de ataque efectivo, 644, 649, 650
Ángulo de corte, 638-643
Ángulo de fricción, 641
Ángulo de la cara del borde de corte, 652
Ángulo de reposo, 460
Ángulo de salida, 47; *véase también* Diseño de piezas
Ángulo de separación, 638, 724
Ángulo normal de inclinación, 650
Anión, 491
Anisotropía, 147, 190, 268-271; *véase también* Fibración; Alineación molecular; Valor *r*; Textura
en cerámicos, 492, 508
de compuestos, 614- 618
de deformación, 269
efecto en el doblado, 412

efecto en el embutido profundo, 427
en el grabado, 891-892
en polímeros, 538, 552, 605
mecánica, 282
Anisotropía mecánica; *véase* Fibración
Anisotropía plana, 269
efecto en el orejado, 427
Anodizado, 844
Aparejo; *véase* Alimentación y compuertas
Aplicación de cinta, 623
Aplicado manual, 623
Apresto de abrasivos, 728
Apresto del molde; *véase* Recubrimientos del molde
Arado en corte, 644, 654, 725
Arcilla, 498, 506
Área de contacto, 320, 326
Área superficial específica, 460
Arena, 221-225
compactación de, 226
recuperación de, 225-228
Arena unida con resina, 226-228
Arrollamiento de filamentos, 623-624
Arrugado, 423
Arseniuro de galio, 870
Artículos de gres, 506
Aseguramiento de la calidad, 27, 935; *véase también* Administración de la calidad
compuestos, 628
en fundición, 210, 242-244
uniones, 791-796, 828
Aserrado, 705
Asimetría, 66
Asperezas, 65, 113
Aspersión doble, 623
Aspersión electrostática, 859
Aspersión térmica, 847
Aspiración (en el molde), 216
Atáctico, 533
Ataque con plasma, 892
Ataque iónico reactivo (RIE), 893
Ataque químico
en la fabricación de IC, 891-893
metalográfico, 283
químico, 315, 754
Ataque químico en seco, 891-892
Ataque químico húmedo, 891
Ataque químico por bombardeo con partículas atómicas, 891
Ataque químico por láser sin calor, 764
Atmósfera protectora, 209
Atomización, 457-459
Atributos, 936, 938
Aumentadores, 551
Ausformado, 284
Austemplado, 179
Austenita, 162, 284, 725, 778
Austenitizado, 179-182, 284
Autocontaminado, 884
Automatización, 33-34; *véase también* Robots; *procesos específicos*
Automóvil, 11, 76, 124, 953-955, 959-960
componentes, 129, 238, 374, 596, 776, 828, 832, 859, 907, 926, 957, 964
reciclaje, 140, 596
ULSAB, 128, 138, 440, 446, 809, 828, 960
Avellanado, 699, 701
Ayudas de sinterización, 461
Azufre
en aleaciones de maquinado libre, 670, 673, 792
en aleaciones de níquel, 157, 674, 783
en caucho, 547

B

Bainita, 179
Banda; *véase* Lámina
Banda de corte, 554
Baño de soldadura fundida, 788, 799
Barniz, 522-523
Barrera de difusión, 664, 675, 881
Barrilete, 369
Bataneado, 242, 331
Bebedero; *véase* Alimentación y compuertas
Berilio, 206, 441, 458, 461, 477, 673
Bisulfuro de molibdeno, 136
Bizcochado, 507
Blancos a la medida, 432-433, 796, 808
BMC; *véase* Compuesto para moldeo volumétrico
Bombardeo con partículas atómicas, 853-854
Bombardeo reactivo con partículas atómicas, 853
Boquilla, 517
Borde acumulado (BUE), 644, 666
efecto de los lubricantes sobre, 657, 672
en el esmerilado, 726
estable, 661, 663
Bordear, 436-439
Boruros, 508
Broca helicoidal, 697-698
Bronces, 206, 305
soldadura de, 794
Bruñido, 709, 735
BUE; *véase* Borde acumulado

C

Cabeceado, 336
Cabeceado en frío, 336
Cabezas de alimentación (mazarotas), 217-218
CAD; *véase* Diseño asistido por computadora
CAD/CAM, 30, 37
Cadmio, 850
Caja de moldeo, 224

Calandrado, 583
Calcinación, 499, 501, 504, 630
Calentamiento por corte, 575-580
Calibradores, 56-58
Calidad, definición de, 933
Calidad de la soldadura, 788-791
Calidad de la superficie, 665-667
Calificando de una pieza, 737, 924
CAM, 25, 30; *véase también* CAD/CAM
Cambio de volumen; *véase* Volumen específico
Canal de alimentación, 215
Capa blanca, 667
Capa de refundición, 759
Capa enterrada, 873, 884
Capacidad de la máquina, 940
Capacidades de proceso, 958
  compuestos, 628
  deformación volumétrica, *336*
  estirado, 372-373
  extrusión, 358
  forjado por matriz abierta, 335-338
  forjado por matriz de impresión, 347-350
  fundición de formas, 243-245, *244*
  laminado, 382-384
  maquinado, 736, *738*
  metalurgia de polvos, 478-481, *478*
  procesamiento de cerámicos, 510, *511*
  procesamiento de plásticos, *592*, 592-597, 603
  recubrimientos superficiales, 860
  trabajado de lámina de metal, 442, *443*
  tronzado, *768*
  unión, 824, *826*
  vaciado de formas, 243-245, *244*
  vidrios, 522
Capacitores, 875, 902
Capas protectoras, 754, 888
Carbonitruración, 845
Carbonizado, 535, 545, 550
Carbono equivalente, 201
Carbono, formas del, 509-510
Carbono parecido al diamante, 857
Carburización, 182, 482, 845, 855
Carburización iónica, 855
Carburo cementado, 477
  herramientas de corte, 677-679
Carburo de silicio, 498, 508, 618, 726
Carburos, 508; *véase también* Carburo cementado
  dureza de, *675*
  en aceros, 162-163, 302, 477
Carburos fundidos, 678
Carburos revestidos, 678-679, 713
Careado, 692
Carga (de la rueda abrasiva), 728
Cáscara de naranja, 300, 411
Castañeo, 32, 646-647, 650, 667, 728, 729, 741
Catión, 481, 491
Caucho; *véase* Elastómeros
Causas asignables, 55, 936, 938
Causas atribuibles; *véase* Causas asignables
Causas especiales; *véase* Causas asignables
Cavidades de contracción, 190; *véase también* Porosidad
CBN; *véase* Nitruro de boro cúbico
Cedencia aserrada, 267
Cedencia discontinua, 265-267
Celda de manufactura flexible (FMC), 916, 927-929
Celda de punzonado, 409
Celda, producción, 926
Celda unitaria, 147
Celdas eutécticas, 191
Cementita, 162
Cemento, 499
Centrifugado, 503
Centro de maquinado, 703
Centro de torneado, 692
Centros de corte, 409
CEP; *véase* Control estadístico del proceso
Cepillado, 683, 685, 697
Cepillado de potencia, 734
Cerámicas de óxido, 508
Cerámico presinterizado, 369, 501
Cerámicos, 130, 489-526
  consolidación de, 501-503, 505-506
  enlaces en, 490-491
  manufacturados, 499, 506-510
  maquinado de, 765-767
  naturales, 497, 506
  procesamiento de, 499-505
  propiedades de los, *135*, 492-495
  sinterizado de, 504-505
  unión de, 822-823
Cerámicos de alta tecnología, 489, 495
Cerámicos de precisión, 505
Cerámicos refractarios, 208, 223-224, 495, 507
Cerámicos vítreos, 514
Cermets, 477, 679
Chapado, 481, 849, 850, 855
Chapado iónico, 855
Chapeado iónico reactivo, 855
Chapeado mecánico, 850
Chatarra, 139; *véase también* Reciclaje
Chip (estado sólido), 875
Chorro abrasivo, 735
Circonia, 493, 508
Circonio, 763
Circuitos de película gruesa, 901, 902-903
Circuitos integrados (IC), 865-867, 873-875
  encapsulado de, 896-901
  integración del proceso, 893
  miniaturización, 866, 874
  puntos importantes del proceso, 880
  tamaño mínimo de presentación en, 875, 889

Circuitos integrados monolíticos, 875
Circuitos integrados para aplicación específica (ASIC), 873
Clasificación
de piezas, 46
formas, 44
Clasificación (materiales en partículas), 460
Clasificación de procesos
abrasivo, 722-723
cerámicos, 495-496
compuestos, 614
deformación volumétrica, 313-316
fundición, 211-212
maquinado no tradicional, 753-754
maquinado, 683-684
metal en polvo, 456
plásticos, 571-572
trabajado de lámina de metal, 400-401
tratamientos superficiales, 841-842
unión, 773-774
CMM; *véase* Máquinas de medición
CNC; *véase* Control numérico por computadora
Cocido; *véase* Sinterizado
Cocido del barniz, 507
Codificación de piezas, 46
Coeficiente de dilatación térmica, *116*; *véase también* Dilatación térmica
Coeficiente de fricción, 112, 290; *véase también* Efectos de la fricción
determinación del, 331-334
valores típicos del, *295*
Coextrusión, 583
Color; *véase* Propiedades ópticas
Comba, 383, 584
Combadura de los rodillos, 383
Compactación con rodillos, 465, 502
Compactación, de partículas, 462-467, 502
Compactación en caliente, 473-475, 505-506
Compactación omnidireccional rápida, 505
Compactación por impacto, 465
Compactación vibratoria, 465
Competencia
global, 9, 951
entre los procesos de manufactura, 957-958
entre materiales, 958-960
Competitividad, 950-970
Comportamiento ahulado, 543, 597-602
Comportamiento correoso, 543
Comportamiento de Bingham, 195
de la tinta, 902
de materiales en partículas, 468, 502, 521
de polímeros, 539-540
Comportamiento elástico-frágil, 83, 492, 513, 542, 545
Comportamiento en caliente, 103, 175
Comportamiento frágil, 83, 97, 159, 492, 630; *véase también* Grietas, efecto de las
Comportamiento frío, 103, 175
Compresibilidad de partículas, 460
Compresión, 264
Compuerta; *véase* Alimentación y Compuertas
Compuesto de moldeo para lámina (SMC), 621, 626
Compuesto para moldeo volumétrico (BMC), 585, 621, 626
Compuestos, 135, 612-635
maquinado de, 767
propiedades selectas de, *135*
Compuestos carbono-carbono, 632
Compuestos de matriz cerámica, 630
Compuestos de matriz de vidrio, 632
Compuestos de matriz metálica, 628-629, 780-781
Compuestos de matriz polimérica, 619-628
Compuestos de partículas, 614
Compuestos *in situ*, 629
Compuestos unidireccionales, 615-616
Concentración de esfuerzos, 90
Concentradores de esfuerzos; *véase* Grietas; Efecto de la muesca
Conductividad calorífica; *véase* Conductividad térmica
Conductividad eléctrica, 115, 557, 869
Conductividad térmica, 116
efecto en corte, 655-656, 669, 766
efecto en soldadura, 788, 794
valores selectos de la, *116*
Conductores, 115, 867
Confiabilidad, 933
Conformación aproximada a la definitiva, 340-341
Constante de Faraday, 482
Constante del resorte, 89, 267, 366, 383
Constante elástica de la fresa, 383
Consumo de energía, *127*, 133-142
Contacto óhmico, 873, 881
Contaminación, *véase* Riesgos de salud
Contaminación del aire; *véase* Ambiente
Contracción
en compuestos, 622, 626
en fundiciones de metal, 147, 190-193, *200*, 223
en la fabricación de circuitos integrados, 900
en productos de partículas, 468-471, 480, 501-504
en productos de polímeros, 538, 556, *559*, *565*, 566, 573, 575, 586
en soldadura, 788
Contracción por solidificación; *véase* Contracción
Contracción sólida; *véase* Contracción; Dilatación térmica
Contracción (unión), 776
Contrapunzonado, 406
Control adaptivo, 33
Control de aceptación, 936-937
Control de calidad; *véase* Aseguramiento de la calidad; CEP
Control de lazo abierto, 32
Control de lazo cerrado, 33-34
Control de proceso por el operador (OPC), 938-943
Control del proceso, 237, 893
Control del tamaño de grano

en el recocido, 274-275
en el sinterizado, 469
en el trabajo en caliente, 277
en el trabajo en frío, 315, 396
en la soldadura, 783
en la solidificación, 158-159, 191, 219, 23
Control en tiempo real, 26, 36, 929
Control estadístico de la calidad (CEC); *véase* Aseguramiento de la calidad
Control estadístico del proceso (CEP), 937-943
Control manual, 31
Control numérico (NC), 34-35; *véase también* Programación CNC, 37-38
Control numérico directo (DNC), 36
Control numérico por computadora (CNC), 35; *véase también* NC/CNC
Controlador lógico programable (PLC), 37
Conversión
de dureza a TS, 328, 361
de unidades, 48, 80, 111, 605
de valores de dureza, 99
Copolímeros, 534
Cordón de soldadura, 788, 800
Corrosión, 118, 512-513, 735
Cortado con alambre por descarga eléctrica (EDM por alambre), 759
Cortadoras ajustables, 681
Cortante (en cizallado), 405
Cortante puro, 288
Corte, 401-402
Corte abrasivo con alambre, 733
Corte con arco de plasma, 810
Corte con oxígeno, 810
Corte con oxígeno y gas combustible, 810
Corte de acabado, 709
Corte de engranes con fresa madre, 707
Corte de metal en polvo, 810
Corte de metales, 637-723
Corte de polvo con oxígeno y gas combustible, 810
Corte oblicuo, 650-652, 686
Corte, optimización del, 719-721
Corte ortogonal, 638-649
Corte por chorro de agua, 735
Corte por chorro de agua abrasivo, 736
Corte por soplete, 810
Corte realista, 643-649
Corte volado, 703
Corte y soldadura de agujero de cerradura, 761, 764, 800
Cortes de desbaste, 709
Cosido, 775
Costillas; *véase* Diseño de piezas
Costo de las herramientas, relativos; *véase* Capacidades del proceso
Costos, 953-957
en manufactura, 953-957
Costos de mano de obra, 956
relativos; *véase* Capacidades del proceso
Costos, relativos; *véase* Capacidades del proceso
Costura de cierre, 438-439, 775
Costuras, 435-438, 775-776
Crecimiento de cristales, 159, 536, 538; *véase también* Tamaño de grano
Crecimiento de grano, 276
en cerámicos, 507
en el sinterizado, 469
Crecimiento dendrítico, 159, 191
Crecimiento epitaxial, 785
Crecimiento planar, 159
Cribado, 500-501
Cristales equaxiales, 190, 191
Criterio de fluencia de Tresca, 286
Criterio de fluencia de von Mises, 287
Criterio de Griffith, 90
Criterios de cedencia, 286-289
Cromización, 845
Cuarzo; *véase* Sílice
Cubilote, 207-208
Cuerpo crudo, 462
Cuerpo policristalino, 147
Cultivo de cristales, 219, 877
Curado, 545
de adhesivos, 819
de compuestos, 625-627
de pintura, 858
Curva de fricción, 322-326
Curva esfuerzo-deformación unitaria, 79
de polímeros, 552-553
en compresión, 96
real, 261
CVD al ultraalto vacío, 884
CVD asistido con plasma, 855
CVD de baja presión (LPCVD), 884
CVD térmica, 855
CVD; *véase* Deposición química de vapor

D

Decapado, 315, 843
Defecto de reventado central, 328, 349
en el estiramiento, 372-373
en la extrusión, 360, 502
Defectos de fundición, 242-243
Defectos en la soldadura, 788-791
Defectos internos, 89; *véase también* Defecto de estallido central
Defloculantes; *véase* Floculación
Deformación elástica, 80-84
de elastómeros, 547
de polímeros, 541-543, 766
Deformación elástica de herramientas
herramienta de corte, 646, 724, 737, 738

matriz de extrusión, 580-583
matriz de forjado, 342
matriz para formado de lámina, 415
rodillos, 373, 382-383
Deformación elástica de la máquina
de molino de laminación, 383
de prensas, 366
en compresión, 94
en el ensayo de tensión, 81-82, 89, 267
en fundición por matrices, 238
en maquinado, 646, 716
Deformación homogénea, 319
Deformación natural; *véase* Deformación real
Deformación no homogénea, 296-297
en el estirado, 371
en el laminado, 376, 378, 381, 383
en el recalcado, 322, 323
en la extrusión, 355, 359-360
en la indentación, 296-297, 328-330
Deformación plana, 288, 289
Deformación plástica, 84, 258-310
Deformación por cortante en el corte, 638
Deformación posterior a la estricción, 89, 300
Deformación unitaria, fórmulas para
compresión, 96, 264, 321
deformación real, 261
estirado, extrusión, 354
forjado por matriz de impresión, 342
prueba de tensión, 81, 85
Deformación unitaria ingenieril, 81
Deformación unitaria logarítmica, 261
Deformación unitaria por compresión, 96
Deformación unitaria real, 261
Deformaciones iguales, 615
Degradación
de adhesivos, 818
de polímeros, 545, 563, 581, 583
Dendritas, 144, 158, 191, 238, 458, 786
Denier, 111
Densidad, 110
de cerámicos, *135*
de compuestos, *135*, 614
de espumas, 605
de metales, *134*
de partículas, 460
de plásticos, *134*, 556
Densidad de energía, 761, 764, 807
Deposición al vacío, 852
Deposición asistida por haz iónico, 855
Deposición física de vapor (PVD), 499, 851-854
Deposición por aspersión, 475, 833
Deposición por bombardeo de iónico del magnetrón, 853
Deposición por plasma, 885
Deposición por pulsos de láser, 852
Deposición por vapor; *véase* CVD; PVD
Deposición química por vapor (CVD), 855-857, 876
infiltración, 632
Desarrollo de especificaciones, 22
Desarrollo del mercado, 944
Desgarramientos en caliente, 248; *véase también* Grietas
Desgasificación, 173, 211
Desgasificación al vacío, 173, 211
Desgaste, 113-114
de herramientas de corte, 661-663, 667, 668
de microdispositivos, 906
de ruedas abrasivas, 726
del matriz de corte, 403
Desgaste de herramientas; *véase* Desgaste
Desgaste en forma de cráter, 661
Desgaste por el flanco, 661-662
Desgrasado, 296, 843
Deshidroxilación, 504
Designación del temple
para aleaciones de aluminio, 304-305
para latones, 175
Deslizamiento basal, 165
efecto sobre el valor *r*, 270
Deslizamiento de pincel, 165
efecto en el valor *r*, 270
Deslizamiento en metales, 164, 271
Deslizamiento piramidal, 165
efecto en valor de *r*, 207
Deslizamiento prismático, 165
efecto en el valor de *r*, 270
Desoxidación, 173, 211, 302
Desplegado, 401, 776
Desprendimiento, 823
Desviación estándar, 54, 936, 940
Desvitrificación, 492
Detección visual, 920
Detectores inteligentes, 864, 905
Diagrama de equilibrio, 151
Al-Cu, 177
Al-Mg, 158
Cu-Ag, 152
Cu-Ni, 150
Cu-Zn, 155
de no equilibrio, 156-157
endurecimiento por precipitación, 177
eutéctico, 152-154
fase intermetálica, 156
hierro-carbono, 161
peritéctico, 154
solución sólida, 150-151
Diagrama de fase, 153; *véase también* Diagrama de equilibrio
Diagrama de límite de conformado (DLC), 420-421
Diagrama tiempo-temperatura-transformación, 179-180
Diamante, 490, 509
abrasivo, 725-728
herramienta de corte, 681, 742

matriz, 369
recubrimientos, 857
Diamante policristalino (PCD), 680, 714
Dieléctricos, 884
Difusión, 149, 150
en dispositivos de estado sólido, 881, 882
Difusión por calentamiento, 881
Dilatación térmica, 55, 115, 147
del vidrio, *515*
valores selectos de la, *116*
Dimensionamiento, 345; véase también Acuñamiento
Dimensionamiento y tolerancias geométricas (GD&T), 51-52
Dimensiones, 48; *véase también* Diseño de piezas
Diodo, 870
Diodos emisores de luz, 870
Dióxido de silicio; *véase* Sílice
Diseño asistido por computadora (CAD), 24; *véase también* CAD/CAM
Diseño conceptual, 23
Diseño de matrices
para extrusión, 357-358
para forjado, 341
para forjado y extrusión, 360-364
Diseño de moldes, 221
Diseño de piezas
para automatización, 47
para cerámicas, 510, 522
para compuestos, 628-629
para extrusión, 358
para forjado, 335, 340, *337*, *347*
para fundición, 245-250
para maquinado, 737-740, 767
para plásticos, 592-597, 603-604
para procesamiento de partículas, 478-481
para recubrimientos, 859
para trabajado de lámina de metal, 442-446
para unión, 823-827
para uniones adhesivas, 824, 827
Diseño de procesos, 25-27
Diseño de productos, 23-25, 126-127
Diseño del proceso, 25-27
Diseño para ensamble, 23, 47
Diseño para manufacturabilidad, 24, 960
Dislocaciones, 164
sujeción de, 265
Dispersión de los datos, 53
Dispositivos bipolares, 870-873
Dispositivos de estado sólido; *véase* Dispositivos semiconductores
Dispositivos graduados de medición, 58-59
Dispositivos microelectrónicos; *véase* Dispositivos semiconductores
Dispositivos planos, 872
Dispositivos portapiezas, 25, 682, 917
Dispositivos semiconductores, 864-912
fabricación de, 875-905
Dispositivos ULSI, 866
Dispositivos unipolares, 872
Dispositivos VLSI, 866
Distorsión, 108; *véase también* termofluencia; Esfuerzos residuales; Recuperación elástica
de compuestos, 628
de polímeros, 543, 575, 577
en el tratamiento térmico, 182-183, 736
en soldadura, 788-789
Distribución, 332
Distribución de la deformación, determinación de la, 419
Distribución normal, 54
Distribución planta, 27, 926
DLF; *véase* Diagrama límite de formado
Doblado con frotador, 416
Doblado con rodillos, 382-383
Doblado con tres rodillos, 416
Dosificación, 501
Ductilidad, 85
Dureza, 97-99
conversión a TS, 328
de aleaciones fundidas, *200*
de cerámicos, 494, *675*, 676
de herramientas de corte, 674-681, 675
de materiales para matrices, *362*
Dureza de indentación; *véase* Dureza

E

ECM; *véase* Maquinado electroquímico
Ecuación de Poiseuille, 579
Ecuación de Williams-Landel-Ferry, 540-541
EDM por alambre, 759
EDM; *véase* Maquinado por descarga eléctrica
Efecto de la muesca, 90-94; *véase* Rebabas; Grietas
Efectos de la fricción
en el alargamiento, 419-420
en el alargamiento-estiramiento, 430, 435, 443
en el corte de metales, 640-644, 654, 724
en el embutido profundo, 426-427
en el estirado, 369-372
en el forjado, 95-97, 319-337
en el trefilado, 379, 383
en el trefilado de alambre, 372
en la compactación de polvos, 461-467
en la compresión de anillos, 332
en la deformación, 290-293
en la extrusión, 350-351, 357-358
en la extrusión de plásticos, 585
en la RLE, 427
en los procesos abrasivos, 725
en microdispositivos, 898, 906
Efectos de la lubricación; *véase* Efectos de la fricción
Eficiencia
en el corte, 653

de la electrodeposición, 482
de rayos láser, 762
de unión, 791, 799, 809
del forjado, 365
del maquinado por haz de electrones, 761
EGS; *véase* Silicio de grado electrónico
Eje neutro en el doblado, 410
Ejes de control, 47
Elastómeros, 547-549, 566
procesamiento de, 606
Elección del proceso, 956-957
Electrodeposición, 849, 902, 904
Electrodos revestidos, 802
Electroformado, 481-483
Electrólisis, 131, 457
Electroluminiscencia, 557
Electromigración, 885
Electronegatividad, 491
Elemento de Maxwell, 543
Elemento de Voigt, 543
Eliminación de rebabas por proceso termoquímico, 756
Eliminación de rebabas; *véase* Rebabas
Elongación a la fractura, 85; *véase también* Propiedades mecánicas
efecto de la longitud del calibrador en la, 85-86
Elutriación, 460
Embebido, 573
Embutido profundo, 422-429, 438
Emisión acústica, 110, 718, 728, 795
Empalmes, 810
Empaque montado en la superficie, 896, 904
Emulsiones, 294, 605, 658
adhesivas, 817
pinturas, 858
Encapsulación cerámica, 897, 900
Encapsulación (de dispositivos de IC), 895-901
Encapsulado, 573
Encogemiento, 480
Endurecedor, 207, 566
Endurecimiento por chispas, 847
Endurecimiento por deformación, 84, 271
ecualización del, 353-354
efecto en la prueba de dureza, 99, 328
en corte, 643-646
en el trabajo en caliente, 278
Endurecimiento por dispersión, 169, 460, 462, 477
Endurecimiento por haz de electrones, 844
Endurecimiento por horneado, 398
Endurecimiento por precipitación, 162, 169, 176-178
efecto de trabajado en el, 284, 399
en aceros marenvejecidos, 284
en soldadura, 786
Endurecimiento por trabajo; *véase* Endurecimiento por deformación
Endurecimiento superficial, 182,
Energía de activación, 150
Energía de impacto, 93
Energía específica de corte, 652-655, *653*
en el maquinado abrasivo, *725*
Energía específica de corte ajustada, 654
Energía interfacial, 166-167
Energía, minimización de la; *véase* Patrón de deformación
Enfriadores, 218-219
Enfriamiento (en el corte), 659, 729
Engargolado, 437-438, 776
Engarzado a presión, 776
Engrapado, 775
Enlace del hidrógeno, 535
Enlaces
en cerámicos, 490, 499
en aislantes, 116
en metales, 115, 145, 154
en polímeros, 534, 558
Enlaces bipolares, 535
Enlaces covalentes, 154, 490, 534-535
Enlaces cruzados, 545-547; *véase también* Curado
Enlaces de van der Waals, 498, 501, 535
Enlaces iónicos, 490-491
Enlaces secundarios, 491, 535, 817
Enlogación uniforme, 85
Ensamble, 27, 930-932
Ensamble *in situ*, 906
Ensamble selectivo, 943
Ensayo de compresión, 94-97
Ensayo de flexión, 91
Ensayo de impacto, 93-94, 554
Ensayo de tensión, 78-90
medición del valor *r*, 270
tasa de deformación en, 103
Ensayo de termofluencia, 105
Ensayos no destructivos (NDT), 108-110
de cerámicos, 493
de compuestos, 628
de juntas, 791, 795, 821, 828
en el maquinado, 667
en fundición, 242
Entrega justo a tiempo (JIT), 27, 921, 932, 952
Envejecimiento, 178, 285, 305
durante la soldadura, 785, 790, 791
Envejecimiento por deformación, 267, 397
Envejecimiento térmico, 556, 594
Epitaxia, 884
Epitaxia del haz molecular, 883
Equipo de forja, 361-368
Equipo; *véase* Capacidades del proceso
Equivalencia tiempo-temperatura, 279
Ergonomía, 24
Errores, 53
Errores aleatorios, 55
Errores sistemáticos, *véase* Errores asignables

Escala de grises, 58
Escamas; *véase* Rebabas
Escarapela, 846
Escariado, 701, 706, 713
Escición de juntas, 823, 826
Escleroscopio, 99
Escoria, 209, 789, 790
Esferoidización, 176, 179, 285
Esferulita, 536
Esfuerzo, 79
  cortante, 112
  interno, 106
  nominal, 81
  normal, 79
  principal, 286
  residual, 106
  secundario, 297
Esfuerzo convencional, 81
Esfuerzo cortante, 112, 164, 195, 288
Esfuerzo cortante crítico, 164
Esfuerzo cortante en la interfase, 290, 323
Esfuerzo cortante por fricción; *véase* Fricción
Esfuerzo de fluencia, 261, 289
  en cortante, 288
  en deformación plana, 288
  en el corte, 652
  en el trabajo en caliente, 277-280, 289
  en el trabajo en frío, 260-265, 289
  media, 316
  relación para TS, 318
  uniaxial, 287
  valores selectos de, *291*, *293*
Esfuerzo de fluencia por cortante, 288
Esfuerzo de fluencia por deformación plana, 288
Esfuerzo de fractura, 90
Esfuerzo ingenieril, 81
Esfuerzo nominal, 81
Esfuerzo normal, 79
Esfuerzo plano, 287
Esfuerzo real, 95, 261
Esfuerzos iguales, 616
Esfuerzos internos, 107, 147, 180, 181; *véase también* Esfuerzos residuales
  en plásticos, 581, 589, 627
Esfuerzos residuales, 106-108, 297
  de compresión, 109, 329, 494, 667, 775, 855
  en cerámicos, 494
  en circuitos integrados, 885
  en el doblado, 409, 412
  en el electroformado, 670
  en el esmerilado, 725, 727, 736
  en el maquinado, 665, 667, 709, 722, 725, 736
  en el tratamiento térmico, 180
  en la soldadura, 789
  en las fundiciones, 243-244
  en plásticos, 556, 575
  en recubrimientos, 855
  en vidrio, 520-521
  granallado, 735
Esfuerzos residuales, efecto en la
  corrosión, 118
  ductilidad, 109
  fractura, 95
  resistencia a la fatiga, 102
Esfuerzos residuales, eliminación de, 107, 108, 241, 521, 790, 842
Esfuerzos secundarios de tensión, 298-300; *véase también* Defecto de estallido central; Deformación no homogénea
  en el estirado, 372
  en el laminado, 376, 377
  en el procesamiento de polvos, 474
  en el recalcado, 338
  en la extrusión, 360
  en la indentación, 328, 333
  extrusión, 360
Esmaltes, 522, 858
Esmaltes vítreos, 522
Esmerilado, 686, 726-732
  de cerámicos, 765
  requisito de energía del, 724
Esmerilado a baja tasa de alimentación, 731
Esmerilado burdo, 731
Esmerilado de precisión, 730
Espesor de la lámina, efecto en el
  doblado, 410
  embutido profundo, 422-427
  FLD, 421
Espesor de la pared; *véase* Diseño de piezas
Espesor de la viruta sin deformar, 638
  efecto en la energía de corte, 654
  en el esmerilado, 722, 723, 730
Espesor mínimo del alma; *véase* Diseño de piezas
Espesor; *véase* Diseño de piezas
Espumas estructurales, 604-605
Estabilidad del volumen, 81, 261, 267, 779
  en el alargado, 418, 602
  en el corte, 639
  en el estirado, 369
  en el laminado, 373
  en el recalcado, 94, 319
  en la flexión, 410
Estadística de producción, *127*
  fundiciones, *199*
  metales en polvo, *475*
  plásticos, *530*
  productos forjados, *291*
Estado de esfuerzos, 86, 90, 286
Estado esponjoso, 151
Estado líquido, 147
Estado vítreo, 492, 513

Estampado con forja, 776
Estampado termoplástico, 603
Estampadora rotatoria, 346
Estarcidos; *véase* Fotoestarcidos
Estirado (barra, tubo, alambre), 369-374
Estirado de alambre; *véase* Estirado
Estirado en frío, metales, 367-370
Estirado en frío, polímeros, 603
Estirado (lámina), 423-429
Estirado o embutido en copa; *véase* Embutido profundo
Estiramiento biaxial, 583, 597-603
Estrategias de control, 31-33
Estricción, 84-86
  deformación uniforme, 262, 411
  efecto del endurecimiento por deformación en la, 168, 262, 300
  efecto en la tasa de deformación, 103, 280, 300
  en el doblado, 411-412
  en el trabajo de lámina metálica, 300, 420, 436-439
  en polímeros, 545, 552
  retraso por transformación, 284, 300
Estricción (de tubo), 437
Estricción difusa, 420
Estructura amorfa, 160
  cerámicos, 492, 513
  metales, 146, 459
  polímeros, 533, 538-563, 598
  silicio, 883
Estructura columnar, 190, 281, 785
Estructura
  de cerámicos, 490-492
  de metales, 146-154
  de polímeros, 536-538
  de uniones soldadas, 784-786
  del vidrio, 512-513
Estructura de la fundición
  destrucción de la, 281-284, 314, 375
  en soldaduras, 786
Estructura de red, 491, 497
  de polímeros, 534, 545
  del vidrio, 512-513
Estructura de terminales, 896
Estructura esferoide, 168-169
  acero, 179, 285, 353
  eutéctica, 191
  hierro fundido, 202, 792
  maquinabilidad de, 670
Estructuras cristalinas
  de cerámicos, 491-492
  del vidrio, 510-513
  de polímeros, 536
Estructuras cristalinas, metales, 147-148
  efectos en el deslizamiento, 270-271
Estructuras laminares, 152, 153, 162, 168, 179
Eutéctico, desequilibrio, 157
Eutécticos, 152-154
  modificación de los, 191, 204
  soldadura de, 786
  viscosidad en los, 194-195
Evaporación por reacción, 852
Exactitud, 53
Exponente de sensibilidad a la tasa de deformación, 278, *291*, *292*
Exponente de Taylor, 664
Exponente del endurecimiento por deformación, 261, *291*, *292*
  efecto en el estirado, 420
  efecto en la estricción, 263
  efecto en RLE, 426
Expulsión, 173, 205, 211, 803
Expulsores, 233, 246, 347, 480, 587, 594
Extracción de calor, 217
Extracción por fusión, 458
Extrusión
  equipo, 360-368
  de metales, 349-359
  de particulados, 474, 502
  de plásticos, 574-583
Extrusión contra contrapresión, 360
Extrusión de película soplada, 597-598
Extrusión en caliente
  de metales, 516
  de polvo, 473
Extrusión en frío, 353
Extrusión hidrostática, 351, 360
Extrusión por impacto, 353
Extrusión por reacción, 583
Extrusión por tornillo, 576-583
  de partículas, 239, 473, 502
  diseño de matrices, 580-583

F

Fabricación automatizada, 831
Fabricación de circuitos híbridos, 901
Fabricación de engranes, 686, 706-709
Fabricación de matrices, 703, 759-760, 831, 907, 967
Fabricación de película delgada, 901-902, 908
Fabricación fotopolimérica, 832
Fabricación laminada, 833
Fabricación sólida de formas libres, 830-834
Factibilidad, 298-299
  valores relativos de la, *291*, *292*
Factibilidad de manufactura, 44, 959
Factor de compresión de la viruta, 638
Factor de cortante de la interfase, 290
  determinación del, 332
Factor de cortante por fricción, 290
Factor de forma, 322, 326, 358
Factor de remoción del material, 653
Falla por decadencia de la soldadura, 791
Familias de partes, 46

Fase, 153
Fases metaestables, 178, 513; *véase también* Desvitrificación
Fatiga, 100-103
Fatiga estática, 513
Fatiga térmica, 101
Ferrita, 162
Ferrita (cerámico), 508
Ferroelectricidad, 508
Ferroespinela, 508
FET; *véase* Transistor de efecto de campo
Fibra de carbono; *véase* Fibra de grafito
Fibra de vidrio, 517-518, 618-619
Fibración, 282-284
  efecto en el doblado, 412
  en el forjado, 338-339
Fibras, 458
  polímero, 561, 573, 583, 603, 604
  reforzamiento, 494, 510, 551, 614-619, *618*
  vidrio, 512, 517-518
Fibras ópticas, 518, 763, 920
Fijación de hilos de conexión, 898-899
Fijación de tolerancias, 49-52
Filamentos, 619
Floculación, 461, 501, 521
Flotación, 497
Fluidez, 196-198
Fluido dieléctrico, 758
Fluido para esmerilado, 729
Fluidos de corte, 657-670, *658*
Fluidos dilatantes, 194, 503
Flujo de fluidos, 214
Flujo de material; *véase* Patrón de deformación
Flujo newtoniano, 194, 279
  del vidrio, 513
  de polímeros, 539-541
Flujo no newtoniano, 540
Flujo pseudoplástico, 194
  de plásticos, 468, 502, 521, 540, 581, 597, 902
Flujo viscoelástico, 543-545
Flujo viscoso, 194
  de adhesivos, 819
  de lubricantes, 114
  de metales, 194
  de partículas, 502
  de polímeros, 539-542
  de termofraguados, 547-548, 574
  de termoplásticos, 574-575
  del fundente de la soldadura fuerte, 812
  del vidrio, 513, 515, 516
FMC; *véase* Celda de manufactura flexible
FMS; *véase* Sistema de manufactura flexible
Forja a martinete, 338
Forja con rodillos, 346
Forja en frío; *véase* Forjado
Forjado, 318-345
  de polvo de metal, 474
Forjado de fusión, 238
Forjado de polvo, 950
Forjado de precisión, 345-348
Forjado en caliente, 340, 343, 344
  de preformas de polvo, 474
Forjado en matriz abierta, 318-338
Forjado en matriz cerrada, 312, 345; *véase también* Acuñado; Forjado por matriz de impresión
Forjado orbital, 347
Forjado por matriz de impresión, 338-346
Forjado por secciones, 330
Forjado rotatorio, 440
Forma casi neta, 44
  fundiciones, 228, 238, 245
  maquinado de, 648, 680, 681, 710
  productos en partículas, 442, 477
  productos laminares, 343, 345, 358
Forma de barril (en el forjado), 97, 322
Forma neta; *véase* Forma casi neta
Formabilidad, 300-301
  límite, 419
Formabilidad de lámina, 300-301
Formación de bridas estirado, 436-437
Formación de virutas, 637-652, 686; *véase también* BUE
  procesamiento abrasivo, 725, 732, 733
Formación por granalla, 330, 440
Formado, 683, 685, 697
Formado al vacío, 601
Formado asistido por tapón, 602
Formado con caucho, 456, 626
Formado con prensa de cortina, 415-416
Formado con rodillos, 416
Formado de bridas por contracción, 437-438
Formado de estado sólido, 603
Formado electrohidráulico, 439
Formado electromagnético, 439
Formado en línea, 584
Formado estirado-embutido, 429-432
Formado hidráulico, 420
Formado isotérmico, 306, 314, 343, 353, 441
Formado libre, 602
Formado (maquinado), 683-684, 692
Formado no isotérmico, 314
Formado plástico (de partículas), 468
Formado por burbuja a presión, 602
Formado por cortina, 602
Formado por embutido inverso, 602
Formado por energía de alta velocidad (HERF), 366, 439
Formado por estirado, 418-422
Formado por explosión, 439
Formado por fluencia, 418, 441
Formado por matriz acoplada, 603, 625-626
Formado por prensado, 433-434
Formado por presión, 58

Formado superplástico, 441, 505, 780
Formas, clasificación de, 43-45
Formas (secciones), doblado de, 416
Formas (secciones), manufactura de
por doblado, 414-416, 626
por estirado, 369-370
por extrusión, 581-582
por laminado, 376, 385
por pultrusión, 625
Fosforescencia, 495
Fotoestarcido, 888
Fotolitografía; *véase* Litografía
Fotorresistente, 754, 888
Fractura, 83-90
efecto de la presión hidrostática en la, 90, 94, 97, 300
Fractura de la fusión, 581
Fractura dúctil, 86-87
Fractura en punta de flecha; *véase* Defecto de reventado central
Fragilidad en caliente, 157
Fragilidad por hidrógeno, 789, 793
Fragilización de la soldadura; *véase* Fragilización por hidrógeno
Fresado (corte), 684, 685, 701-706
Fresado (electroquímico), 756
Fresado (químico), 754
Fresado recto, 703
Fresadora de copiado, 703
Fricción, 112
adherida, 290-293
Fricción adherida, 290, 293
en el maquinado, 644
en recalcado, 298, 323, 326, 898
Frita, 521, 903
Frontera de grano, 147
Fuerza de empuje, 640-643
Fuerzas, cálculos para; *véase* también Presiones
carga en matrices, 362-363
cizallado, 404
compactación de polvos, 463
corte, 640-643
doblado, 413-415
embutido profundo, 424
estirado, 371-372
extrusión (metales), 335-357
extrusión (plásticos), 577-579
forjado por matriz de impresión, 341-343
indentación, 328-329
laminado, 379-384
perforado, 334-335
recalcado axial, 319-324
recalcado de una placa, 326-327
Fuerzas de corte, 640-643, 654-655
en corte oblicuo, 650-652
Fullerenos, 510, 910
Función de compras, 960
Función de pérdida de calidad, 934
Fundente, 209
para soldadura, 798-805
para soldadura fuerte, 813, 814
para soldadura suave, 815-816
Fundibilidad, 199
Fundición al vacío, 215, 228, 232, 503
Fundición apretada, 238
Fundición centrífuga, 239
Fundición con molde permanente, 232-238
Fundición continua
de metales, 213
de polímeros, 572
Fundición de cinta, 503
Fundición de hebra (continua), 213
Fundición de lingotes, 212
Fundición de molde permanente de baja presión, 235
Fundición de palanquillas, 212
Fundición de precisión, 188, 228-229, 245
Fundición en arena, 224
Fundición en hueco, 503
Fundición en matrices, 232-238
Fundición en matrices con cámara caliente, 236
Fundición en matriz con cámara fría, 237
Fundición en matriz libre de poros, 238
Fundición en moldes de cerámica, 228-229
Fundición hueca, 234, 503, 573
Fundición pastosa, 503
Fundición por gravedad en matriz, 234
Fundición por inmersión, 606
Fundición por inyección directa, 236
Fundición por levitación, 213
Fundición por modelo consumible, 229-232
Fundición por molde consumible, 221-232
Fundición por revestimiento, 230-231
Fundición por succión, 216
Fundición por vaciado e inversión del molde, 503
Fundición semicontinua, 213
Fusión de metales, 207-209

G

Gases, 172-174, 211
en el procesamiento de polímeros, 573, 593
Gases inertes, 209
Gastos generales, 957
Gatorizing, 280
Generación de calor
debida a la histéresis, 553
en el esmerilado, 724-725
en el estirado, 372
en el forjado, 321
en el maquinado, 643-649, 655-657, 665
en la extrusión, 360
en la extrusión de plásticos, 580
en la soldadura por fricción, 782, 821
en la soldadura por resistencia, 794
Generación (maquinado), 685-686

Germanio, 870
Grabado, 754
Grabado por haz iónico, 854
Grado de polimerización, 532
Gráficas $\bar{x}$-R, 941-942
Grafito
  electrodo, 648-649
  en el hierro fundido, 199-203, 672
  fibra, 509, 513
  lubricante, 114, 237, 353, 509
  moldes, 233, 236
Granallado (del cordón de soldadura), 790
Granate de itrio y aluminio (YAG), 763
Granulación, 462-501
Gránulos; *véase* Abrasivos
Grietas de solidificación, 789
Grietas de templado, 179
Grietas, efecto de las
  en el módulo de ruptura, 92
  en la fatiga, 101
  en la fractura, 90
  en la tenacidad, 94
Grietas por licuación, 789, 812
Guía de luz, 518; *véase también* Fibras ópticas

H

Hacer o comprar, 25
Hechura a la medida, 924
Hendidura (en maquinado), 766, 767
Herramienta rotatoria, 687
Herramientas alimentadas con refrigerante, 659
Herramientas con insertos, 681-682
Herramientas de corte de cerámico, 679, 713
Herramientas de corte, 674-683
Herramientas revestidas, 699
Hidrocarburos, 532
Hidroformado, 436-437, 439
Hidrógeno, porosidad por gas, 173, 205
Hidrorrectificado fino, 736
Hierro dúctil, 202
Hierro fundido, 162, 201-202
  maquinabilidad, 673-681
  propiedades del, 84, 94, 97, *200*
  unión de, 792, 813-816
Hierro fundido blanco, 201
Hierro fundido vermicular, 203
Hierro gris, 201
Hierro maleable, 201
Hierro nodular, 202
Hilado por fundición, 240
Hilado por fusión, 458, 583
Hilandería, 440-441, 583
Hilera, 573, 583, 762, 765
HIP; *véase* Prensado isostático de alta temperatura
Histéresis (en polímeros), 552
Historia; *véase* Manufactura, historia de la
Hojalata, 398
Holgura, 49
Holgura de maquinado, 223, 245, 336, 348
Homogeneidad (de una composición), 151
Homogeneización, 176
Homopolímeros, 534
Horno de túnel, 520
HSS; *véase* Acero para alta velocidad
Humectación, 167-170
  de rellenos, 551
  en compuestos, 618, 621, 627, 632
  en soldadura, 813, 815
  en soldadura fuerte, 813
  en unión adhesiva, 819

I

IA; *véase* Inteligencia artificial
IC; *véase* Circuitos integrados
Implantación iónica, 857-858, 882
Impregnación, 472, 621
Impresión por serigrafía, 902-903
Impurezas en el silicio; *véase* Impurificadores
Impurificadores, 868-869, 881-885
Inclinación (en el corte), 404
Inclusiones, 171
  deformación de las, 282, 303
  efecto en el maquinado, 648, 669
  efecto en las propiedades, 89, 171, 258
  remoción de, 210-211, 214-215, 239
Incremento adiabático de temperatura, 322
Incremento de la tenacidad del vidrio, 521
Indentación, 97-99, 296, 328
Índice del flujo de fusión, 541
Infiltración, 473, 628-632, 826, 843
Información del cliente, 23, 27-30
Ingeniería concurrente, 28-30, 125-128, 135, 249, 935, 952, 960
Ingeniería de manufactura, 945
Ingeniería de proceso, 25, 945
Ingeniería del ciclo de vida, 24, 137-138
Ingeniería inversa, 23
Ingeniería molecular, 909
Ingeniería secuencial, 28
Ingeniería simultánea, 28-30
Ingeniería verde, 24, 137
Inmiscibilidad, 191
Inoculación de la fusión, 202
Insertos (en piezas), 233, 340, 595
Inspección en línea, 52, 931
Instrumentos de medición, 54-55
Integridad superficial, 667, 757
Inteligencia artificial (IA), 33, 774, 920, 932
Intensidad del calor, 783, 791

Intercambio iónico, 521
Interconexión, 898-900
Interfase, 166-170, 613, 631
Interferencia de la luz, 63
Interferometría; *véase* Mediciones ópticas
Intermetálicos, 155-156, 628
Intervalo (de datos), 54
Invar, *117*
Inventario, 929
Investigación del proceso, 25
ISO 9000, 935
Isotáctico, 533
Isotropía (de propiedades), 147, 267, 614
  en cerámicos, 492
Isotropía (del ataque químico), 891

J

JIT; *véase* Entrega justo a tiempo
Junta a tope, 824, 826
Junta de traslapo, 823, 826
Juntas frías, 221, 238, 244
Juntas remachadas, 766

K

Kovar, *117*

L

Lámina bimetálica, 782, 828, 906
Lámina galvanizada, 398-399, 846, 849
Lámina recubierta de aluminio, 399
Lámina revestida, 399, 792
Laminado, 373-385
  de partículas, 465, 502
  en línea con la fundición, 213
Laminado de anillos, 376
Laminado en caliente, 375-376
  de partículas, 473
Laminado en frío, 375
Laminado templado, 396-397
Laminado transversal, 377-378
Laminador continuo, 375
Laminados, 616-618, 828-829; *véase* Revestimiento
Lana de vidrio, 518
Lapeado, 734
Láser, 762-764, 909
  deposición, 852, 855, 860
  para mediciones, 63, 742
  tratamiento caloríffico, 844, 883
Latas de aluminio, 140, 209, 429, 776
Látex, 605
Latones, 206, 305
  maquinabilidad, 399, 673, 699
  propiedades de los, *166*, *175*, *272*, *273*
  soldadura de, 794
Lecho fluidizado, 230
Ledeburita, 161
Levantamiento de la matriz, 345, 429
Ley de Fick, 149
Ley de Hooke, 82
Ley de Joule, 794
Ley de Sievert, 173
LIGA, 907
Limado, 706
Limitaciones de forma; *véase* Diseño de piezas; Capacidades del proceso
Limitaciones del tamaño; *véase* Capacidades del proceso
Límite de resistencia a la fatiga, 101, 554
Límites de conformado, 430-431
Límites de control, 941
Limpieza de metales, 89
Limpieza de rebanado, 879
Limpieza electrolítica, 843
Limpieza en la fabricación de circuitos integrados, 866, 893-894
Limpieza megasónica, 879
Limpieza ultrasónica, 843
Línea de costura, 587
Línea de separación, 338, 594
Línea de solidificación, 598
Línea de transferencia flexible, 924
Línea neutra, 326, 380
Líneas de ensamble, 931
Líneas de flujo; *véase* Fibración
Líneas de Lüders, 266, 300, 397; *véase también* Marcas de la deformación
Líneas de soldadura, 587, 594
Líneas de transferencia, 924
Lingote (silicio), 877
Líquidus, 151
  temperaturas selectas, *200*, *291*, *292*
Lista de materiales, 25, 944
Litografía, 888-891
Llenado del molde, 196
Llenado por gravedad, 466
Longitud crítica, 614
Longitud de contacto; *véase también* Razón *h/L*
  en el forjado, 324, 325, 330
  en el laminado, 381
Lubricación, 114-115
  en el corte, 657
  en el esmerilado, 729
  en el estirado, 372
  en el procesamiento de partículas, 461, 463
  en el procesamiento de polímeros, 551
  en el trabajo de lámina de metal, 442-444
  en el trabajo de metales, 294-296
  en la extrusión, 350, 353
  en la fundición, 213, 235, 237
Lubricantes, 114-115; *véase también* Lubricación

eliminación de, 296, 660
para deformación plástica, *295*
para la remoción de metal, *658*
Luminiscencia, 870

M

Maclaje, 165
Macroataque químico, 283
Macrosegregación, 193
Madera, 618-619
Manipuladores, 34, 331, 918
Manufactura, 3, 21
empresa de, 21
historia de la, 3-7, *5-6*
papel económico de la, 7-9
Manufactura ágil, 952
Manufactura asistida por computadora (CAM), 25, 30; *véase también* CAD/CAM
Manufactura de lámina
metal, 375
plástico, 573-582, 584
vidrio, 517
Manufactura esbelta, 952
Manufactura flexible, 952
Manufactura integrada por computadora (CIM), 30
Manufactura virtual, 953
MAP; *véase* Protocolo para la automatización de la manufactura
Máquina automática para hacer tornillos, 694-695
Máquina automática suiza, 696-697
Máquina de cuatro carros, 435
Máquina de medición de coordenadas (CMM), 42, 64
Máquina, deformación elástica de la; *véase* Deformación elástica
Maquinabilidad, 668
Maquinado, 637-750
bancos de datos, 710
Maquinado abrasivo, 723-736
Maquinado de alta velocidad, 407, 647, 664, 667, 683, 714
Maquinado de alto rendimiento, 665
Maquinado de pasos múltiples, 697-709
Maquinado de precisión, 740-742, 833
Maquinado de un punto, 686-697
Maquinado duro, 672, 703-704
Maquinado electroquímico (ECM), 756-758
tasas de remoción de metal, *755*, *757*
Maquinado en crudo, 503-504
Maquinado no convencional, 753-771
Maquinado no tradicional, 753-771
Maquinado por chorro abrasivo, 735
Maquinado por descarga eléctrica (EDM), 752, 758-761
tasas de remoción de metal, *755*, 759
Maquinado por electrolito con tubo perfilado, 756
Maquinado por flujo abrasivo, 733
Maquinado por haz de alta energía, 761-764
Maquinado por haz de electrones, 761-762, 813
Maquinado por haz de láser, 762-764, 767
Maquinado químico, 754-756, *755*
Maquinado ultrasónico, 734, 735
Maquinaria metamórfica, 925
Maquinaria modular, 925
Maquinaria NC/CNC
compuestos, 623
esmerilado, 732
maquinado no convencional, 760
máquinas herramienta, 694-696, 703, 717-718, 831
plásticos, 606
robot, 920
trabajado de lámina metálica, 408, 417, 436, 440
Máquinas automáticas de ejes múltiples, 696
Máquinas automáticas de un eje, 695
Máquinas de medición, 42, 64
Máquinas herramienta, 715-718
control de, 47, 716
rigidez de, 716
Maquinas herramienta CNC; *véase* Maquinaria NC/CNC
Marca de hundimiento, 480, 588
Marcas de la herramienta de estiramiento-deformación, 265, 299
Marcas superficiales, 101, 232, 553-554, 556
Martensita, 179-181
Martillado con municiones, 240, 736
Martillado con perdigones, 329
Martinetes, 364-366, 365
equivalencia con prensas, 367
Materiales alternos, 77, 126, 958
Materiales cerámicos, 497-499
Materiales de dos fases, 166-170
Materiales de matrices, 361, *362*
Materiales disímiles
soldadura de, 788, 805, 807
unión adhesiva de, 817, 822
unión de, 779-782, 810
Materiales magnéticos, 459, 477, 508
Materiales maquinables, 669-670
Materiales para herramientas; *véase* Herramientas de corte; Materiales para matrices
Materiales para lámina, 398-400
Materiales pirofóricos, 461, 632
Materiales soldables, 788-791
Matrices compuestas, 407, 433
Matrices de aleación de molibdeno, 233, 237, 306, 344
Matrices de transferencia, 434-435
Matrices para trabajado de lámina de metal, 256
Matrices progresivas, 407, 434-435
Matriz, 136, 153, 167, 491, 614
Matriz (dado), 481-482
Matriz araña, 351-352, 502, 582
Matriz de regla de acero, 408
Matriz puente, 351-352, 502, 582
Matriz (silicio), 876

Mazarota, 217
Mecánica de fractura, 94
Mecanización, 4, 34; *véase* Automatización
Mecatrónica, 37
Medición ultrasónica, 58, 109
Mediciones ópticas, 62-63
Mejoramiento continuo, 935
Metal de relleno, 784
  para soldadura, 792-793, 801-804
  para soldadura fuerte, *813*
  para soldadura suave, *815*
  Metal maestro, 207
Metal virgen, 207
Metales para soldadura fuerte, *813*
Metales primarios, 129
Metales, puros, solidificación de, 146-148
Metales vítreos, 469
Metalización, 822
  en circuitos integrados, 850, 873, 884-887, 894
Metalurgia de polvos, 454-486
  productos, 475-478, 672
Método de Czochralski, 877
Método de la bolsa húmeda, 465
Método de la bolsa seca, 465, 502
Método del corazón perdido, 593, 596
Métodos alternos de procesamiento, 957-958, 960-967
Metrología de ingeniería, 52-72
Metrología industrial; *véase* Metrología de ingeniería
Mezclado, 461
Mica, 498
Microfabricación, 905-910
Microporosidad, 192; *véase también* Porosidad
Microsegregación, 157
Microfibras ("bigotes"), 619
Micromaquinado superficial, 905
Micromaquinado volumétrico, 906
Micrómetro, 58
Miniaturización (de IC), 875
Modelado de procesos, 26
Modelado sólido, 23, 830
Modelo de Kelvin, 543-544
Modelos (para fundición), 221-224
Modelos de proceso, 26
Módulo de cortante, 542
Módulo de flexión, 554
  valores selectos de, *135*, *559*, *565*
Módulo de ruptura, 91, 492
Módulo de tensión, 553
Módulo de Young, 82; *véase también* Propiedades mecánicas
  de compuestos, 615-616
  del hierro fundido, 201
Módulo elástico; *véase* Módulo de Young
Módulo específico, 126
Módulo secante, 84
Molde enfriado por agua, 212
Moldeado por extrusión; *véase* Extrusión por tornillo
Moldeado por extrusión y soplado, 599
Moldeado sin caja de moldeo, 226
Moldeo
  de partículas, 468, 502
  de plásticos, 572-575
  para fundición, 223-232
Moldeo al vacío (arena), 226
Moldeo de núcleo fundible, 593, 593-597
Moldeo de precisión por inyección de polvos, 468
Moldeo en autoclave, 625
Moldeo en cáscara, 227
Moldeo en concha de cerámicos, 230
Moldeo en frío, 590
Moldeo en yeso, de París, 228, 502
Moldeo húmedo, 625
Moldeo plástico, 900
Moldeo por bolsa a presión, 625
Moldeo por bolsa de vacío, 625
Moldeo por compresión, 502, 590
Moldeo por transferencia de resina (RTM), 627
Moldeo por estirado soplado, 600
Moldeo por inyección, 570, 585-590
  de aleaciones tixotrópicas, 238
  de espumas estructurales, 605
  de modelos de cera, 230
  de partículas, 468-469, 502
  temperatura de, *559*, *565*
Moldeo por inyección asistido con gas, 589
Moldeo por inyección con reacción (RIM), 589, 605, 625
Moldeo por inyección y soplado, 599
Moldeo por pasta aguada, 228
Moldeo por soplado, 519-520, 597-607
Moldeo por transferencia, 502
Moldeo posterior, 900
Moldeo rotacional, 574
Moldeo sin bebedero, 587
Moldes de caucho, 462, 510, 831
Moldes semipermanentes, 233
Moldura, 227
Molienda de partículas, 500; *véase también* Pulverización
Molienda por impacto, 500
Molino en tándem, 374
Molino Sendzimir, 374-375, 384
Monitoreo del proceso, 27
Monocristal, 175
  fibras, 618
  fundiciones, 219-220
  silicio, 877
Monocristal piriforme, 877
Montaje a través del agujero, 896, 904
Morfología
  de inclusiones, 210
  de materiales de partículas, 459
  de rellenos, 551-552

MOS complementario, 873, 893-894
MOSFET; *véase* Semiconductor de óxido metálico
Motor de reacción, 9-11, 103-106, 211, 343, 849, 852, 853
Movimiento de material, 27, 915-921
  efecto de la distribución de planta en el, 926-927
Muescas, 401

N

Nanocristalino, 505
Nanofabricación, 909
Nanotecnología, 740, 909-910
NDT; *véase* Ensayos no destructivos
Niblado, 401
Nitruración, 182, 845, 855
Nitruración iónica, 182, 855
Nitruro de boro cúbico (CBN), 509, 680, 726
Nitruro de boro cúbico policristalino, (PCBN), 680, 714
Nitruro de silicio, 488, 493, 499, 509
  barrera de difusión, 883
  deposición de, 855, 885
Nitruros, 508
Nivelado por rodillos, 397
Normas, 15
Nucleación, 158, 536
Nucleación heterogénea, 160, 190, 538
Nucleación homogénea, 158
Núcleos, 217, 223-230, 233, 239, 468, 478
Número de la malla, 459

O

Ondulación, 65-67
Operación sin atención, 665, 717, 759, 929
Optimización, 719-722
Ordenamiento en polímeros, 533
Orejado, 427, 429, 445
Organisol, 573
Organización de la manufactura, 27
Organización de la producción, 920-933
Orientación biaxial de las fibras, 616
Orientación preferida; *véase* Fibración; Alineación molecular; Textura
Orificios diminutos; *véase* Porosidad por gas
Oxidación
  del silicio, 883
  de metales, 843
Oxidación por plasma, 883
Óxido de aluminio; *véase* Alúmina
Oxinitruros, 508

P

PA; *véase* Promedio aritmético
Panales, 828-829
Pandeo
  de compuestos, 552
  del punzón, 361-362
  en recalcado, 334, 336-337
Paquete doble en línea (DIP), 896
Paquetes refractarios sellados en vidrio, 901
Parison, 518, 600
Parte superior caliente, 212
Partículas esferoides, 459
Partículas submicroscópicas, 493
Partido, 401, 692
Pasividad (de IC), 894
Patentado, 180
Patrón de deformación, 290, 325, 338-341, 349-353, 644, 674
Patrón de flujo; *véase* Patrón de deformación
Película plástica, 582-583
Películas superficiales, 112, 460-461
Peltre, 204
Pepita de soldadura, 795
Perforado, 690-691, 715
Perforado con rodillos, 408
Perforado rotatorio de tubos, 377
Perforado, 333, 350, 355, 401, 408, 697
Perlita, 162
Peso molecular, 532
Piezoelectricidad, 116, 494, 495, 508, 557, 905
Piezorresistividad, 495
Pintado, 858-860
  lámina prepintada, 399
Piroelectricidad, 115, 495
Pirólisis, 618, 881
Pistola de detonación, 847
Placa terna, 400
Planchado, 423, 428-429, 439, 643
Planeación de los recursos de manufactura (MRP-II), 944
Planeación de requerimientos de materiales (MRP), 944
Planeación del proceso asistido por computadora (CAPP), 944
Plano de separación, 223
Plantilla de perforación, 700
Plantillas, 25
Plasma, 853-854
  alta temperatura, 798
Plasticidad inducida por transformación (TRIP), 284
Plásticos, 134, 557-567; *véase también* Polímeros
  defectos de procesamiento en, 581-585
  maquinado de, 766-767
  procesamiento de, 571-607
  propiedades selectas de los, *134, 559, 565*
  unión de, 821-822
Plásticos celulares, 604-605
Plásticos de fusión caliente, 572
Plásticos de ingeniería, 558
Plásticos espumados, 604-605
  patrones, 231
Plastificantes, 501
Plastisoles, 573

PLC, 37
Plegamiento, 427
Plomo
  aleaciones, 203, 304
  propiedades del, *200*, *292*
  soldaduras, *816*
  toxicidad, 203, 304, 399, 461, 514, 522, 815
Policidas, 887
Polimerización, 530-532, 545-549
Polímero cristalino, 536-537
Polímero de contracción por calor, 544, 556, 755
Polímero injerto, 534
Polímeros, 529-569
Polímeros de cristal líquido, 538
Polímeros de partículas, 604
Polímeros de reacción en cadena, 530-532
Polímeros de reacción por etapas, 532
Polímeros lineales, 532-545
Polímeros termofijos, 545-547; *véase también* Plásticos
  adhesivos, 820
  clases específicas, 564
  propiedades de, *565*
Polímeros termoplásticos, 532-545, 547, 554; *véase también* Plásticos
  adhesivos, 820
  clases específicas, 558-563
  elastómeros, 548
  propiedades de los, *559*
Polímeros vítreos, 540
Polimezcla, 534
Polisilicio, 870, 884
Porcelana, 506
Porosidad; *véase también* porosidad por gas; Microporosidad
  eliminación de la, 241, 282
  en cerámicos, 494
  en cuerpos de polvo, 455, 468-473, 494, 672
  en la fundición, 219, 234, 238, 239, 245
  en plásticos espumosos, 605
  en plásticos, 489, 593
  en ruedas abrasivas, 727
  en soldadura, 789, 792-793
Porosidad por gas, 173, 205, 237, 242, 302
  en soldadura, 789, 792, 793
Portapiezas, 405, 418, 423-430, 441-442
Portaherramienta, 682, 925
Potencia de penetración, 850
Práctica de fusión de lingotes, 208
Precalentamiento (para soldadura), 790
Precisión, 54, 740-742
Predeposición, 882
Premoldes, 900
Prensado en caliente, 473, 505
Prensado en frío, 462-465, 502
Prensado húmedo, 502
Prensado isostático de alta temperatura (HIP), 241
  de fundiciones, 241
  de partículas, 474, 505
Prensado isostático en frío, 464, 502, 509
Prensado isostático; *véase* Prensado isostático en frío; HIP
Prensas, 366-367, *365*, 442
Preparación de la junta, 823-827
Preparación superficial, 842-843, 849
  en la fabricación de circuitos integrados, 883, 895
  mecánica, 736, 842
  para pintar, 859
  para recubrimientos superficiales, 850, 860
  para soldadura fuerte, 813, 814
  para soldadura suave, 815-816
  para soldadura, 777-780, 788, 794
  para unión adhesiva, 818
  para unir plásticos, 821-822
  química, 843
Prepregs, 620
Presión
  efecto en metales, 97, 289
  efecto en polímeros, 538, 540
Presión de la interfase; *véase* Presiones
Presión de la matriz; *véase* Presiones
Presión específica de corte, 653
Presión hidrostática, 90, 289
  efecto en el cizallado, 406
  efecto en la fractura, 90, 97, 299, 491
  en el corte, 642
  en el doblado, 414
  en el prensado, 241, 464
  en la extrusión, 351, 359
Presiones
  efecto de las superficies inclinadas, 332
  en la herramienta de corte, 652
  interfase, 111
  permisibles en las herramientas, 360-364
  reducción de la, 288
Presiones, cálculo de; *véase* Fuerzas
Presiones, comunes
  en compuestos, 627
  en el acuñado, 346
  en el moldeo de plásticos, 577, 585, 589-592, 597-602, 604
  en el portapieza, 424
  en el prensado de partículas, 464, 467, 502-505
  en el prensado isostático en frío, 464
  en HIP, 241, 473
  en la fundición de matrices, 236-238
  en la unión de alambres, 899
  en maquinado por chorro abrasivo, 735
  en matrices, 361-363
Principio de Abbe, 58
Principios de medición, 53-54
  exactitud de los, 52
  precisión de los, 54
Problemas, tipos de, 14

Procesamiento de la fusión
de polímeros, 574-597
de vidrios, 510
Procesamiento de multicomponentes de espuma líquida, 605
Procesamiento de pared caliente, 880
Procesamiento de partículas; *véase* Cerámicos; Metalurgia de polvos
Procesamiento en pared fría, 880
Procesamiento primario, 129-130, 315
Procesamiento semisólido, 238
Procesamiento térmico rápido, 880
Procesamiento termomecánico, 284-285
Proceso, capacidad del, 939-941
Proceso con rasero, 503
Proceso damasquinado, 887
Proceso de abajo hacia arriba, 906, 909
Proceso de arriba abajo, 905, 909
Proceso de doblado, 410-418
Proceso de emulsión directa con pantalla de acero, 902
Proceso de la cera perdida, 231
Proceso de la espuma perdida, 232
Proceso de vidrio fundido, 517
Proceso dúplex, 209
Proceso óptimo de manufactura, 922-924, 960-967
Proceso papel-cinta, 503
Proceso por CO_2, 225
Procesos abrasivos, 730-732
Procesos, clasificación de; *véase* Clasificación de procesos
Procesos de deformación volumétrica, 260, 312-393
Procesos de deformación, mecánica de los, 286-300
Procesos de estado estable, 315, 350, 380
esfuerzo de fluencia en, 316
Procesos de formado (vidrio), 517-520
Procesos de fundición de formas, 213-239
Procesos de fundido, 188-256
Procesos de manufactura, competencia entre, 956-957
Procesos de polímeros; *véase* Plásticos
Procesos de reblandecimiento, 276
Procesos de restauración, 276
Procesos de soldado, 777-809
Procesos de trabajado de lámina de metal, 260, 441-452
Procesos de unión, 773-839
clasificación de los, 773-774
Procesos en estado no estable, 316-319, 350
esfuerzo de fluencia en, 316-318
Procesos en molde abierto, 622-626
Procesos secundarios, 131, 315
Procesos unitarios, 125
Producción en masa, 924-925
Producción por lotes, 915, 926-930
Productividad, 953
Producto nacional bruto, 7-8
Productos de bioingeniería, 12, 477, 840
Productos semifabricados, 315
Profundidad de corte, 638
efecto en la vida de la herramienta, 665
Programación, 37-38
Programas expertos, 26, 358
Promedio a la línea central (CLA), 65
Promedio aritmético de la rugosidad (AA), 65
Promedio de la raíz cuadrada media (RMS), 65
Promedio estadístico, 54, 936
Propiedades de fundición de metales, 193-198
Propiedades de impacto
de cerámicos, *135*
de compuestos, *136*
de polímeros, *134*, *553*, *559*
Propiedades de servicio
de materiales, 77-123
de plásticos, 552-558
valores selectos de, *133*, *134*, *135*, *136*
Propiedades direccionales; *véase* Anisotropía
Propiedades eléctricas, 115-116, 494, 557-560
Propiedades electrónicas, 867-870
Propiedades físicas, 111-118
Propiedades magnéticas, 116
Propiedades mecánicas
cerámicos, *133*
compuestos, *136*
fibras, *618*
metales, *133*, *200*, *291*, *292*
plásticos, *134*, *559*, *565*
variaciones de las, 172
vidrios, *515*
Propiedades ópticas, 118
de cerámicos, 495
de polímeros, 551-557
de vidrios, 512-513, 522
Propiedades químicas, 118, 495, 556
Propiedades térmicas, 115-116
Propiedades tribológicas, 110-115
Protocolo para la automatización de la manufactura (MAP), 930
Prototipos rápidos, 24, 831
Prueba a la ralladura, 99
Prueba de compresión de anillos, 332-333
Prueba de esfuerzo-ruptura, 105
Prueba de impacto de Charpy, 93, 554
Prueba Izod, 554
Puente de chatarra, 405, 407, 443
Pulido, 736, 877, 920
Pulido al fuego, 520
Pultrusión, 625
Punto de ablandamiento de Littleton, 515
Punto de ablandamiento de Vicat, 556
Punto de fusión
de metales, *200*
polímeros, 534-536, *559*
Punto de referencia, 23, 25, 128, 952
Punto fictivo; *véase* Temperatura de transición vítrea
Punzonado, 401

Purga de aire, 233, 587, 601
PVD; *véase* Deposición física de vapor
PVD térmica, 852

Q

Quemado (en esmerilado), 620

R

Radiofrecuencia (rf)
  caldeo por radiofrecuencia, 822, 854
  chisporroteo, 82
Radios, efecto de los
  en el doblado, 410-414
  en el estirado profundo, 427
  en el forjado, 443
Radios, recomendados; *véase* Diseño de piezas
Rango de congelamiento, 156
Ranurado, 702
Rapidez crítica de enfriamiento, 181, 792
Rasurado, 407
Razón de corte, 638
Razón de esmerilado, 726-728
Razón de estirado, 424
Razón de extrusión, 354
Razón *h/L*, 296-297
  en el estirado, 370-371
  en el forjado, 327, 328, 330, 346
  en el laminado, 378, 379-382
  en la extrusión, 359
  en la indentación, 297, 328-329
Razón Hall-Petch, 174
Razón límite de estirado (RLE), 426-427
Reacción de condensación, 532
Reacción de termita, 461, 807
Reacción exotérmica, 629
Reacciones de estado sólido, 160-163
Reacciones invariantes, 153, 154
Reactor, 855-857, 880, 891
Reactor plano, 891-892
Realización de los productos, 22
Rebaba
  en fundición, 239
  en forjado, 338, 341
  en moldeo, 590
  en soldadura, 782, 797
Rebabas, 391, 740; *véase también* Grietas
  efecto en el doblado, 411
  efecto en el formado de bridas, 437
  efecto en la ductilidad, 403
  remoción de, 733, 735, 755, 920
Rebordeado, 332
Recalcado; *véase también* Prueba de compresión
  de placas, 325-327
  de un cilindro, 319-324
Recalcado progresivo, 336
Recalcador horizontal, 336, 343-345, 349, 367, 368
Receptor de rebaba, 341
Rechazado de potencia, 441
Rechazado torneado, 440
Rechupe (en extrusión), 360
Rechupe (en fundición), 190-192, 212
Reciclaje, 24, 127, 139-142
  aluminio, 140, 204, 209
  automóviles, 140, 596, 958
  cerámicos, 140, 497
  cobre, 130, 205
  compuestos, 142, 619, 621
  lubricantes, 294
  metales, 129-131, 139-140, 217
  plásticos, 141-142, 532, 543, 544, 550, 557, 561, 575
  plomo, 203
  vidrio, 135, 514
  virutas, 637, 660
Recocido, 176, 272-276; *véase también* Recocido para alivio de esfuerzos
  del vidrio, 520
  en soldadura, 783
  estado sólido, 882-886
  para el control del tamaño de grano, 396
  parcial, 273, 398
  textura, 274
Recocido de normalización, 179
Recocido de proceso, 176, 353
Recocido de recuperación, 274, 398
Recocido galvánico, 399, 846
Recocido para alivio de esfuerzos, 106, 176, 790
Recortado, 401, 702
Recorte (de rebaba), 341, 766
Recorte (de partes estiradas), 401
Recrecimiento con soldadura, 846-848
Recristalización, 274-275
  dinámica, 276
  en la soldadura, 783-788
Rectificado fino, 733
Rectificado por aplastamiento, 728
Recubrimiento de cromato, 844
Recubrimiento de cromo, 850
Recubrimiento de metales, 849-850
Recubrimiento por difusión, 845-846
Recubrimiento sin electricidad, 850
Recubrimientos; *véase* Recubrimientos superficiales
Recubrimientos de baño caliente, 398, 846
Recubrimientos de conversión, 294, 819, 843-844, 859
Recubrimientos de fosfato, 294, 353, 844
Recubrimientos del molde, 233
  efecto en la fluidez, 199
Recubrimientos orgánicos, 858-860
Recubrimientos para barrera térmica, 847, 853

Recubrimientos superficiales, 522; *véase también* Revestimiento; Tratamientos superficiales
herramientas de corte, 677, 679-680
Recuperación (de deformación elástica), 82, 543, 553, 906
Recuperación dinámica, 277
Recuperación elástica, 398
en el doblado, 409, 412-413
en el embutido profundo, 423
en el estirado, 419, 431, 442
en polímeros, 603, 628, 776
Red especial, 146
Reducción en área, 86-90
valores selectos de la, *291*, *292*
Reembutido, 428-429
Reembutido inverso, 428-429
Refinamiento con electroescoria, 210
Refractarios; *véase* Cerámicos refractarios
Refrentado, 701
Refrigerante; *véase* Fluidos de corte
Régimen de temperatura caliente, 103, 176
Régimen de temperatura fría, 103, 175
Regla de Chvorinov, 217, 247
Regla de la palanca inversa, 151
Regla de las mezclas, 614
Regla del brazo de palanca, 151
Reimpacto, 472
Relaciones estructura-propiedad, 165-175
Relleno, 219
Rellenos (para plásticos), 549-551, 614
Remartillado en frío, 472
Remoción de virutas, 648-649, 657
Reofundición, 238
Reología, 194
de polvos, 461, 501
de termofijos, 547
de termoplásticos, 538-545
de tintas, 902
Reproducibilidad, 939
Repujado, 419
Requisitos de energía
en corte, 642, 650-655, *653*
en cizallado, 404
en el ensayo de tensión, 87, 91
en esmerilado, *726*
en forja, 321, 342, 364-365
en impacto, 93
Requisitos de habilidad, relativos; *véase* Capacidades del proceso
Requisitos de potencia en el corte, 654-655, 702, 715
en el estirado, 371
en el laminado, 382
en la extrusión por tornillo, 579
en la soldadura, 798, 808
Resaltes para embutido, 419, 429-432
Resina en etapa B, 227, 468, 546, 572, 832
Resinas; *véase* Polímeros
Resistencia a la abolladura, 431
Resistencia a la cedencia, 84
de materiales para matrices, 84
valores selectos de la, *200*, *291*, *292*
Resistencia a la compresión, 95
Resistencia a la fatiga, mejoramiento de, 108, 241, 297, 329, 379, 494
Resistencia a la flexión, 91, 554
valores selectos de, *136*, *137*, *632*
Resistencia a la ruptura, 91
Resistencia a la ruptura en tensión; *véase* Resistencia a la tensión
Resistencia a la tensión, 84; *véase también* Propiedades mecánicas
conversión a dureza, 328
efecto del trabajo en frío en la, 271
esfuerzo de fluencia medio, 318
Resistencia al impacto térmico, 675
Resistencia dieléctrica, 115, 758
Resistencia en crudo, 463
Resistencia específica, 126
Resistencias, 873, 901
Resistividad, 115, 867-870, 887
de semiconductores, 868, 873, 881
Resolución (en la medición), 54
Resolución (en litografía), 889
Retardantes de flama, 550
Retroalimentación, 33, 34
Revenido de la martensita, 180
Revestimiento, 465, 779, 781, 812, 813, 827, 847
Revestimiento duro, 846-847
Revestimiento por soldadura, 847
Revestimiento sólido, 230
Revolución industrial, 4
Riesgo de explosión, 461, 575, 625
Riesgos a la salud, 26, 209, 294, 774; *véase también* Toxicidad
RIM estructural, 627
RIM; *véase* Moldeo por inyección a reacción
RLE; *véase* Razón límite de estirado
Robot inteligente, 920
Robot sensorio, 920
Robots, 34, 918-921
diseño para, 47
Rociado con metal fundido, 847, *848*
Rocío con plasma, 847, *848*
Rocío de polvos con oxígeno y gas combustible de alta velocidad, 847, *848*
Rodillo de bruñido, 383
Rompe virutas, 648, 662
Roscado interior por formado en frío, 380
Roscado interior, 706
por formado en frío, 379
Roscas, manufactura de
corte, 686, 706
esmerilado, 730
formado, 379

laminado, 377-379, 693
moldeo de plástico, 595
Rotomoldeo, 574
RST; *véase* Tecnología de solidificación rápida
Rubí, 499
Ruedas de amolar, 726-728
apresto, 728
rectificación, 728
Rugosidad; *véase* Rugosidad superficial
Rugosidad RMS; *véase* Rugosidad
Rugosidad superficial, 65-67; *véase también* Acabado superficial
de lámina de metal, 401
efecto en el embutido profundo, 427, 429
efecto en la fatiga, 101
efecto en la tribología, 113-115
en el maquinado, 667-668
medición de la, 68-72
obtenible, 68
para uniones, 813, 819
Ruptura, 89, 105

S

Secado
de moldes de fundición, 225
de partículas, 469, 503
de pintura, 858
Secado por aspersión, 461-462, 501
Secado por congelación, 501
Secciones; *véase* Formas
Segregación, 157, 193
Segregación inversa, 193
Segregación normal, 193
Segregación por gravedad, 193
Seguimiento de la costura, 804
Seguridad, 26, 128; *véase también* Riesgos de explosión; Riesgos para la salud
Selección de materiales, 126, 132
Sellado magnético térmico, 822
Sellado térmico, 821
Semiconductor de óxido metálico (MOSFET), 872
Semiconductor intrínseco, 868
Semiconductores, 867-870
Sensado táctil, 920
Sensibilidad a la tasa de deformación, 277-281
de polímeros, 541-542, 553, 597, 602
de vidrios, 513
efecto en el estirado, 422
efecto en la ductilidad, 279, 298-299
efecto en RLE, 426
en corte, 643
en el trabajo en frío, 279
Sesgo (de superficies), 67
Sialon, 509
Silicatos, 498
Sílice, 497, 512, 875
en circuitos integrados, 883, 885
fundida, 512
Silicio, 868, 883, 906
deposición de, 884, 885
en aluminio, 204, 673, 681
oblea, 875-879
Silicio de grado electrónico (EGS), 876-877
Silicio policristalino; *véase* Polisilicio
Siliciuros, 508
Simulación de materiales
para forjado, 341
para solidificación, 221
Sinterizado
de cerámicos, 503-504
de metales, 468-473
de polímeros, 604
Sinterizado de fase líquida, 469, 476
Sinterizado de polvo suelto, 465-466
Sinterizado por chispas, 473
Sinterizado por láser, 832
Sinterizado por líquido reactivo, 504
Sinterizado por reacción, 504
Sinterizado selectivo por láser, 832-833
Sistema de ensamble flexible (FAS), 932
Sistema de manufactura flexible (FMS), 929-930
Sistema hierro-carbono, 162-163, 198
Sistema peritéctico, 153
Sistemas de administración de información (MIS), 945
Sistemas de manufactura, 915-947
Sistemas microelectromecánicos (MEMS), 905
SMC; *véase* Compuesto de moldeo para lámina
Sobrecalentamiento, 160, 194
efecto en la fluidez, 196
Sobreenvejecimiento, 178
Soldabilidad, 788-794
Soldado, 810, 814-816
al sustrato, 898
de tableros de circuitos impresos, 904-905
Soldadura a tope, 779, 781, 802
Soldadura a tope por arco eléctrico, 797
Soldadura autógena, 800, 804-805
Soldadura blanda por inmersión, 816
Soldadura con arco de plasma, 800
Soldadura con electrodo no consumible, 798-801
Soldadura con electroescoria, 729
Soldadura con gas, 806-807
Soldadura con metal y gas inerte, 801
Soldadura con oxígeno y gas combustible, 806
Soldadura con solventes, 550, 822
Soldadura con termita, 807
Soldadura de arco con núcleo de fundente, 802
Soldadura de arco eléctrico, 798-805
Soldadura de costura, 795
Soldadura de costura por resistencia, 796

Soldadura de electrodo consumible, 801-804
Soldadura de espárrago por descarga de capacitor, 805
Soldadura de espárragos, 803-804
Soldadura de estado sólido, 778-783, 898
de la porosidad, 241, 282
de polímeros, 599
Soldadura de pasos múltiples, 789
Soldadura de pieza de trabajo consumible, 804-805
Soldadura de proyección, 796, 804
Soldadura de puntos, 795
Soldadura de puntos por resistencia, 794-798
Soldadura de traslapo, 778
Soldadura de tungsteno con arco eléctrico y gas, 798-799
Soldadura eléctrica a tope, 781
Soldadura electrogaseosa, 803
Soldadura en caliente, 781-782
Soldadura en frío, 778-779
Soldadura fuerte, 810, 813-814
Soldadura fuerte activa, 823
Soldadura fuerte al vacío, 814
Soldadura fuerte por difusión, 814
Soldadura fuerte por inmersión, 814
Soldadura metálica con arco eléctrico y gas, 801-802
Soldadura metálica con arco protegido, 802
Soldadura MIG, 801
Soldadura oxiacetilénica, 806
Soldadura por arco eléctrico y recalcado, 796
Soldadura por arco en gas inerte con electrodo de tungsteno, 800
Soldadura por arco sumergido, 802-803
Soldadura por compresión de costura, 796-797
Soldadura por difusión, 780-781
Soldadura por etapas, 792
Soldadura por explosión, 779
Soldadura por fase de vapor, 905
Soldadura por forja, 781
Soldadura por fricción, 782
Soldadura por fricción agitada, 783
Soldadura por fusión, 784-810
Soldadura por gas caliente, 821
Soldadura por haz de alta energía, 807-809
Soldadura por haz de electrones, 807-808
Soldadura por inducción de alta frecuencia, 796
Soldadura por ola, 903-904
Soldadura por percusión, 805
Soldadura por presión, 111, 282, 353, 780
Soldadura por resistencia de alambre, 821
Soldadura por resistencia de alta frecuencia, 796
Soldadura por resistencia eléctrica, 794-797
Soldadura por sobrecapas de franja, 847
Soldadura rotatoria, 821
Soldadura suave por etapas, 904
Soldadura suave ultrasónica, 816
Soldadura TIG, 798
Soldadura ultrasónica, 779
Soldaduras para soldadura blanda, 815
Sólidas, 148
temperaturas seleccionadas, *200*, *301*, *302*
Solidificación (de metales), 144-160, 190-194
de polvos, 457
direccional, 219, 246
en fundición de formas, 216-219, 234
en lingoteras, 212
en uniones, 784-788, 812
progresiva, 217
simulación de, 220
Solidificación (de polímeros), 536-538
Solidificación dendrítica, 144, 238
efecto en la fluidez, 197
efecto en la segregación, 193, 628
Solidificación direccional, 219, 246-247
Solidificación no en equilibrio, 156-157
en la soldadura, 783-788
Solidificación progresiva, 217-219
Solución sólida sustitucional, 775
Soluciones sólidas, 148-154, 160
ductilidad de, 271
en cerámicos, 504
propiedades de, 166
soldadura de, 784-786, 788
solidificación de, 191
Soluciones sólidas intersticiales, 149, 166, 883
fenómenos del punto de cedencia en, 265
Solvus, 154, 160
Sopladuras, 173, 244, 302; *véase también* Porosidad por gases
Subgranos, 175
Sublimación, 501
Sujetador; *véase* Portapiezas
Superabrasivos, 725, 732
Superacabado, 733
Superaleaciones, 170-171, *171*, 211, 305-306
forjadas, 305-306, *292*
fundición, 207, *200*
maquinabilidad de, 674
superplásticas, 280, 343
unión de, 781, 793
Superconductores, 115, 508, 630
Superplasticidad, 279-281

T

Tablero de circuitos impresos, 901-905
Taladrado, 683, 697-701, 715
no tradicional, 760-762, 764
velocidades típicas para el, 711-713
Taladrado capilar, 757
Taladrado por corriente de electrón, 756
Taladro de cañones, 692
Taladro de horquilla, 700
Tamaño de grano, 158-159
de cerámicos, 493

efecto de la velocidad de enfriamiento en el, 196-197
efecto en la cáscara de naranja, 300
efecto en la resistencia, 174-175, 398
efecto en la superplasticidad, 280
efecto en la termofluencia, 280, 494
microcristalino, 505
Tamaño de partícula, 459, 501
Tamaño del lote, 650, 921
efecto en los métodos de producción, 922-924
Tamaño mínimo de presentación, 875
Tambor de trefilado, 369
Tarima, 683
Tasa de deformación, fórmulas para
compresión, 277, 321
corte, 638
extrusión, 354
forjado por matriz de impresión, 342
laminado, 381
tensión, 103, 513
Tasa de la deformación por cortante, 540
Técnicas de cambio rápido de matriz, 394, 434
Técnicas de inspección, 109
Tecnología de grupo (GT), 44-46, 341, 921, 926, 927, 958
Tecnología de solidificación rápida (RST), 458
Temperatura de deflexión por calor, 556
valores selectos de la, *559*, *565*
Temperatura de desviación, 556
Temperatura de transición vítrea, 512, 538
valores selectos, *559*
Temperatura homóloga, 103, 644
de la transición vítrea, 498, 538
de recristalización, 275
de recuperación, 274
del trabajo en caliente, 276
Temperaturas; *véase también* Generación de calor; Temperatura homóloga
para el trabajo en caliente y recocido, *291*, *292*
para moldeo por compresión, *559*, *565*
para moldeo por inyección, *559*, *565*
Temperaturas de recocido, *291*, *292*
Templabilidad, 182
Templado del vidrio, 521
Templado (metales), 178, 179; *véase también* RST
Templado por rodillos, 457
Tenacidad, 87, 94; *véase también* Propiedades mecánicas
Tenacidad a la fractura en deformación plana, 94
Tenacidad de fractura, 93-94
Tensión biaxial, 287, 420-423
efecto sobre la superficie de cedencia, 426
Tensión superficial, 167
Tensiones en el laminado, 382
Teorema de Bernoulli, 216
Termodo, 898
Termofijos; *véase* Polímeros termofijos
Termofluencia, 105
de adhesivos,
de cerámicos, 492-496
efecto del tamaño de grano en la, 175, 248, 280
de polímeros, 554-556
Termoformado, 600-602
Tex, 583
Textura, 267-271; *véase también* Valor de *r*
Textura superficial; *véase* Topografía superficial
Texturizado de rodillos, 400
Tiempo de corte, 714
Tiempo de entrega; *véase* Capacidades del proceso
Tiempo de relajación, 555
Tiempo de solidificación, 260
Tinta (para estampar por estarcido), 902
Tinta para soldadura, 905
Tixoformado, 238, 345
Tixomoldeado, 239
Tixotropía, 540, 820
Tolerancias; *véase* Tolerancias dimensionales
Tolerancias dimensionales, 48-52, 68, 941; *véase también* Diseño de piezas; Capacidades de proceso
Tomboleado, 735
Tomografía por computadora (CT), 109
Topografía superficial, 64-70; *véase también* Acabado superficial de lámina, 400
Torneado, 652-653, 684, 685
Torneado ligero, 502
Torneado por corte, 440
Torno, 688-690
Torno de copiado, 694
Torno mecánico, 688-690
Torno paralelo, 688-690
Torno revólver, 693
Torpedo, 585
Toxicidad, 457, 461, 550, 673, 884, 885; *véase también* Riesgos para la salud; Plomo
Trabajado controlado en caliente, 285, 303, 314
Trabajo; *véase* Energía
Trabajo crítico en frío, 274
Trabajo de metal; *véase* Deformación volumétrica; Trabajado de lámina de metal
Trabajo de prensa; *véase* Formado en prensa
Trabajo en caliente, 276-284, 314
controlado, 285
destruyendo la estructura de la fundición, 281-282
esfuerzo de fluencia, 289
temperaturas, 276, *291*, *292*
Trabajo en frío, 271-273, 314
esfuerzo de fluencia en el, 260-265, 289, 316-318
Trabajo en tibio, 279, 315
Trabajo redundante, 281, 296, 355, 360, 371
Transferencia del modelo, 888
Transferencia del modelo por despegue, 890
Transferencia sustractiva del patrón, 891

Transformación eutectoide, 160
Transformación isotérmica, 179
Transformaciones alotrópicas, 147, 285; *véase también* Transformaciones polimorfas
Transformaciones de fase; *véase* Transformación alotrópica; Martensita; Transformaciones polimorfas
Transformaciones polimorfas, 491, 504, 507
Transformador diferencial, 61
Transición dúctil a frágil, 93
Transistor, 870-873
Transistor de efecto de campo (FET), 872-873
Tratamiento de radiación de polímeros, 544
Tratamiento por solución, 177
Tratamiento térmico, 176-182
Tratamiento térmico del acero, 179-182
Tratamiento térmico posterior a la soldadura, 790-791
Tratamientos superficiales, 840-862
  de fibras, 552
  del acero, 181-182
Tratamientos térmicos superficiales, 844-849
Trepanado, 692, 764
Tribología, 110
Trituración, 458, 500-501
Troquelado, 400
Troquelado con almohadilla de caucho, 409
Troquelado de precisión, 406
Troquelado fino, 406
Tubo
  abultamiento, 438
  doblado, 416
  estampado con forja, 346
  estricción, 437-438
  expansión, 597-598
  formado de bridas, 437-438
  hidroformado, 438-439
Tubo, manufactura por
  doblado, 417
  estirado, 369-372
  extrusión, 353, 582
  formado de vidrio, 517-518
  punzonado rotatorio, 377
  rotación, 440
  soldadura, 796, 803
Tungsteno, 475-477, 887; *véase también* Aleaciones metálicas refractarias
TZM; *véase* Matrices de aleación de molibdeno

U

Unidades de producción con cabezal de potencia, 924
Unidades SI, 14, 48, 80, 111, 513, 583
Unión adhesiva, 817-821
Unión automática de cinta (TAB), 899
Unión con rodillos, 779
Unión de chips con volteo, 900
Unión de estado sólido-líquido, 810-817
Unión del chip, 897-898
Unión dieléctrica, 821
Unión electromagnética, 822
Unión eutéctica, 898-900
Unión mecánica, 775-777, 821
Unión pegada soldada, 826
Unión por conexiones tipo viga, 900
Unión por difusión, 905
Unión por epóxico, 898
Unión por fricción, 821
Unión por fusión, 788
Unión por haz de láser, 791, 808-809, 813
Unión por rodillos calientes, 781
Unión por termocompresión, 898-899
Unión termosónica, 899
Unión ultrasónica, 821, 899
Uniones (en circuitos integrados), 897

V

Vacante, 147, 149
Vaciado
  de cerámicas, 503
  de metales, 210-239
  de polímeros, 572-574
Vaciado con solventes, 573
Vaciado de la fusión, 209
Vaciado en celdas, 573
Vaciado evaporativo, 231-232
Valor de *n*; *véase* Exponente del endurecimiento por deformación
Valor de *r*, 269-271
  efecto en el doblado, 412
  efecto en la RLE, 426-427
  efecto en la superficie de fluencia, 423, 426
  medición del, 271
Valor *m*; *véase* Sensibilidad a la tasa de deformación
Variables, 52, 936
Variaciones de causa común, 936
Vehículos guiados automáticamente (AGV), 917
Velocidad de corte
  efecto en la formación de rebabas, 644-648
  efecto en la rugosidad superficial, 666
  efecto en la temperatura, 655-657
  efecto en la vida de la herramienta, 663-665
  en el maquinado abrasivo, 728-736
  para costo mínimo, 721
  valores usuales de la, 710-714, *713*
Velocidad de enfriamiento, 156
  en RST, 458-459
  en soldadura, 783, 786-793
Velocidad de flujo (de partículas), 460
Velocidad de flujo (en fundición), 215-216
Velocidad de remoción del metal en CM, ECM, EDM, *756*

Velocidades de flujo
en extrusión por tornillo, 577-580
en moldeo de termofraguados, 547
Vernier, 58
Vibración; *véase* Castañeo
Vida de la herramienta (corte), 660-665, 668
efecto de la velocidad en la, 664-665
Vidrio, 134, 492, 498, 510-523
como agente aglomerante, 727
como lubricante, 353, 516
maquinado de, 765
propiedades del, *515*
Vidrio flotado, 517
Vidrio fotosensible, 514
Vidrio soluble, 514
Vidrios metálicos, 459
Viruta discontinua, 648, 666
Viscosidad, 194, 517
aparente, 195, 539-542
Viscosidad aparente, 195, 540, 578-579, 596
Volumen constante; *véase* Constancia del volumen
Volumen específico, 147, 513, 537-538
Volumen libre, 194, 536
Vulcanización, 606

Y

YAG, 763
Yeso, 228, 491, 502

Z

ZAC; *véase* Zona afectada por el calor
(Zirconio) parcialmente estabilizado (PSZ), 494, 508
para matrices de extrusión, 353
Zona afectada por el calor (ZAC), 759, 767, 783-791, 847
Zona de corte, 643
Zona de enfriamiento, 190
Zona de metal muerto
en conexiones de alambre, 898
en el estirado, 372
en el forjado, 323, 336, 349
en la extrusión, 350, 352-359
Zona secundaria de corte, 643
Zonas de corte, 643-644

Lista de símbolos recurrentes

A	área de contacto; área de la sección transversal (instantánea)
A_0	área original (de inicio) de la sección transversal
A_1	área de la sección transversal después de la deformación
C	coeficiente de resistencia en trabajo en caliente
C	constante de Taylor (velocidad de corte para 1 min de vida de la herramienta)
C_E	composición de un eutéctico
C_L	composición del líquido
C_p	capacidad térmica
C_S	composición de cristales sólidos
C_0	composición de la aleación
D_p	diámetro del punzón
E	energía de corte ajustada
E	módulo de Young
E	voltaje
E_c	energía específica de corte
E_1	energía específica de corte para un espesor de la viruta sin deformar de 1 mm
F	fuerza de corte; fuerza de fricción
F_s	fuerza de corte en el plano de corte
G	módulo de corte; razón de esmerilado
I	corriente
K	coeficiente de resistencia en trabajo en frío
K_{Ic}	tenacidad de fractura en deformación plana
L	longitud de la zona de contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo
L	longitud del barril en la extrusión con tornillo
M	masa; peso atómico
M_s	temperatura a la cual comienza la transformación martensítica
N	frecuencia rotacional (rpm)
P	fuerza aplicada
P_a	fuerza en el recalcado axial de un cilindro
P_b	fuerza de doblado
P_c	fuerza de corte
P_d	fuerza de embutido profundo
P_{dr}	fuerza de trefilado (alambre)
P_e	fuerza de extrusión
P_i	fuerza de indentación
P_n	fuerza normal sobre la cara de la herramienta de corte
P_r	fuerza de laminado
P_s	fuerza cortante (máxima)
P_t	fuerza de empuje sobre la herramienta de corte
R	constante universal de los gases
R_e	razón de extrusión
Q	energía de activación
Q	factor de multiplicación de la presión
Q_a	Q para el recalcado axial de un cilindro
Q_e	Q para la extrusión
Q_i	Q para deformación inhomogénea
Q_p	Q para la deformación plana en el recalcado
R	radio de la herramienta
R	resistencia; constante universal de los gases
R_a	rugosidad superficial promedio
R_e	razón de extrusión; razón de reducción
R_q	raíz cuadrática media de la rugosidad superficial
R_t	rugosidad máxima superficial
S	solubilidad
T	temperatura
T_E	temperatura eutéctica
T_L	temperatura liquidus
T_S	temperatura solidus
T_g	temperatura de transición vítrea
T_m	punto de fusión (K)
V	volumen
V_t	tasa de remoción del material
W_e	peso por área unitaria removida por una corriente eléctrica
Z_f	factor de multiplicación para el avance
Z_v	factor de multiplicación para la velocidad de corte
a	dimensión lateral de un prisma hcp
c	altura del prisma hcp
c	profundidad de la grieta; calor específico
d	tamaño promedio del grano
d	diámetro instantáneo de la pieza de trabajo
d_0	diámetro original de la pieza de trabajo
e_c	deformación unitaria ingenieril por compresión
e_f	deformación unitaria tensil de ingeniería a la fractura
e_t	deformación unitaria ingenieril por tensión
e_u	deformación unitaria por tensión ingenieril en la estricción
f	avance (en corte)
f	fracción de fibra en un compuesto
g	aceleración gravitacional
h	altura instantánea
h_c	espesor de la viruta sin deformar
h_m	altura media o promedio
h_0	altura original o espesor