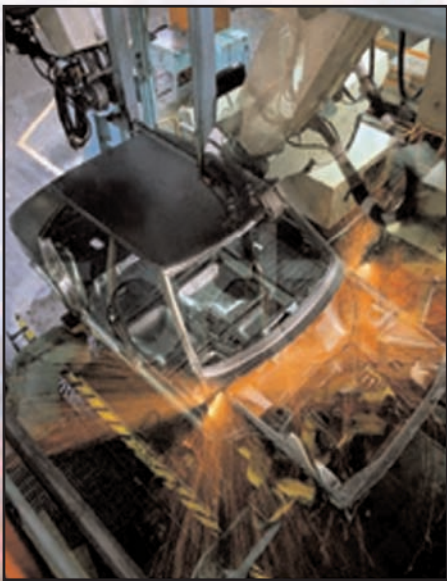


MANUFACTURA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

QUINTA EDICIÓN



S. Kalpakjian • S. R. Schmid

Datos de catalogación bibliográfica

KALPAKJIAN, SEROPE

Manufactura, ingeniería y tecnología. Quinta edición

PEARSON EDUCACIÓN, México, 2008

ISBN: 978-970-26-1026-7

Área: Ingeniería

Formato: 21 × 27 cm

Páginas: 1328

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

ISBN 0-13-148965-8

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

Esta edición en español es la única autorizada.

Edición en español

Editor: Luis Miguel Cruz Castillo
e-mail: luis.cruz@pearsoned.com

Editora de desarrollo: Claudia Celia Martínez Amigón
Supervisor de producción: José D. Hernández Garduño

Edición en inglés

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

QUINTA EDICIÓN 2008

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

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

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

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

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



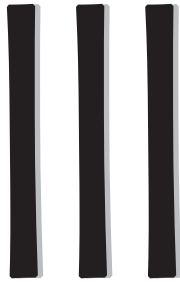
ISBN 10: 970-26-1026-5

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

Impreso en México. *Printed in Mexico.*

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

P A R T E



Procesos y equipo de formado y moldeado

Por lo general, tendemos a dar por sentados muchos de los productos que utilizamos en la actualidad y los materiales y componentes de los que están hechos. Sin embargo, cuando los inspeccionamos, pronto advertimos que se han utilizado una gran variedad de materiales y procesos en su fabricación (fig. III.1). Obsérvese también que algunos productos sólo constan de unas cuantas partes (lápices mecánicos, accesorios para iluminación), mientras que otros están constituidos por miles (automóviles, computadoras) o incluso millones de ellas (aviones, transbordadores espaciales). Hay productos que tienen formas simples con curvaturas lisas (rodamientos de bolas, manubrios de bicicletas), en tanto que otros poseen configuraciones complejas (monobloques de motores, bombas) y superficies de características detalladas (monedas, platería). Algunos artículos se utilizan en aplicaciones críticas (cables de elevadores, álabes para turbinas) y otros en aplicaciones cotidianas (sujetadores para papel, tenedores, cuchillos). Algunos objetos son muy delgados (papel aluminio, películas de plástico), mientras que otros son muy gruesos (cascos de barcos, placas de calderas).

Obsérvese que en el título de esta sección se utilizan las palabras *formado* y *moldeado*. Aunque no siempre hay claras distinciones entre ambas, por lo general el formado indica “cambiar” la forma de un cuerpo sólido existente. Por lo tanto, en los procesos

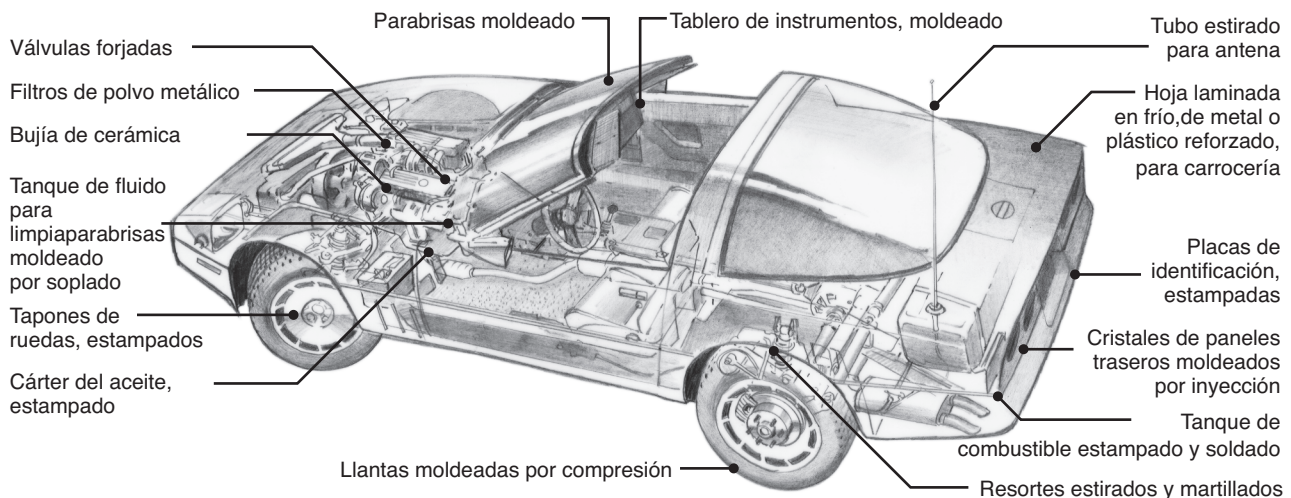


FIGURA III.1 Partes formadas y moldeadas en un automóvil común.

de formado el material inicial (conocido como pieza de trabajo, tocho o pieza bruta) puede tener la forma de una placa, lámina, barra, varilla, alambre o tubo de diferentes secciones transversales. Por ejemplo, si se desea fabricar un gancho de alambre ordinario para colgar ropa, se da forma a una pieza recta de alambre doblándolo y torciéndolo. También es común fabricar la carrocería metálica de un automóvil con lámina de acero plano rolada, a la que después se le dan diferentes formas (tapa del motor, techo, cajuela, tableros de puertas) mediante un par de matrices grandes.

Por lo general, los **procesos de moldeado** incluyen el moldeo y la fundición de materiales blandos o fundidos, y el producto terminado casi adquiere la forma deseada. Quizá requiera pocas, o ninguna, operaciones de acabado. Por ejemplo, un gancho de plástico para colgar ropa se fabrica confinando plástico fundido en un molde de dos placas con una cavidad con forma de gancho. Los receptores telefónicos, los revestimientos de las puertas para refrigeradores, los gabinetes de las computadoras y otros innumerables productos de plástico se forman de igual manera, forzando el polímero fundido en un molde y dejando que se solidifique. Como otro ejemplo, el aislante de cerámico blanco de una bujía para automóvil se fabrica moldeando arcilla en un molde, dejándola secar después y coccionándola en un horno.

Algunas operaciones de formado y moldeado sirven para elaborar *productos continuos* largos, como placas, láminas, tubería, cable y barras de diferentes secciones transversales. Los procesos de laminado, extrusión y estirado (capítulos 13 y 15) tienen la capacidad de fabricar dichos productos, que después se cortan a las longitudes deseadas. Por otro lado, en general, procesos como el forjado (capítulo 14), formado de láminas metálicas (capítulo 16), metalurgia de polvos (capítulo 17), moldeado de cerámicos y vidrios (capítulo 18) y plásticos y plásticos reforzados (capítulo 19) dan como resultado *productos discretos*.

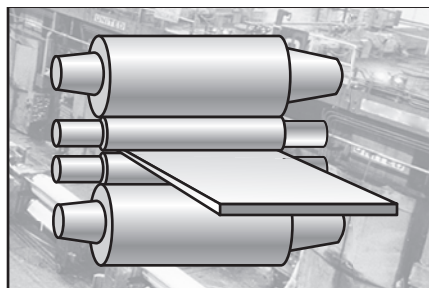
El material inicial que se utiliza en el formado y moldeado de metales suele ser el metal fundido, el cual se *funde* en *lingotes* individuales, o *de manera continua* a planchones, redondos o tubos. Las estructuras fundidas se convierten en *estructuras maleables* mediante los procesos de deformación plástica descritos en diversos capítulos. La materia prima usada también puede consistir en *polvos metálicos*, que después se prensan y sinterizan (se calientan sin fundirse) como productos individuales. En el caso de los plásticos, por lo común los materiales iniciales son las partículas (“pellets”), hojuelas o polvo, y en el caso de los cerámicos, son las arcillas y óxidos obtenidos de minerales o producidos sintéticamente.

En la parte III se describen factores importantes que participan en cada proceso de formado y moldeado, junto con la manera en que las propiedades y los procesos de los materiales afectan la calidad de los productos (tabla III.1). También se explica por qué algunos materiales pueden procesarse sólo mediante ciertos métodos de manufactura y por qué partes con formas particulares pueden trabajarse sólo mediante ciertas técnicas y no con otras. Las características de la maquinaria y el equipo utilizado en estos procesos también afectan de modo significativo la calidad de los productos, la velocidad de producción y la economía de una operación de manufactura en particular.

TABLA III.1

Características generales de los procesos de formado y moldeado	
Proceso	Características
Laminado	
Plano	Producción de placas planas, hojas y hojas delgadas a altas velocidades; buen acabado superficial, en especial el laminado en frío; inversión de capital muy elevada; costo de mano de obra baja a moderada.
De forma	Producción de varias formas estructurales (como vigas I y rieles) a altas velocidades; incluye laminado de roscas; requiere rodillos de forma y equipos costosos; costo de mano de obra bajo a moderado; habilidad moderada del operador.
Forjado	Producción de partes discretas con un juego de matrices; generalmente se requieren algunas operaciones de acabado; por lo común, se realizan a temperaturas elevadas, pero también en frío para partes más pequeñas, los costos de matrices y equipos son elevados; costo de mano de obra de moderado a elevado; habilidad moderada a alta del operador.
Extrusión	Producción de tramos largos de formas sólidas o huecas con sección transversal constante; después se corta el producto a las longitudes deseadas, por lo general se realiza a temperaturas elevadas; la extrusión en frío tiene similitudes con el forjado y se utiliza para hacer productos discretos; costo de matrices y equipo de moderado a elevado; costo de mano de obra de bajo a moderado; habilidad baja a moderada del operador.
Estirado	Producción de barra y alambre largos con diferentes secciones transversales; buen acabado superficial; costos de matrices, equipo y mano de obra de bajo a moderado; habilidad baja a moderada del operador.
Formado de hojas metálicas	Producción de una gran variedad de formas con paredes delgadas y con geometrías simples y complejas; por lo general, costos de matrices, equipo y mano de obra de bajos a moderados; habilidad baja a moderada del operador.
Metalurgia de polvos	Producción de formas simples o complejas mediante compactado y sinterizado de polvos metálicos; costo moderado de matrices y equipo; costo bajo de mano de obra y baja habilidad del operador.
Procesamiento de plásticos y materiales compósitos	Producción de una amplia variedad de productos continuos o discretos mediante los procesos de extrusión, moldeado, fundición y fabricación; costos moderados por matrices y equipo; alta habilidad del operador en el procesamiento de materiales compósitos.
Formado y moldeado de cerámicos	Producción de productos discretos mediante diferentes procesos de moldeado, secado y cocción; costo de matrices y equipo de bajo a moderado; habilidad moderada a alta del operador.

Laminación de metales



CAPÍTULO 13

En este primer capítulo de la parte III sobre el formado y moldeado de materiales metálicos y no metálicos se describe la laminación de metales, un proceso primario importante. Específicamente, se estudiarán:

- Fundamentos de los procesos de laminación plana y de formas, así como de sus capacidades.
- Parámetros comprendidos en la determinación de cantidades, como fuerzas, torque y potencia.
- Tipos de defectos que se pueden desarrollar y cómo evitarlos o minimizarlos.
- Características de los molinos de laminación y la manera en que se pueden arreglar los rodillos en varias configuraciones para propósitos específicos.

Productos comunes fabricados mediante diferentes procesos de laminación: placas para barcos, puentes, estructuras y máquinas; láminas metálicas para carrocerías de automóviles, fuselajes para aviones, aparatos eléctricos y contenedores; hojas delgadas para empaques; vigas I, rieles de vías férreas, canales, anillos, tubos y tubería sin costura; tornillos, pernos y componentes roscados.

Procesos alternativos: colada continua, extrusión, estirado o trefilado y maquinado de componentes roscados.

- 13.1 Introducción 347
- 13.2 Proceso de laminación plana 349
- 13.3 Práctica de laminación plana 354
- 13.4 Molinos de laminación 358
- 13.5 Diversos procesos y molinos de laminación 360

EJEMPLO:

- 13.1 Cálculo de la fuerza y el torque de laminado en laminación plana 351

ESTUDIO DE CASO:

- 13.1 Manufactura de segmentos de cubierta de un motor cohete de combustible sólido para un transbordador espacial 366

13.1 | Introducción

La **laminación** es el proceso que consiste en reducir el espesor o cambiar la sección transversal de una pieza de trabajo larga mediante fuerzas de compresión aplicadas con un conjunto de **rodillos** (fig. 13.1). Es similar al laminado de la masa para pan, en el que se emplea un rodillo para reducir su espesor. La laminación, que incluye a casi 90% de todos los metales producidos mediante procesos de conformado, se desarrolló por primera vez a finales del siglo XVI. Por lo general, las prácticas modernas tanto de aceración como de fabricación de diversos metales y aleaciones ferrosas y no ferrosas combinan los procesos de colada continua con los de laminación, lo que mejora en gran medida la productividad y disminuye los costos de producción, como se describe en la sección 5.4. Los materiales no metálicos también se laminan para reducir su espesor y mejorar sus propiedades. Se aplican por lo común en el laminado de plásticos, polvos metálicos, lodo de cerámico y vidrio caliente, según se describe de manera detallada en las secciones correspondientes de este libro.

Primero se efectúa la laminación a temperaturas elevadas (laminación en caliente). Durante esta fase, la estructura de grano grueso, quebradiza y porosa del lingote (o de

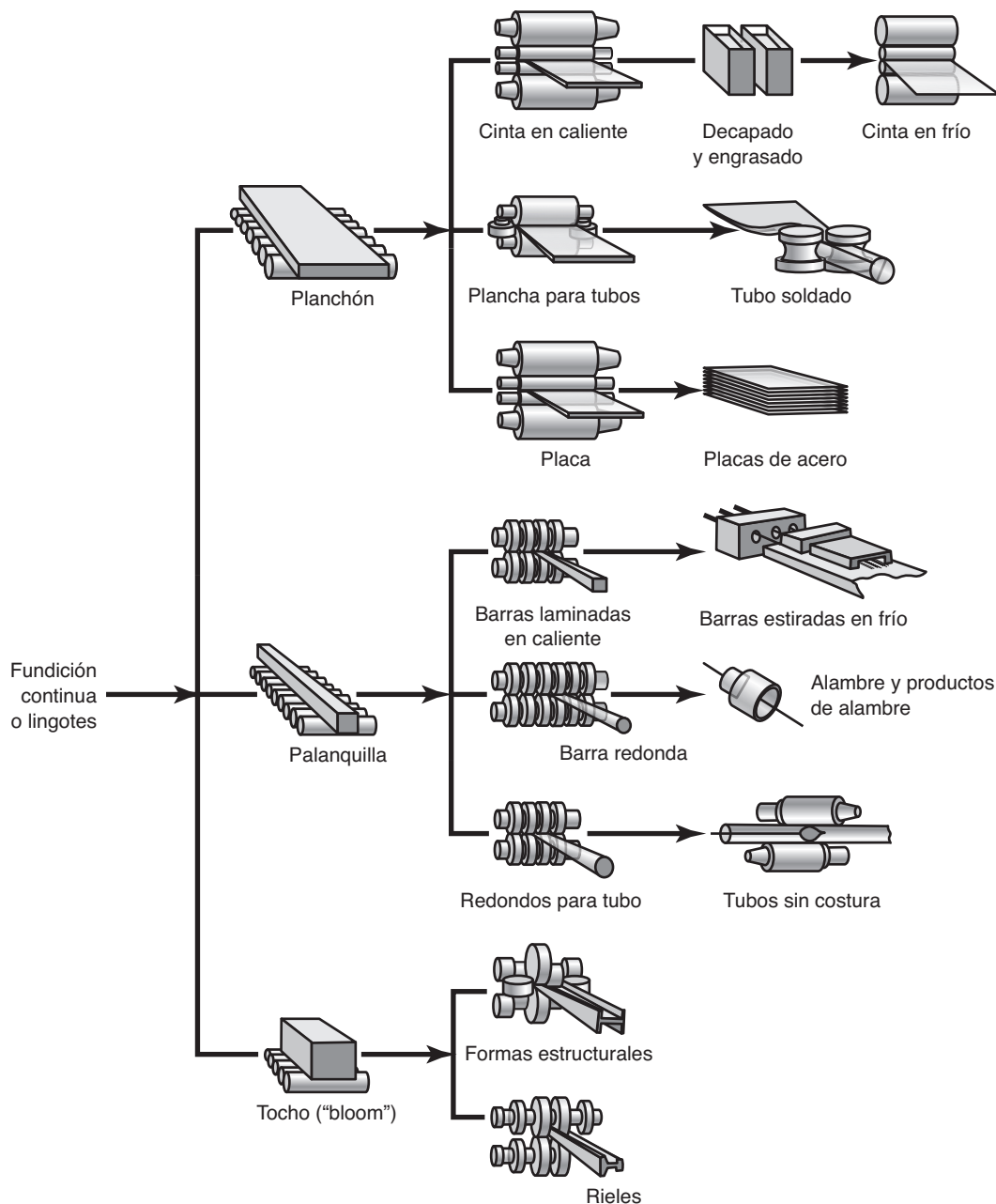


FIGURA 13.1 Esquema de diversos procesos de laminación plana y laminación de forma. *Fuente:* American Iron and Steel Institute.

colada continua), se rompe en una *estructura maleable* que tiene un tamaño de grano más fino y propiedades mejoradas, como resistencia y dureza. Posteriormente, se acostumbra realizar la laminación a temperatura ambiente (laminación en frío), en la que el producto laminado adquiere más resistencia y dureza y mejor acabado superficial. Sin embargo, requiere mayor energía (debido al incremento de la resistencia del material a temperatura ambiente) y da como resultado un producto con propiedades anisotrópicas (por la orientación preferida o fibrilado mecánico, ver la sección 1.5).

En general, las **placas** tienen un espesor de más de 6 mm (1/4 pulgada) y se utilizan en aplicaciones estructurales, como cascos de barcos, calderas, puentes, maquinaria y re-

recipientes nucleares. Las placas pueden tener espesores de hasta 300 mm (12 pulgadas) para soportes estructurales grandes, 150 mm (6 pulgadas) para recipientes de reactores y de 100 a 125 mm (4 a 5 pulgadas) para buques y tanques de guerra.

Por lo general, las **láminas** tienen un espesor de menos de 6 mm y es común que se entreguen en forma de rollos a las compañías manufactureras, con pesos de hasta 30,000 kg (33 toneladas cortas^{N. del RT.}), o como hojalata para su posterior procesamiento en diversos productos. Las láminas suelen utilizarse para carrocerías de automóviles y aviones, aparatos eléctricos, contenedores de alimentos y bebidas, así como en equipo de cocina y oficina. Los fuselajes de aviones comerciales y las carrocerías de los tractocamiones se fabrican con láminas de aleación de aluminio cuyo espesor es de al menos 1 mm (0.04 pulgada). Por ejemplo, la superficie del fuselaje de un Boeing 747 tiene un espesor de 1.8 mm (0.07 pulgada) y el de un Lockheed L1011 es de 1.9 mm (0.075 pulgada). Las láminas de acero utilizadas en carrocerías de automóviles y aparatos eléctricos tienen un espesor de cerca de 0.7 mm (0.03 pulgada). Las latas de aluminio para bebidas se fabrican con lámina de 0.28 mm (0.01 pulgada) de espesor; después de producirse como base de la lata, el cuerpo cilíndrico se forma con un espesor de pared de 0.1 mm (0.004 pulgada). El **papel aluminio** (generalmente utilizado como envoltura y para dulces y goma de mascar) tiene un espesor de 0.008 mm (0.0003 pulgada), aunque también se pueden producir hojas más delgadas, hasta de 0.003 mm (0.0001 pulgada) para diversos metales.

En este capítulo se describen los fundamentos de las operaciones de **laminación plana** y diversas operaciones de **laminación de formas**, la producción de tubería y tubos sin costura, y se tratan factores importantes implícitos en las prácticas de la laminación.

N. del RT. Considérese que una tonelada métrica (TM) equivale a 1.10231 toneladas cortas (TC) y 1 TC equivale a 2000 lb.

13.2 Proceso de laminación plana

En la figura 13.2a se muestra un esquema del proceso de *laminación plana*. Una cinta metálica de espesor h_o entra en el **espacio de laminación** y un par de rodillos giratorios la reduce a un espesor h_f , cada uno impulsado de manera individual por motores eléctricos. La velocidad de la superficie de los rodillos es V_r . La velocidad de la cinta aumenta desde su valor de entrada V_o conforme se mueve a través del espacio de laminación, de la misma manera en que un fluido incompresible debe fluir más rápidamente cuando pasa a través de un canal convergente. La velocidad de la cinta es mayor a la salida del espacio de laminación y se denota como V_f .

Puesto que la velocidad de la superficie del rodillo rígido es constante, existe un **deslizamiento relativo** entre el rodillo y la cinta a lo largo del arco de contacto en el espacio de laminación, L . En un punto a lo largo de la longitud de contacto (conocido co-

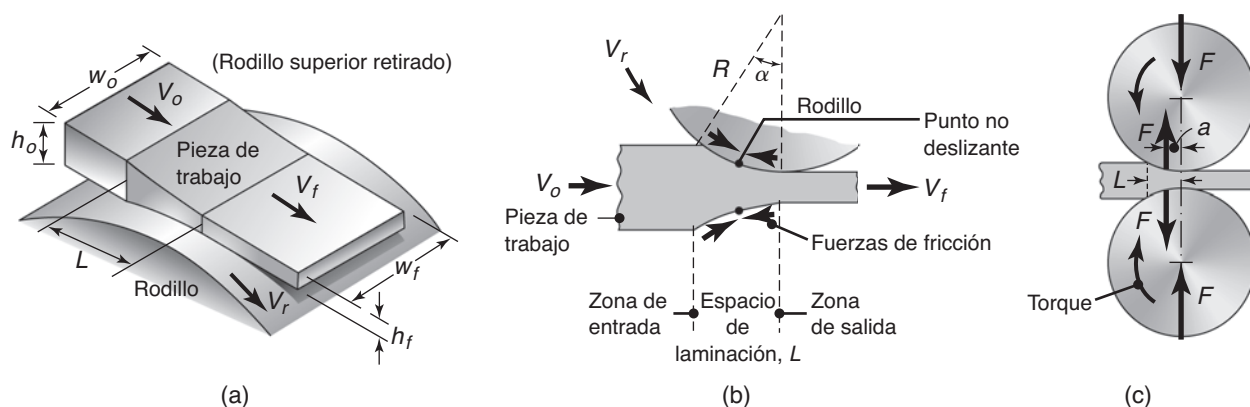


FIGURA 13.2 (a) Esquema del proceso de laminación plana. (b) Fuerzas de fricción que actúan sobre las superficies de la cinta. (c) La fuerza de laminado (F) y el torque (T) que actúan sobre los rodillos. Por lo general, el ancho de la cinta (w) aumenta durante la laminación, como se muestra en la figura 13.5.

mo **punto neutral** o **punto no deslizante**), la velocidad de la cinta es la misma que la del rodillo. A la izquierda de este punto, el rodillo se mueve más rápido que la cinta; a la derecha, la cinta se mueve más rápido que el rodillo. Por consiguiente, las fuerzas de fricción, que se oponen al movimiento entre los dos cuerpos deslizantes, actúan sobre la cinta como se muestra en la figura 13.2b.

Los rodillos jalan el material hacia el espacio de laminación por medio de una *fuerza de fricción neta*, por lo que ésta debe estar a la derecha en la figura 13.2b. Esto también significa que la fuerza de fricción que se ubica a la izquierda del punto neutral debe ser superior a la de la derecha. Aunque la fricción es necesaria para laminar los materiales (como sucede al conducir un automóvil en una carretera), la energía se disipa al vencer la fricción. Por lo tanto, cuando aumenta la fricción también aumentan las fuerzas de laminado y la demanda de energía. Más aún, una fricción elevada puede dañar la superficie del producto laminado (o provocar su adhesión, como ocurre al laminar masa para pan). Por ello, en la práctica se adopta una solución media (que induce coeficientes de fricción bajos mediante lubricantes eficaces).

La **reducción** máxima posible se define como la diferencia entre los espesores inicial y final de la cinta ($h_o - h_f$). Se puede demostrar que es una función del coeficiente de fricción (μ) entre la cinta y el rodillo y el radio del rodillo (R) mediante la siguiente relación:

$$h_o - h_f = \mu^2 R \quad (13.1)$$

Como se esperaba, cuanto más alta sea la fricción y más grande el radio del rodillo, mayor será la reducción máxima posible. Obsérvese que esta situación es similar al uso de neumáticos grandes (R elevado) y marcas profundas (μ elevado) en los tractores agrícolas y en el equipo todo terreno para su movimiento en tierra, lo que permite que los vehículos avancen sobre caminos accidentados sin patinarse.

13.2.1 Fuerza, torque y requerimientos de potencia del laminado

Los rodillos aplican presión sobre la cinta plana para reducir su espesor, lo que produce una *fuerza de laminado* (F) como se muestra en la figura 13.2c. Obsérvese que esta fuerza es perpendicular al plano de la cinta y no a un ángulo. Esto se debe a que el arco de contacto es muy pequeño en comparación con el radio del rodillo, por lo que puede asumirse que la fuerza de laminado es perpendicular al lugar de trabajo sin provocar un error significativo en los cálculos. La fuerza de laminado en la laminación plana se puede obtener a partir de la fórmula

$$F = LwY_{\text{prom}} \quad (13.2)$$

en donde L es la longitud de contacto entre el rodillo y la cinta, w la anchura de la cinta y Y_{prom} el esfuerzo real promedio (ver sección 2.2) de la cinta en el espacio de laminación. La ecuación 13.2 es para una situación *sin fricción*; sin embargo, puede obtenerse un estimado de la *fuerza real de laminado* si se aumenta esta fuerza alrededor de 20% para considerar el efecto de la fricción.

El *torque* en la laminación es el producto de F y a . La potencia requerida por rodillo se puede estimar suponiendo que F actúa a la mitad del arco de contacto, por lo que en la figura 13.2c, $a = L/2$. Por lo tanto, la *potencia total* (para los dos rodillos) en unidades del S.I. es

$$\text{Potencia} = \frac{2\pi FLN}{60,000 \text{ kW}} \quad (13.3)$$

en donde F está en newtons, L está en metros y N son las revoluciones por minuto del rodillo. En unidades inglesas tradicionales, la potencia total se puede expresar como

$$\text{Potencia} = \frac{2\pi FLN}{33,000 \text{ hp}} \quad (13.4)$$

en donde F está en libras y L está en pies.

EJEMPLO 13.1 Cálculo de la fuerza y el torque de laminado en laminación plana

Una cinta de cobre recocido con una anchura de 9 pulgadas (228 mm) y un espesor de 1.00 pulgada (25 mm), se lamina hasta un espesor de 0.80 pulgada (20 mm) en un pase. El radio del rodillo es de 12 pulgadas (30 mm) y los rodillos giran a 100 rpm. Calcúlese la fuerza de laminado y la potencia requerida en esta operación.

Solución La fuerza de laminado se determina a partir de la ecuación 13.2, en la que L es la longitud de contacto entre el rodillo y la cinta. Se puede demostrar mediante la geometría simple que esta longitud se obtiene aproximadamente por

$$L = \sqrt{R(h_o - h_f)} = \sqrt{12(1.00 - 0.80)} = 1.55 \text{ pulgadas}$$

El esfuerzo real promedio (Y_{prom}) para cobre recocido se determina de la siguiente manera. Primero, considérese que el valor absoluto de la deformación real que sufre la cinta en esta operación es

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{1.00}{0.80}\right) = 0.223$$

En relación con la figura 2.6, nótese que el cobre recocido sin deformación tiene un esfuerzo real de alrededor de 12,000 psi, y a una deformación real de 0.223, dicho esfuerzo es de 40,000 psi, por lo que el esfuerzo real promedio es de $(12,000 + 40,000)/2 = 26,000$ psi. Ahora ya podemos definir la fuerza de laminado como

$$F = LwY_{\text{prom}} = (1.55)(9)(26,000) = 363,000 \text{ lb} = 1.6 \text{ MN}$$

La potencia total se calcula a partir de la ecuación 13.4, considerando que $N = 100$ rpm. Por lo tanto,

$$\begin{aligned} \text{Potencia} &= \frac{2\pi FLN}{33,000} = \frac{2\pi(363,000)(1.55/12)(100)}{33,000} \\ &= 898 \text{ hp} = 670 \text{ kW} \end{aligned}$$

Es difícil calcular con exactitud los requisitos de fuerza y potencia en la laminación debido a las incertidumbres comprendidas en (a) la determinación de la geometría exacta de contacto entre el rodillo y la cinta y (b) la estimación precisa tanto del coeficiente de fricción como de la resistencia del material en el espacio de laminación, en particular para la laminación en caliente, por la sensibilidad de la resistencia del material a la velocidad de deformación (ver sección 2.2.7).

Reducción de la fuerza de laminado. Las fuerzas de laminado pueden provocar deflexión significativa y aplanamiento de los rodillos (como sucede en los neumáticos de hule). A su vez, dichos cambios afectan la operación de laminado. Además, las columnas del **castillo de laminación** (incluyendo el bastidor, el calzo y los rodamientos, como se muestra en la fig. 13.3) se pueden flexionar debido a las altas fuerzas de laminado, de modo que el espacio de laminación puede ampliarse de manera significativa. Por lo tanto, los rodillos se tienen que instalar más cerca de lo calculado originalmente para compensar esta deflexión y obtener el espesor final deseado.

Las fuerzas de laminado se pueden reducir de la siguiente manera:

- Reduciendo la fricción en la interfaz del rodillo y la pieza de trabajo.
- Utilizando rodillos de diámetro más pequeño para reducir el área de contacto.
- Aplicando reducciones menores por pase para reducir el área de contacto.
- Laminando a temperaturas elevadas para reducir la resistencia del material.
- Aplicando tensiones a la cinta.

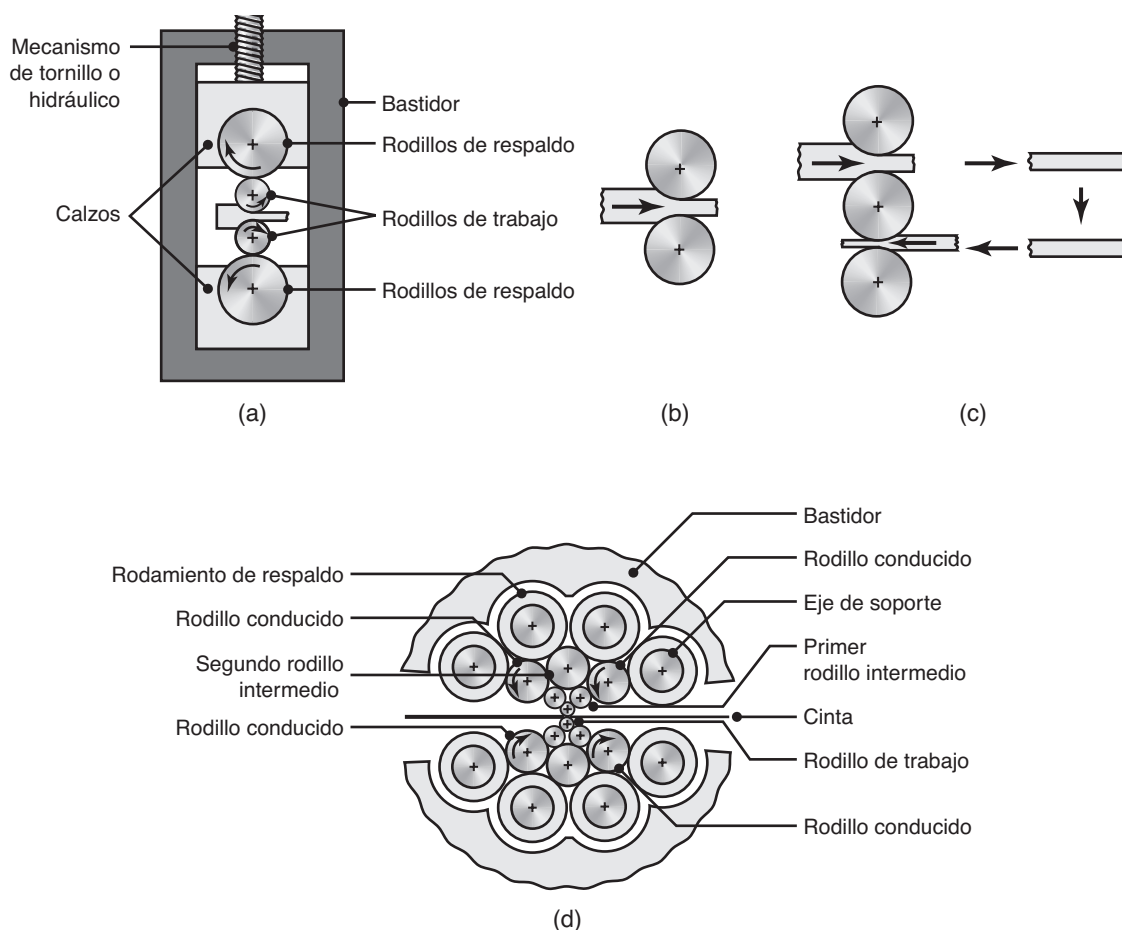


FIGURA 13.3 Esquema de diversos arreglos de rodillos: (a) molino de laminación de cuatro rodillos que muestra diversas características. La rigidez del bastidor, los rodillos y los rodamientos son importantes para controlar y mantener el espesor de la cinta laminada; (b) molino de dos rodillos; (c) molino de tres rodillos, y (d) molino de laminación de conjunto (o Sendzimir).

Otro método efectivo para reducir las fuerzas de laminado consiste en aplicar **tensión** longitudinal a la cinta durante el laminado (cuya consecuencia es que los esfuerzos de compresión requeridos para deformar plásticamente el material sean más pequeños). Las tensiones son importantes porque se requieren grandes fuerzas de laminado para laminar metales de alta resistencia. Se pueden aplicar a la cinta en la zona de entrada (**tensión trasera**), en la zona de salida (**tensión delantera**), o en ambas. La tensión trasera se aplica a la lámina mediante el frenado del carrete que la alimenta dentro del espacio de laminación (*carrete de alimentación*) por algún medio adecuado. Se aplica tensión delantera si se aumenta la velocidad de rotación del *carrete de salida*. A pesar de que tiene aplicaciones limitadas y especializadas, la laminación también se puede efectuar aplicando únicamente tensión delantera, sin suministro de potencia a los rodillos; este proceso se conoce como **laminado Steckel**.

13.2.2 Consideraciones geométricas

Los rodillos sufren cambios de forma durante la laminación debido a las fuerzas que actúan sobre ellos. Como sucede con una viga recta que se flexiona con carga transversal, las fuerzas de laminado tienden a doblar los rodillos *elásticamente* durante la laminación (fig. 13.4a). Como era de esperarse, cuanto mayor sea el módulo elástico del material del rodillo, menor será su deflexión.

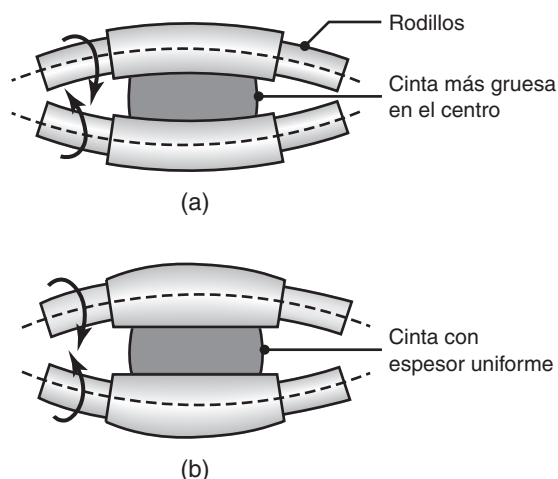


FIGURA 13.4 (a) Doblado de los rodillos cilíndricos rectos a causa de las fuerzas de laminado. (b) Doblado de los rodillos rectificados con la comba, que producen una cinta con espesor uniforme a todo el ancho de la cinta. Para efectos de claridad se exageraron las deflexiones.

Debido al doblado de los rodillos, la cinta laminada tiende a ser más gruesa en el centro que en los extremos (**corona**). El método usual para evitar este problema consiste en rectificar los rodillos de manera que el diámetro en su centro sea un poco más grande que en sus extremos (**comba**). Entonces, cuando el rodillo se dobla, la cinta que se está laminando tiene un espesor constante a lo largo de su anchura (fig. 13.4b). En el caso de las láminas metálicas, el radio del punto máximo de la comba es por lo general 0.25 mm (0.01 pulgada) mayor que en los extremos del rodillo. Sin embargo, como era de esperarse, una comba en particular es correcta sólo para cierta carga y anchura de cinta. Si se quiere reducir los efectos de la deflexión, los rodillos también pueden someterse a doblado externo aplicando momentos en sus rodamientos (técnica que se demuestra de manera simple si se dobla una vara de madera en sus extremos, manipulación que simula la comba).

Los rodillos pueden adquirir una ligera forma de barril (**comba térmica**) debido al calor que genera la deformación plástica durante la laminación. A menos que se compense por algún medio, esta condición puede producir cintas más delgadas en el centro que en los extremos. Por consiguiente, la comba total (o final) puede controlarse ajustando la ubicación y la velocidad de flujo del líquido refrigerante a lo largo de los rodillos durante la laminación en caliente.

Las fuerzas de laminado también tienden a *aplanar* elásticamente los rodillos, produciendo un efecto muy similar al aplanamiento que sufren los neumáticos de los automóviles bajo alguna carga. El aplanamiento de los rodillos es poco deseable, ya que produce, en efecto, un mayor radio de laminado. A su vez, esto significa un área de contacto más grande para la misma distancia entre rodillos, y la fuerza de laminado aumenta debido a la entonces mayor área de contacto.

Ensanchado. En la laminación de placas y láminas con altas relaciones de anchura a espesor, la anchura de la cinta permanece efectivamente constante durante la laminación. Sin embargo, con relaciones más pequeñas (como una cinta con una sección transversal cuadrada), la anchura aumenta de manera significativa conforme pasa a través de los rodillos (efecto que se observa comúnmente al laminar masa para pan con un rodillo). A este incremento en la anchura se le conoce como *ensanchado* (fig. 13.5). Al calcular la fuerza de laminación, la anchura w en la ecuación 13.2 se toma como una anchura promedio.

Se puede demostrar que el ensanchado aumenta con (a) la disminución de la relación anchura a espesor de la cinta de entrada (debido a la reducción en la restricción de

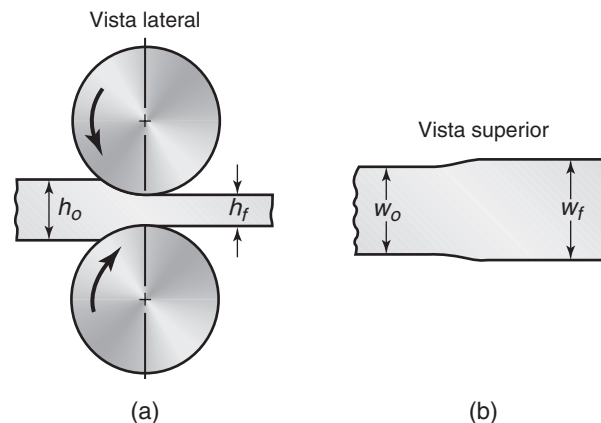


FIGURA 13.5 Aumento de la anchura de la cinta (ensanchado) en el laminado plano. Note que se puede observar un ensanchado similar a cuando la masa para pan se lamina con un rodillo.

la anchura), (b) el aumento de la fricción, y (c) la disminución de la relación del radio del rodillo al espesor de la cinta. Los últimos dos efectos se deben al aumento de restricción longitudinal del flujo de material en el espacio de laminación. También puede evitarse el ensanchado mediante rodillos adicionales (con ejes verticales) en contacto con los extremos del producto laminado en el espacio de laminación (*molinos de rebordeado*), aportando así una restricción física al ensanchado.

13.2.3 Vibración y traqueteo

La *vibración* y el *traqueteo* pueden tener efectos significativos en la calidad de los productos y la productividad de las operaciones de trabajo de los metales. El traqueteo, que por lo general se define como *vibración autoexcitada*, puede presentarse en la laminación y en las operaciones de extrusión, estirado, maquinado y rectificado. En la laminación causa variaciones periódicas en el espesor de la hoja laminada y en su acabado superficial y, por lo tanto, puede provocar desperdicios excesivos (ver tabla 40.6). En la laminación, se ha encontrado que el traqueteo ocurre predominantemente en los *molinos compuestos*; es muy perjudicial para la productividad, y se ha estimado que si no fuera por él los molinos modernos de laminación podrían operar a velocidades hasta 50% más elevadas.

El traqueteo es un fenómeno muy complejo (ver también sección 25.4) y se produce debido a interacciones de la dinámica estructural del soporte del molino y la dinámica de la operación del rodillo. La velocidad de laminación y la lubricación son sus dos parámetros más importantes. Aunque la implantación respectiva no siempre es práctica, también se ha sugerido que el traqueteo puede reducirse si aumenta la distancia entre los soportes del molino de laminación (ver fig. 13.11), se incrementa la anchura de la cinta, disminuye la reducción por pase (espacio de laminación), aumentan tanto el radio del rodillo como la fricción entre la cinta y el rodillo, y se incorporan amortiguadores en los soportes de los rodillos.

13.3 | Práctica de laminación plana

Por lo general, la **laminación en caliente** realiza los pasos iniciales de laminado (*rompimiento de estructura de colada*) del material por encima de la temperatura de recristalización del metal (sección 1.6). Como se describe en la sección 10.2 y se ilustra en la figura 10.2, una **estructura fundida** suele ser dendrítica e incluye granos gruesos y no uniformes; por lo común, esta estructura es quebradiza y puede ser porosa. La lamina-

ción en caliente convierte la estructura fundida en una **estructura maleable** (fig. 13.6) con granos más finos y ductilidad mejorada, que son producto de la ruptura de límites frágiles de granos y el cierre de los defectos internos (en especial la porosidad). Los intervalos característicos de temperatura para la laminación en caliente son de casi 450 °C (850 °F) para aleaciones de aluminio, hasta 1250 °C (2300 °F) para aceros aleados y hasta 1650 °C (3000 °F) para aleaciones refractarias (ver también tabla 14.3).

Al producto de la primera operación de laminación en caliente se le conoce como **tocho** (*bloom*) o **planchón** (*slab*) (ver fig. 13.1). Por lo común, un tocho tiene una sección transversal cuadrada de al menos 150 mm (6 pulgadas) de lado; el planchón generalmente es de sección transversal rectangular. Los tochos se procesan luego mediante el *laminado de forma*, en donde adquieren perfiles estructurales, como vigas I y rieles para vías férreas (sección 13.5). Los planchones se laminan como placas y láminas. Por lo regular, las **palanquillas** son cuadradas (con un área de sección transversal más pequeña que la de los planchones) y después se laminan adquiriendo diversas formas, como barras redondas y de diferentes secciones, mediante rodillos con perfiles. Las barras redondas laminadas en caliente (**alambón**) se utilizan como materia prima para operaciones de estirado de varillas y alambres (capítulo 15).

Por lo general, en la laminación en caliente de tochos, palanquillas y planchones, la superficie del material se **acondiciona** (se prepara para una operación posterior) antes de laminarlo mediante el uso de un soplete, a fin de eliminar la cascarilla (*descascarado*) o el esmerilado grueso para alisar las superficies. Antes de la laminación en frío, se puede eliminar la cascarilla desarrollada durante la laminación en caliente por inmersión en *baños* con ácidos (ataque con ácidos), por medios mecánicos como el chorro de agua o también por esmerilado para eliminar otros defectos.

La **laminación en frío** se realiza a temperatura ambiente y, en comparación con la laminación en caliente, produce láminas y cintas con mucho mejor acabado superficial (por la ausencia de cascarilla), tolerancias dimensionales y propiedades mecánicas (debido al endurecimiento por deformación).

El **laminado en conjunto** es una operación de laminado plano en la que se laminan dos o más capas de metal al mismo tiempo, mejorando así la productividad. Por ejemplo, el *papel aluminio* se lamina en conjunto en dos capas, de manera que sólo las capas exteriores superior e inferior tocan los rodillos. Obsérvese que un lado de la hoja de aluminio es mate, mientras que el otro es brillante. El lado que se encuentra entre las hojas tiene un acabado mate y satinado, pero el lado entre la hoja y el rodillo es brillante y lustroso, porque ha estado bajo esfuerzos elevados de contacto con los rodillos pulidos durante el laminado.

El acero dulce laminado se estira durante las operaciones de formado de lámina y sufre una *elongación al punto de fluencia* (sección 16.3), fenómeno que provoca irregularidades en la superficie conocidas como *deformaciones de estiramiento* o *bandas de*

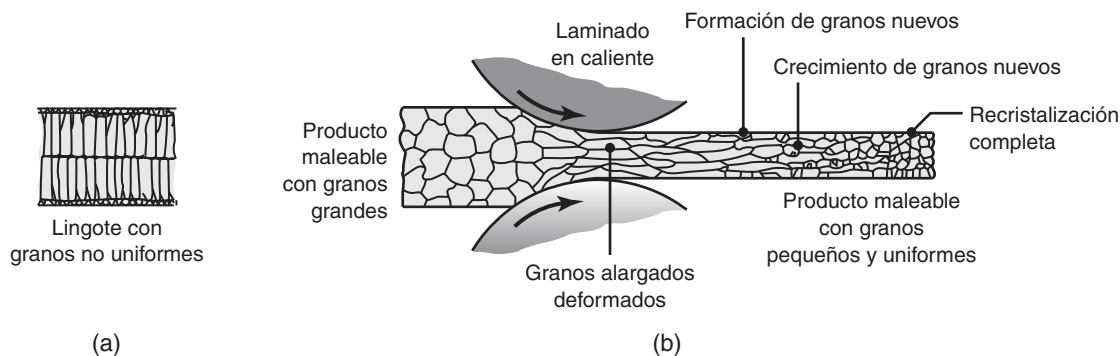


FIGURA 13.6 Cambios en la estructura de los granos de metales fundidos o maleables de granos grandes durante el laminado en caliente. Este proceso es una manera efectiva de reducir el tamaño de los granos en los metales para mejorar la resistencia y la ductilidad. Las estructuras fundidas de los lingotes o las fundiciones continuas se transforman en una estructura maleable por medio del trabajo en caliente.

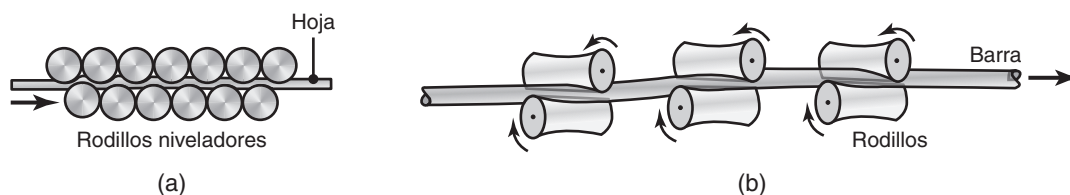


FIGURA 13.7 (a) Método de nivelación de rodillos para aplanar hojas laminadas. (b) Nivelación de rodillos para enderezar barras estiradas.

Lüders. Para corregir esta situación, la lámina metálica se somete a un leve pase final de 0.5 a 1.5% de reducción, conocida como **laminación de relevado** o **paso de superficie**.

Quizá una hoja laminada no esté lo suficientemente plana al abandonar el espacio de laminación, debido a variaciones en el material de entrada o en los parámetros de procesamiento durante el laminado. Para mejorar la planicidad, por lo general la cinta laminada pasa por una serie de **rodillos niveladores**. Se utilizan varios arreglos de rodillos, como se muestra en la figura 13.7. La pieza de trabajo se flexiona en direcciones opuestas conforme pasa a través de una serie de rodillos, cada uno de los cuales suele accionarse por separado mediante un motor eléctrico individual.

13.3.1 Defectos en placas y hojas laminadas

Es posible que haya defectos en las superficies de las placas y hojas laminadas o defectos estructurales internos. Los defectos son indeseables no sólo porque degradan la apariencia de la superficie, sino también porque pueden dañar la resistencia, formabilidad y otras características de fabricación. Se han identificado diversos defectos de superficie (como cascarilla, oxidación, raspaduras, estrías, picaduras y grietas) en las láminas metálicas. Pueden tener como origen las inclusiones e impurezas en el material fundido original, o muchas otras condiciones relacionadas con la preparación del material y la operación de laminado.

Los **bordes ondulados** en las láminas (fig. 13.8a) son el resultado de la flexión del rodillo. La cinta es más delgada a lo largo de su borde que en su centro (ver fig. 13.4a), por lo que los bordes se estiran más que el centro. En consecuencia, los bordes se ensanchan debido a que la región central les restringe su libre expansión en la dirección longitudinal (de laminado). Por lo general, las **grietas** mostradas en las figuras 13.8b y c obedecen a la deficiente ductilidad de un material a la temperatura de laminación. Puesto que la calidad de los bordes de la hoja puede afectar las operaciones de formado de las láminas metálicas, con frecuencia se eliminan los defectos de los extremos en las hojas laminadas mediante operaciones de cizallado y recortado (sección 16.2). El **acocodrilado**

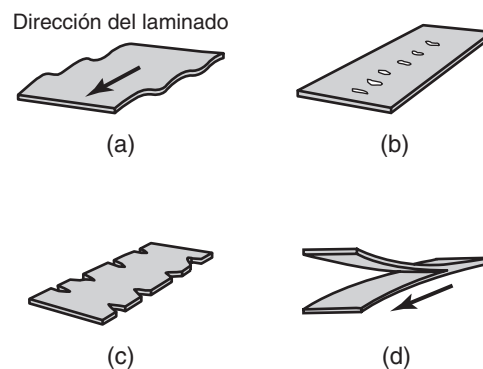


FIGURA 13.8 Esquema de defectos típicos en laminación plana: (a) bordes ondulados; (b) grietas en forma de cremallera en el centro de la cinta; (c) grietas de los bordes y (d) acocodrilado.

(fig. 13.8d) es un fenómeno complejo y por lo general se debe a la deformación volumétrica no uniforme de la palanquilla durante el laminado, o a la presencia de defectos en el material original fundido.

13.3.2 Otras características de los metales laminados

Esfuerzos residuales. La deformación no uniforme del material en el espacio de laminación puede ocasionar que se desarrollen esfuerzos residuales en placas y hojas laminadas, en especial durante el laminado en frío. Los rodillos de diámetro pequeño o las reducciones por pase de pequeño espesor tienden a deformar plásticamente el metal más en la superficie que en el centro (fig. 13.9a). Esta situación provoca esfuerzos residuales de compresión en las superficies y esfuerzos de tensión en el centro. Por el contrario, los rodillos de diámetro grande, o las altas reducciones por pase, tienden a deformar el centro más que la superficie (fig. 13.9b). Esto se debe a una restricción más elevada de la fricción en las superficies a lo largo del arco de contacto, lo que produce distribuciones de esfuerzos residuales que se oponen a las de los rodillos de diámetro pequeño.

Tolerancias dimensionales. Por lo general, las tolerancias de espesor para las hojas laminadas en frío van de ± 0.1 a 0.35 mm (± 0.004 a 0.014 pulgada), lo que depende del espesor. Las tolerancias son mucho más grandes para las placas laminadas en caliente debido a los efectos térmicos. Es común que las *tolerancias de planicidad* se encuentren dentro de ± 15 mm/m ($\pm 3/16$ pulgada/pie) para laminado en frío y ± 55 mm/m ($5/8$ pulgada/pie) para laminado en caliente.

Rugosidad de la superficie. En la figura 23.13 se dan los intervalos de rugosidad superficial para laminados en frío y en caliente; con fines de comparación, se incluyen intervalos para otros procesos de manufactura. Obsérvese que el laminado en frío puede producir un acabado superficial muy fino, por lo que es posible que los productos fabricados con hojas laminadas en frío no requieran operaciones adicionales de acabado, dependiendo de la aplicación. Nótese también que el laminado en caliente y la fundición en arena producen los mismos niveles de rugosidad superficial.

Números de calibre. Por lo general, el espesor de una hoja se identifica por medio de un *número de calibre*: cuanto más pequeño es el número, más gruesa es la hoja. En la in-

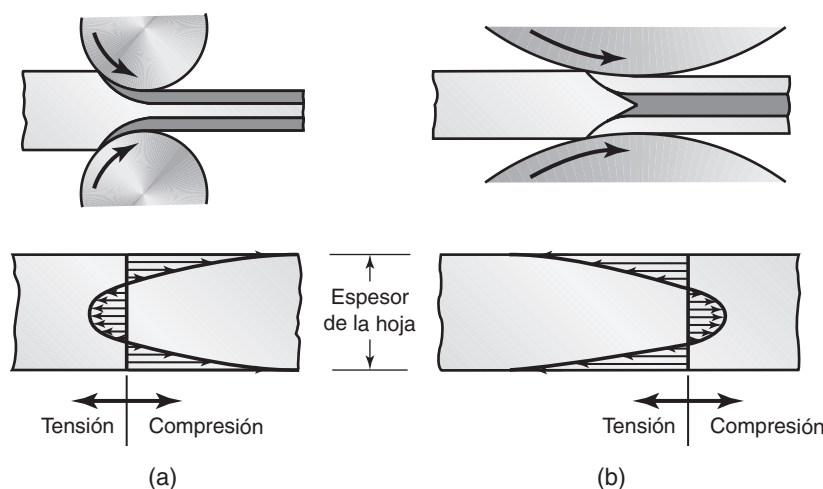


FIGURA 13.9 (a) Esfuerzos residuales desarrollados en el laminado con rodillos de diámetro pequeño, o en reducciones pequeñas de espesor por pase. (b) Esfuerzos residuales desarrollados en el laminado con rodillos de diámetro grande, o a altas reducciones por pase. Observe la inversión de los patrones de los esfuerzos residuales.

dustria se utilizan diversos sistemas de numeración, lo que depende del tipo de hoja metálica que se esté clasificando. Las hojas laminadas de cobre y de latón también se identifican por los cambios de espesor durante el laminado, por ejemplo, 1/4 de dureza, 1/2 dureza y así sucesivamente.

13.4 Molinos de laminación

Existen varios tipos de *molinos de laminación* y equipo con distintos arreglos de rodillos. A pesar de que el equipo para laminado en caliente es básicamente el mismo que para laminado en frío, existen importantes diferencias en materiales de los rodillos, parámetros de los procesos, lubricantes y sistemas de enfriamiento. El diseño, la construcción y la operación de los molinos de laminación (fig. 13.10) requieren grandes inversiones. Los molinos altamente automatizados producen placas y láminas de excelente calidad, con tolerancias cerradas, a altas velocidades de producción y con un bajo costo por unidad de masa, en particular cuando se integran con fundición continua. Las velocidades de laminado pueden llegar hasta 40 m/s (130 pies/s). El ancho de los productos laminados puede ser hasta de 5 m (200 pulgadas).

Se utilizan **molinos de laminación dúo** (fig. 13.3b) para laminación en caliente en los pases iniciales de ruptura (*desbaste primario* o **molinos de desbaste**) en lingotes fundidos o en fundición continua, con diámetros de rodillos que van de 0.6 a 1.4 m (24 a 55 pulgadas). En el **molino de tres rodillos** (*molino inverso*, fig. 13.3c), la dirección del movimiento del material se invierte después de cada pase mediante mecanismos elevadores y diversos manipuladores. La placa que se está laminando, que puede pesar hasta 160 toneladas, se eleva repetidamente al espacio de laminación superior y se lamina; después se baja al espacio de laminación inferior y se lamina, y así sucesivamente.

Los **molinos de cuatro rodillos** (fig. 13.3a) y los **molinos de conjunto o racimo** (*Senzimir* o **molino Z**, fig. 13.3d) se basan en el principio de que los rodillos de diámetro pequeño reducen las fuerzas de laminado (debido a la menor área de contacto entre



FIGURA 13.10 Vista general de un molino de laminado. *Fuente:* Cortesía de Ispat Inland.

la cinta y el rodillo) y los requisitos de potencia y reducen el ensanchado de la lámina. Además, cuando se desgastan o rompen, los rodillos pequeños se pueden reemplazar con un costo inferior al de los grandes. Por otro lado, los rodillos pequeños se doblan más que los grandes debido a las fuerzas de laminado y tienen que apoyarse en rodillos de diámetro mayor, como se hace en los molinos de cuatro rodillos y en los de conjunto. Aunque el costo de una instalación de molino Sendzimir puede ser muy alto, es particularmente apropiado para el laminado en frío de hojas delgadas de metales de alta resistencia. Las anchuras comunes laminadas en este molino son de 0.66 m (26 pulgadas), con un máximo de 1.5 m (60 pulgadas).

En el **laminado compuesto**, o en **tándem**, la cinta se lamina de manera continua a través de varios **castillos**, obteniendo calibres más delgados con cada pase (fig. 13.11). Cada castillo consta de un juego de rodillos con su propio bastidor y controles; a un grupo de castillos se le conoce como *tren*. El control del espesor de la cinta y la velocidad a la que viaja a través de cada espacio de laminación son críticos. Se utilizan gran cantidad de controles electrónicos y de computadora en estas operaciones, en especial en el laminado de precisión.

Materiales de los rodillos. Los requisitos básicos de los materiales para los rodillos son la resistencia y la resistencia al desgaste. Los materiales más comunes son el hierro fundido, acero fundido y acero forjado, aunque también se utilizan carburos de tungsteno para rodillos de diámetro pequeño, como el rodillo de trabajo en un molino de conjunto (fig. 13.3d). Los rodillos de acero forjado son más costosos que los rodillos fundidos, pero tienen mayor resistencia, rigidez y tenacidad que los rodillos de hierro fundido. Los rodillos para laminado en frío se rectifican para un acabado fino. También se pulen para aplicaciones especiales. Los rodillos fabricados para laminado en frío no deben utilizarse para laminado en caliente, ya que se pueden agrietar por los ciclos térmicos (*agrietamiento por calor*) y *astillado* (agrietamiento o escamado de las capas de la superficie). También debe recordarse que el módulo elástico del rodillo influye en la deflexión y el aplanado de los rodillos.

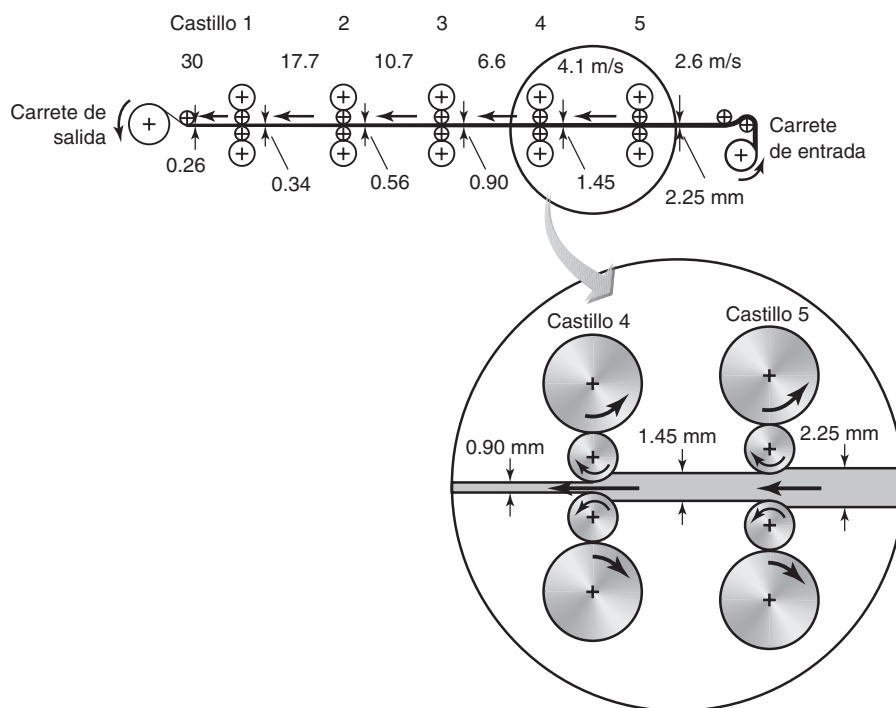


FIGURA 13.11 Ejemplo de operación de laminado compuesto o en tándem.

Por ejemplo, obsérvese que la superficie inferior de una lata de refresco hecha de aluminio tiene lo que parecen ser rayaduras longitudinales en la misma. Esto se debe a que la superficie es una réplica del acabado superficial del rodillo, que se produce mediante rectificado (ver fig. 26.2a). De esta manera, también se puede determinar con facilidad la dirección del laminado de la hoja original de aluminio.

Lubricantes. Por lo general, la laminación en caliente de aleaciones ferrosas se realiza sin lubricantes, aunque se puede utilizar grafito. Se usan soluciones a base de agua para enfriar los rodillos y romper la cascarilla en el material laminado. Las aleaciones no ferrosas se laminan en caliente con varios aceites compuestos, emulsiones y ácidos grasos. El laminado en frío se efectúa con aceites solubles en agua o lubricantes de baja viscosidad, como los aceites minerales, las emulsiones, queroseno y aceites grasos. El medio de calentamiento también puede actuar como lubricante, por ejemplo, el que se empleó al dar tratamiento térmico a palanquillas y planchones. Las sales residuales de los baños de sales fundidas (sección 4.12) ofrecen asimismo lubricación eficaz durante el laminado.

13.5 | Diversos procesos y molinos de laminación

Se han desarrollado varios procesos y molinos de laminación para producir una familia específica de formas de productos.

Laminado de formas. Las formas estructurales rectas y largas (como canales, vigas I, rieles de vías férreas y barras sólidas) se forman a temperaturas elevadas mediante *laminado de formas* (*laminado de perfiles*), en el que los materiales pasan a través de una serie de rodillos diseñados especialmente (figs. 13.12 y 13.1). El *laminado de formas en frío* también puede realizarse con materiales iniciales en forma de alambre de diferentes secciones transversales. Puesto que la sección transversal del material se reduce sin uniformidad, el diseño de una serie de rodillos (**diseño de pases en rodillos**) requiere considerable experiencia para evitar defectos externos e internos, mantener tolerancias dimensionales y reducir el desgaste de los rodillos.

Forjado laminar. En esta operación (también conocida como *laminado cruzado*), la sección transversal de una barra redonda se forma pasándola a través de un par de rodillos con estrías perfiladas (fig. 13.13). Es común utilizar el forjado laminar para producir ejes cónicos y resortes de muelles, cuchillos de mesa y herramientas manuales; también se puede usar como operación preliminar de formado, seguida de otros procesos de forjado.

Laminado oblicuo. Un proceso similar al forjado laminar es el *forjado oblicuo*, que se utiliza generalmente para hacer rodamientos de bolas (fig. 13.14a). El alambrón o la barra redonda se introducen en el espacio de laminación y se forman de manera continua piezas brutas casi esféricas por la acción de los rodillos giratorios. Otro método de formar dichas piezas para rodamientos de bolas consiste en cizallar piezas a partir de una barra redonda y después recalcarlas en cabezales (ver también fig. 14.10) entre dos matrices con cavidades hemisféricas (fig. 13.14b). Después se rectifican las bolas y se pulen en máquinas especiales (ver fig. 26.15).

Laminado de anillos. En el *laminado de anillos*, un anillo grueso se expande en uno más delgado, aunque de diámetro mayor, y se coloca entre dos rodillos, uno de los cuales se acciona mientras el otro permanece inactivo (fig. 13.15a). Su espesor se reduce al juntar los rodillos conforme van girando. Puesto que el volumen del material del anillo permanece constante durante la deformación plástica (volumen constante), la reducción de su espesor se compensa con un aumento de su diámetro. Dependiendo de su tamaño,

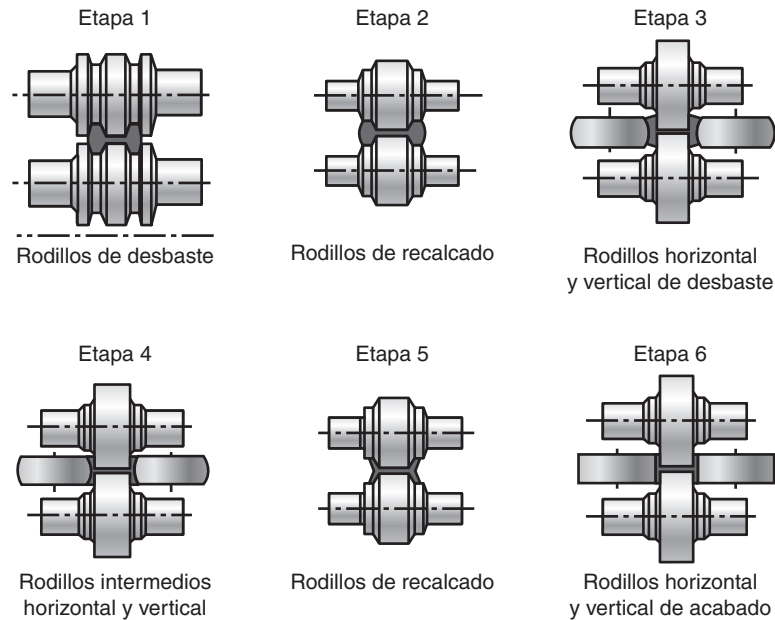


FIGURA 13.12 Pasos en la laminación de formas de una parte de una viga I. También se laminan muchas otras secciones estructurales, como canales y rieles, por medio de este tipo de proceso.

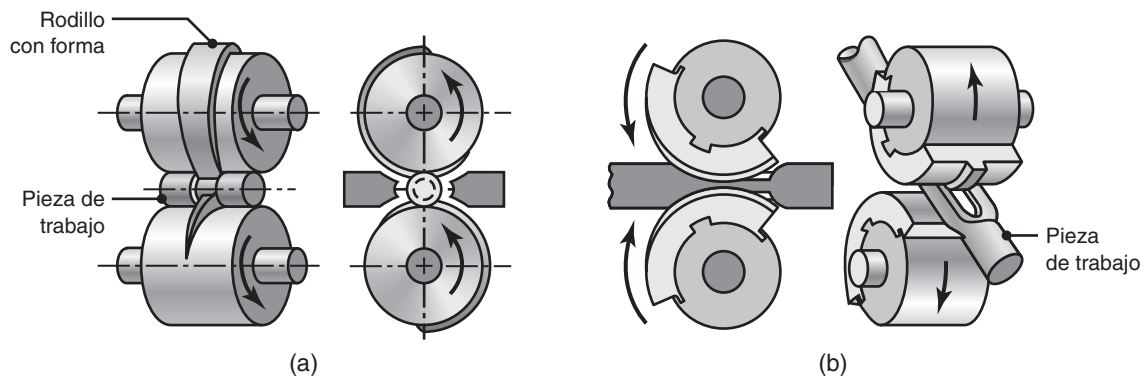


FIGURA 13.13 Dos ejemplos de operación de forjado laminar, conocida como *laminado cruzado*. Por medio de este proceso, se pueden hacer cuchillos y resortes de hoja cónica. Fuente: J. Holub.

la pieza bruta en forma de anillo se puede producir por medios como el corte de una placa, el perforado o el corte de un tubo de pared delgada. Mediante el laminado de anillos se pueden laminar diversas formas utilizando rodillos con forma específica (fig. 13.15). El espesor de los anillos también puede reducirse por medio de un proceso de forjado de matriz abierta, como se ilustra en la figura 14.4c; sin embargo, el control dimensional y el acabado superficial no serán tan adecuados como en el laminado de anillos.

El laminado de anillos se aplica en los anillos grandes para cohetes y turbinas, cubiertas de motores a reacción, bordes de ruedas dentadas, pistas para rodamientos de bolas y rodamientos de rodillos, bridas y anillos de refuerzo para tubos. El proceso se

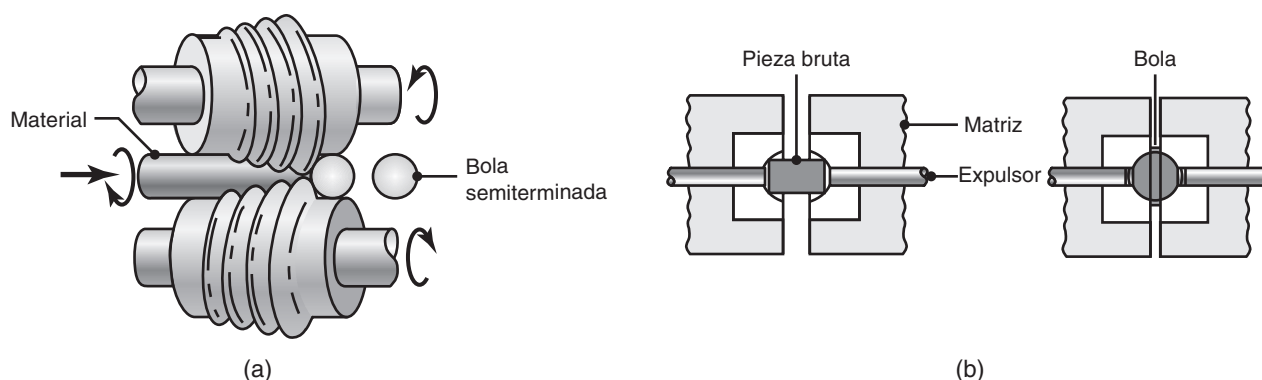


FIGURA 13.14 (a) Producción de bolas de acero por medio del proceso de laminado oblicuo. (b) Producción de bolas de acero recalando una pieza bruta cilíndrica. Observe la formación de rebabas. Posteriormente, las bolas fabricadas mediante estos procesos se rectifican y pulen para su uso en rodamientos de bolas.

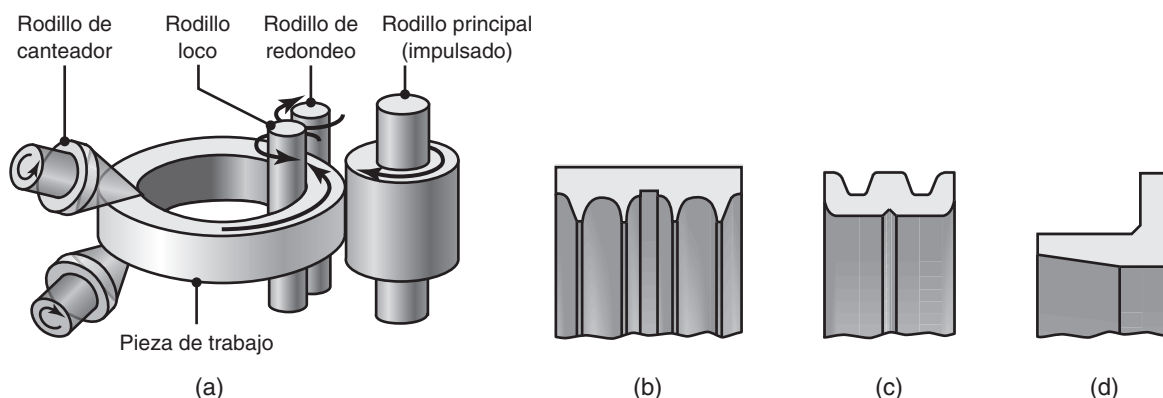


FIGURA 13.15 (a) Esquema de una operación de laminado de anillos. La reducción del espesor produce un aumento en el diámetro de la parte. (b) a (d) Ejemplos de secciones transversales que se pueden formar por medio de laminado de anillos.

puede efectuar a temperatura ambiente o a una temperatura elevada, lo que depende del tamaño (que puede ser hasta de 10 pies, o 3 m, de diámetro), la resistencia y ductilidad del material de la pieza de trabajo. En comparación con otros procesos de manufactura capaces de producir la misma parte, las ventajas del laminado de anillos consisten en tiempos de producción cortos, ahorros de material, cerradas tolerancias dimensionales y flujo favorable de granos en el producto, mejorando así su resistencia en la dirección deseada. El diseño de los rodillos de perfiles requiere gran experiencia. Se han desarrollado técnicas analíticas para no depender tanto de la práctica establecida y ayudar a minimizar los defectos en los productos laminados.

Laminación de roscas. La *laminación de roscas* es un proceso de formado en frío por medio del cual se forman roscas rectas o cónicas en barra redonda o alambra, al pasarlas entre matrices. Las roscas se forman en la barra o alambra con cada paso por un par de matrices planas reciprocantes (fig. 13.16a). En otro método, las roscas se forman con *matrices rotativas* (fig. 13.16c), a velocidades de producción que llegan a 80 piezas por segundo. Los productos típicos son tornillos, pernos y partes roscadas similares. Según el diseño de la matriz, el diámetro principal de una rosca laminada puede ser o no mayor al de una rosca maquinada (fig. 13.17a); es decir, igual que el diámetro de la

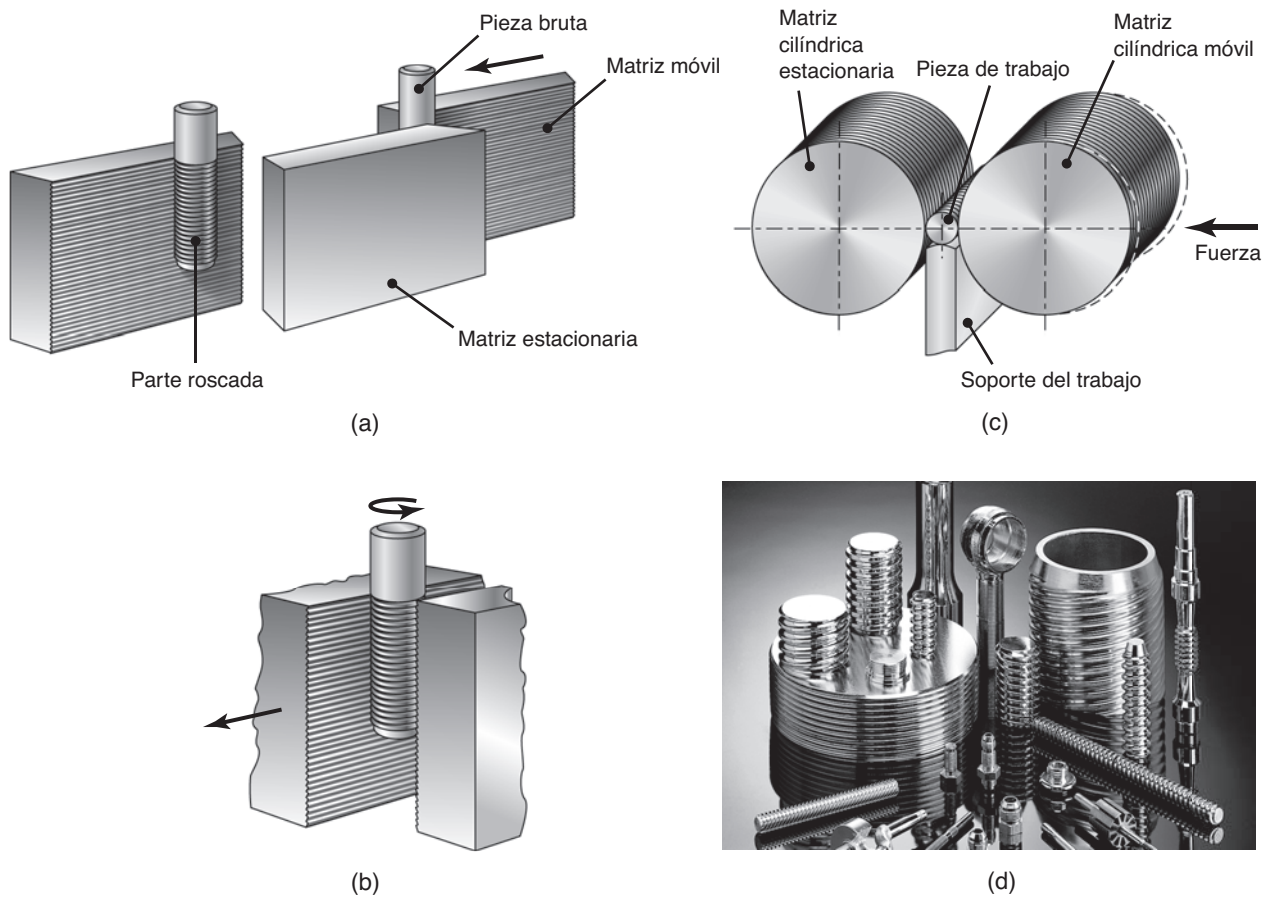


FIGURA 13.16 Procesos de laminado de roscas: (a) y (b) matrices planas reciprocantes; (c) matrices de doble rodillo; (d) colección de partes con roscas laminadas fabricadas de manera económica a altas velocidades de producción. Fuente: Cortesía de Tesker Manufacturing Corp.

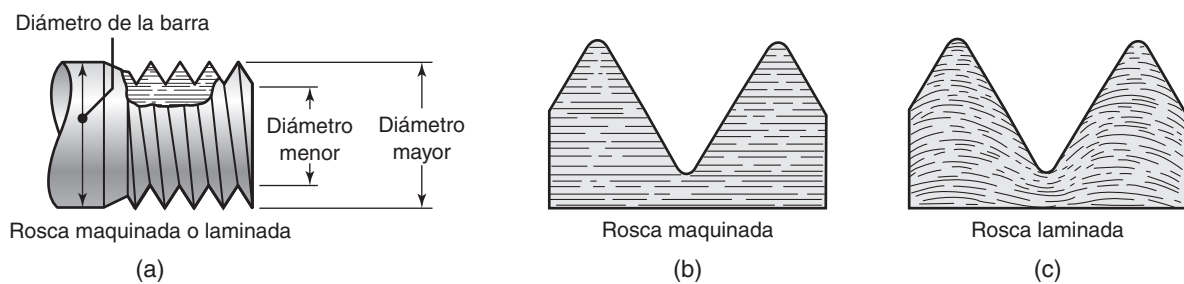


FIGURA 13.17 (a) Características de una rosca maquinada o laminada. Flujo de los granos en roscas (b) maquinadas, y (c) laminadas. A diferencia del maquinado, que corta a través de los granos del metal, el laminado de roscas proporciona mejor resistencia debido al trabajo en frío y al flujo favorable de los granos.

pieza bruta. El proceso de laminación de roscas también tiene la capacidad de generar otras formas, como estrías y diversos engranes, y se utiliza en la producción de casi todos los sujetadores roscados a altas velocidades de producción.

El proceso de laminación de roscas tiene la ventaja de generar roscas con buena resistencia (debido al trabajo en frío) y sin ninguna pérdida de material (desperdicio). El

acabado superficial producido es muy liso y el proceso induce a esfuerzos residuales compresivos en las superficies de la pieza de trabajo, mejorando así su resistencia a la fatiga. La laminación de roscas es superior a otros métodos de manufactura de roscas porque produce un patrón de flujo de grano que mejora la resistencia de la rosca (fig. 13.17), mientras que con el maquinado de las roscas se corta a través de las líneas del flujo de los granos del material.

Se pueden producir engranes rectos y helicoidales por medio de procesos de laminado en frío similares al laminado de roscas (ver también la sección 24.7). El proceso puede realizarse en piezas brutas cilíndricas sólidas o en engranes precortados. El laminado en frío de los engranes tiene diversas aplicaciones en transmisiones automáticas y en herramientas eléctricas. La **laminación de roscas internas** se puede efectuar con un **macho de roscado** (o machuelo) sin acanaladura. Esta operación es similar a la laminación de roscas externas y produce roscas internas exactas, con buena resistencia.

La lubricación es importante en las operaciones de laminación de roscas para obtener un buen acabado e integridad de la superficie y para minimizar los defectos. Afecta la manera en que el material se deforma durante la deformación plástica; esto debe tomarse en consideración, por la posibilidad de que se desarrollen defectos internos (por ejemplo, ver fig. 14.16). Generalmente hechas de acero endurecido, las matrices de laminación son costosas debido a su forma compleja. Por lo común, no pueden volver a rectificarse una vez que se desgastan. Sin embargo, con los materiales y la preparación apropiados, la vida de la matriz puede prolongarse por millones de piezas.

Perforado rotativo de tubo. También conocido como **proceso Mannesmann**, es una operación de trabajo en caliente para hacer *tubería* y *tubos sin costura* largos y de pared delgada (fig. 13.18). Desarrollado en la década de 1880, este proceso se basa en el principio de que cuando una barra redonda se somete a fuerzas radiales de compresión, se desarrollan esfuerzos de tensión en su centro (ver fig. 2.9). Cuando se somete de manera continua a estos esfuerzos cíclicos de compresión (ver fig. 13.18b), la barra empieza a desarrollar una pequeña cavidad en el centro que comienza a crecer. (Este fenómeno se puede demostrar con una pieza corta y redonda de goma para borrar, si se rueda adelante y atrás sobre una superficie dura plana, como se muestra en la fig. 13.18b). El perforado rotativo de tubo se realiza mediante un arreglo de rodillos giratorios (fig. 13.18c). Los ejes de los rodillos se *inclinan* para jalar la barra redonda a través de ellos por medio del componente axial del movimiento giratorio. Un mandril interno promueve la operación ampliando el orificio y dimensionando el diámetro interior del tubo; se puede mantener en su lugar con una barra larga, o puede ser un mandril flotante sin soporte. La severa deformación que sufre la barra obliga a que el material sea de alta cali-

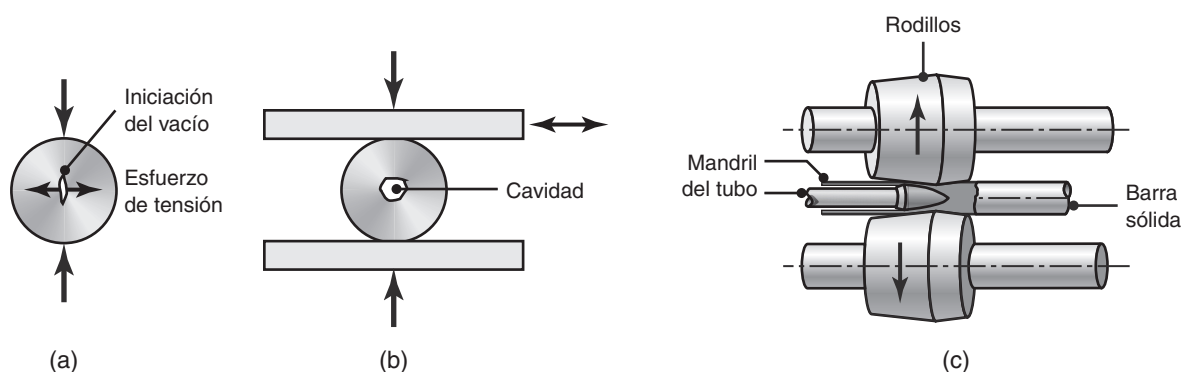


FIGURA 13.18 Formación de una cavidad en una barra redonda sólida y su utilización en el proceso de perforado rotativo de tubo para hacer tubos y tubería sin costura. (Ver también fig. 2.9).

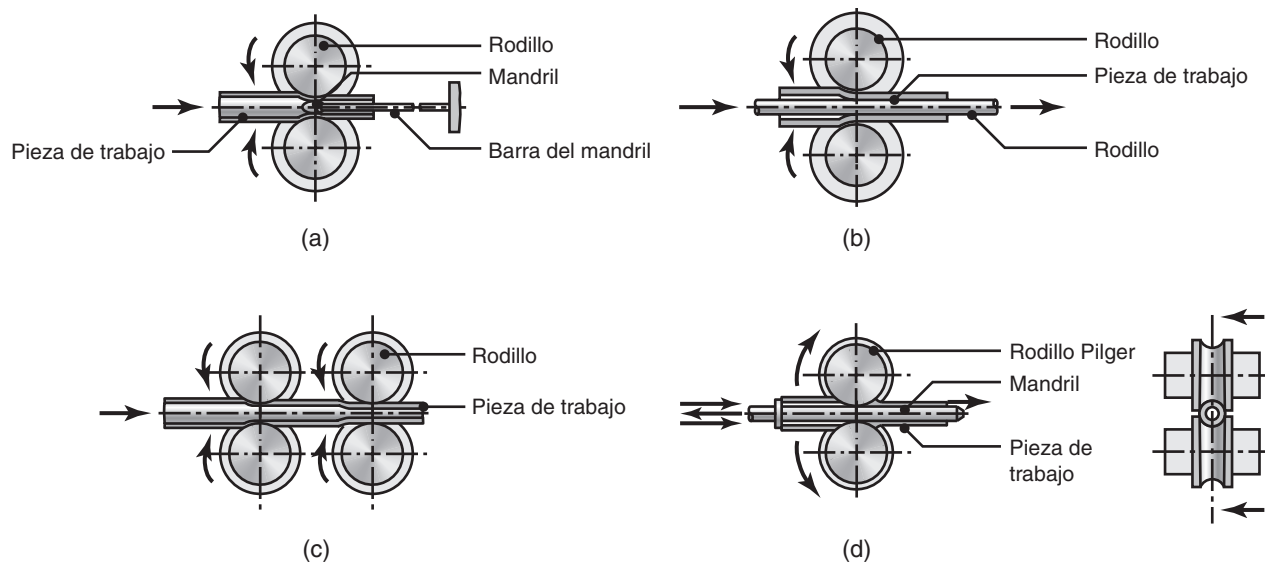


FIGURA 13.19 Esquema de diferentes procesos de laminado de tubos: (a) con mandril fijo; (b) con mandril flotante; (c) sin mandril, y (d) laminado Pilger con un mandril y un par de rodillos de forma. También se pueden cambiar los diámetros y espesores de los tubos mediante otros procesos, como estirado, extrusión y torcido.

dad y no tenga defectos (ya que se pueden propagar con rapidez y provocar fallas prematuras de la parte durante el formado).

Laminado de tubos. El diámetro y espesor de los tubos y la tubería se puede reducir mediante el *laminado de tubos*, que utiliza rodillos con forma (fig. 13.19). Algunas de estas operaciones pueden realizarse con mandril interno o sin él. En el *molino de laminación Pilger*, el tubo y el mandril interno se someten a un movimiento recíprocante; a los rodillos se les da una forma específica y se giran de manera continua. Durante el ciclo de espaciado de los rodillos, el tubo avanza y gira, iniciando otro ciclo de reducción. Como consecuencia, sufre una reducción de diámetro y de espesor de pared. La tubería de acero de 265 mm (10.5 pulgadas) de diámetro se produce mediante este proceso. En el capítulo 15 se describen otras operaciones para la manufactura de tubos.

13.5.1 Diferentes molinos

Molinos integrados. Estos molinos son instalaciones grandes que comprenden la integración total de las actividades: desde la producción del metal caliente en un alto horno hasta la fundición y el laminado de los productos terminados, listos para enviarse al cliente.

Minilaminadores. La competencia en la industria del acero ha llevado al desarrollo de los *minilaminadores*, en los que el desperdicio de metal (a) se funde en hornos de arco eléctrico, (b) se funde de manera continua, y (c) se lamina de modo directo como líneas específicas de productos. Cada minilaminador produce un tipo de producto laminado (varilla, barra o secciones estructurales como el ángulo de hierro) básicamente de un tipo de metal o aleación. En general, el desperdicio de metal, que se obtiene a nivel local (para reducir los costos de transporte), consiste en maquinaria, automóviles y equi-

po agrícola viejos. Los minilaminadores tienen ventajas económicas como las operaciones óptimas con baja inversión para cada tipo de metal y línea de productos y los bajos costos de mano de obra y energía. Por lo común, los productos se orientan a mercados en el área geográfica específica del molino.

ESTUDIO DE CASO 13.1

Manufactura de segmentos de cubierta de un motor cohete de combustible sólido para un transbordador espacial

Los transbordadores espaciales de Estados Unidos son naves muy complejas que requieren una extensa ingeniería en diseño y manufactura. Sus componentes son altamente especializados y se someten a condiciones extremas durante el vuelo. Para elevar el orbitador al espacio, un transbordador espacial emplea dos grandes cohetes impulsores cilíndricos de combustible sólido, atados, como se observa en la figura 13.20, que también muestra el lanzamiento del transbordador espacial *U.S.S. Atlantis*. Cada impulsor proporciona una fuerza de empuje de 3.3 millones de libras para el despegue y ascenso. Los cohetes impulsores constan de segmentos de cubierta de acero que contienen el propulsor de combustible sólido del cohete y actúan como recipientes a presión muy elevada durante el lanzamiento.

La manufactura de los segmentos de la cubierta de acero es muy desafiante y requiere una serie de procesos y equipo especiales (fig. 13.21). Dichos segmentos tienen un diámetro de unos 3 m (120 pulgadas), 3 m (120 pulgadas) de largo y menos de 13 mm (0.5 pulgada) de espesor. La tolerancia dimensional en el espesor es de 0.25 mm (0.010 pulgada). Para esta aplicación de recipiente a presión se necesita una sección de pared muy delgada y controlada de manera estricta. Sin embargo, los segmentos de la cubierta son tan grandes que el peso final del componente se aproxima mucho al límite de peso de las instalaciones para la fusión y fundición de acero con grado especial en lingotes que se utilizan como material inicial (pieza bruta). Por lo tanto, es indispensable que se desperdicie o descarte muy poco material durante el proceso de manufactura.



FIGURA 13.20 Lanzamiento del transbordador espacial *U.S.S. Atlantis* por medio de dos cohetes impulsores de combustible sólido amarrados. *Fuente:* Cortesía de la NASA.

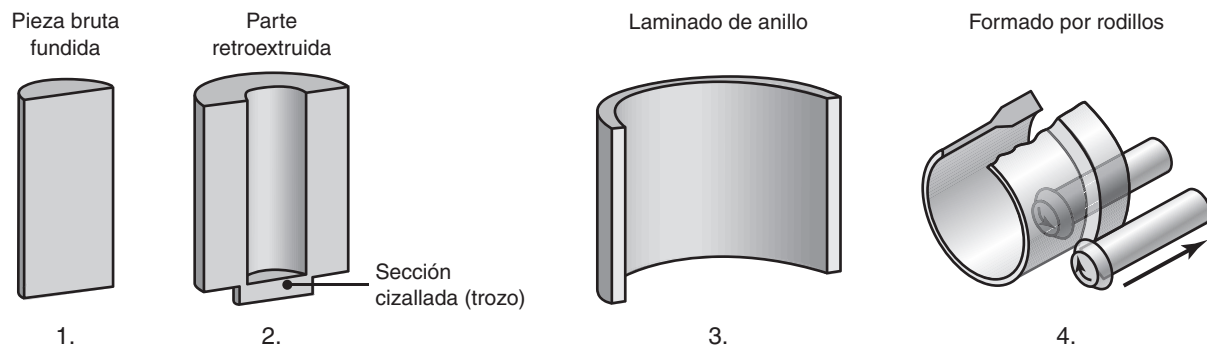


FIGURA 13.21 Procesos de formado comprendidos en la manufactura de cubiertas para cohetes de combustible sólido para los transbordadores espaciales.

Los requisitos de las propiedades mecánicas para estos componentes indican que se debe utilizar acero extremadamente limpio para eliminar los defectos propios de los materiales fundidos. Primero se funde acero Ladish D6AC, con una resistencia máxima a la tensión de 1500-1700 MPa (220-250 ksi), en lingotes grandes, de máxima calidad y fundidos al vacío. Debido a la necesidad de ahorrar material, el tamaño de los lingotes de acero es muy cercano al peso de los componentes terminados, por lo que tienen que incorporarse pasos de manufactura de uso eficiente del material. Para transformar el lingote fundido en sus componentes finales cilíndricos, se aplican varios de estos pasos: (a) recalcado, (b) extrusión, (c) laminado de anillos, (d) formado por laminación, (e) maquinado y (f) tratamiento térmico.

Primero se utiliza la extrusión indirecta (retroextruida o invertida) (ver fig. 15.3), a fin de producir una forma casi cilíndrica para los segmentos de la cubierta a partir del lingote fundido. En este proceso se recalca el lingote (ver fig. 14.3) y después se introduce, mediante una prensa, un troquel central grande en la pieza bruta de acero recalcada. Conforme se prensa el troquel en el centro del metal calentado, éste se extruye hacia atrás, entre el troquel móvil y el contenedor. Se retira el cilindro inicial, se extrae del contenedor y se retira el trozo delgado de material que queda debajo del troquel, al final de la operación, mediante cizallado en caliente (ver fig. 16.2).

El cilindro caliente se coloca después en una máquina grande de laminado de anillos, en la que se lamina el anillo (ver fig. 13.15) para obtener la forma adecuada. Este proceso reduce el espesor de pared del cilindro al tiempo que aumenta su diámetro. La longitud del cilindro se mantiene constante por medio de rodillos de contención o rodillos de apriete sobre las caras frontales, con el propósito de evitar que el material fluya en esa dirección. El cilindro laminado tiene un contorno que incluye las bridas frontales y el recipiente a presión central. Después de terminar esta operación, se maquina el cilindro para eliminar todas las escamas (del trabajo en caliente) y producir un acabado liso, uniforme y brillante. El diseño de este paso busca eliminar una cantidad mínima de material y producir una forma que esté lista para la operación de formado final.

El cilindro maquinado se procesa luego mediante el formado por laminación (también conocido como formado por flujo o rechazado, ver sección 16.9) para producir las paredes finales de los recipientes a presión. Este proceso se realiza a temperatura ambiente por medio de dos rodillos opuestos, con lo que la sección de la pared se reduce, el diámetro del cilindro permanece constante y su longitud aumenta. Así, la pared del cilindro se reduce en frío a su espesor neto final. Después se le da tratamiento térmico mediante normalizado, austenitizado, temple y revenido. Sólo las bridas en los extremos de los segmentos de la cubierta requieren algún maquinado final para ensamblarlas en el cohete.

Los pasos de manufactura descritos se han optimizado respecto de los requisitos y restricciones particulares para esta aplicación. Éstos incluyen (a) un material limpio, de alta resistencia a la tensión, (b) una geometría de los componentes sin defectos y que se pueda inspeccionar, (c) una pérdida mínima de material original, y (d) un proceso de manufactura estable, robusto y reproducible.

Fuente: Cortesía de D. Furrer, Ladish Co., Inc.

RESUMEN

- El laminado es el proceso de reducción del espesor —o cambio de la sección transversal— de una cinta larga mediante fuerzas de compresión aplicadas con una serie de rodillos. Además del laminado plano, se utiliza el laminado de formas para fabricar productos con diversas secciones transversales. Los productos fabricados por laminado incluyen (a) placa, lámina, hoja delgada, barra, tubo sin costura y tubería; (b) productos por laminado de forma, como vigas I y perfiles estructurales, y (c) barras de diversas secciones transversales. Otras operaciones de laminado incluyen la laminación de anillos y el laminado de roscas.
- El laminado se puede efectuar a temperatura ambiente (laminado en frío) o a temperaturas elevadas (laminado en caliente). El proceso comprende numerosas variables de materiales y procesos, incluyendo el diámetro de los rodillos (en relación con el espesor del material), la reducción por pase, la velocidad, la lubricación y la temperatura. El ensanchado, el doblado y el aplanado son aspectos que deben considerarse para controlar la precisión dimensional del material laminado.
- Los molinos de laminación tienen varias configuraciones, como laminación dúo, de tres rodillos, de cuatro rodillos y de conjunto (Sendzimir), además del laminado compuesto o de tándem. Se puede aplicar tensión frontal o posterior al material para reducir las fuerzas de laminado.
- La fundición y el laminado continuos de metales ferrosos y no ferrosos en productos semiterminados se han convertido en una práctica común debido a sus beneficios económicos.
- Los molinos integrados son instalaciones grandes que comprenden la secuencia completa de las actividades, desde la producción del metal caliente en un alto horno hasta la fundición y el laminado de productos terminados, listos para su envío al cliente. En una escala mucho menor, los minilaminadores utilizan desperdicio de metal que se funde en hornos de arco eléctrico, se cuela y se lamina de manera continua en líneas específicas de producción.

TÉRMINOS CLAVE

Acocodrilado	Laminación de relevado	Laminado en conjunto
Castillo	Laminación de roscas	Laminado en frío
Comba	Laminación en caliente	Laminado oblicuo
Corona	Laminación plana	Laminado Steckel
Ensanchado	Laminado	Minilaminador
Estructura fundida	Laminado compuesto o de tándem	Molino de desbaste
Estructura maleable	Laminado de anillos	Molino de laminación
Forjado laminar	Laminado de forma	Molino de laminación Pilger
Hoja delgada	Laminado de tubos	Molino Sendzimir
Lámina	Laminado en caliente	Número de calibre

Palanquilla
Perforado rotativo de tubo
Placa
Planchón

Proceso Mannesmann
Punto neutral
Reducción
Rodillo

Soporte de rodillo
Tensión delantera
Tensión trasera
Tocho (“bloom”)

BIBLIOGRAFÍA

Blazynski, T. Z., *Plasticity and Modern Metal-forming Technology*, Elsevier, 1989.
Ginzburg, V. B., *High-Quality Steel Rolling: Theory and Practice*, Marcel Dekker, 1993.
———, *Steel-Rolling Technology: Theory and Practice*, Marcel Dekker, 1989.

Hosford, W. F. y Caddell, R. M., *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*, 2^a. ed., Prentice Hall, 1993.
Lange, K. (ed.), *Handbook of Metal Forming*, McGraw-Hill, 1985.
Roberts, W. L., *Cold Rolling of Steel*, Marcel Dekker, 1978.
———, *Hot Rolling of Steel*, Marcel Dekker, 1983.

PREGUNTAS DE REPASO

- 13.1 ¿Cuál es la diferencia entre una placa y una lámina?
13.2 Defina: (a) espacio de laminación, (b) punto neutro, y (c) reducción.
13.3 ¿Qué factores contribuyen al ensanchado en el laminado plano?
13.4 Explique los tipos de deflexión a los que se someten los rodillos.
13.5 Describa la diferencia entre un tocho o “bloom”, un planchón y una palanquilla.
13.6 ¿Por qué es necesario nivelar los rodillos?
13.7 Liste los defectos comúnmente observados en el laminado plano.

- 13.8 ¿Cuáles son las ventajas del laminado compuesto? ¿Y las del laminado en conjunto?
13.9 Liste algunas partes que se puedan fabricar mediante (a) laminado de forma, y (b) laminado de roscas.
13.10 ¿Cómo se producen los tubos sin costura?
13.11 ¿Por qué el acabado superficial de un producto laminado es mejor en laminado en frío que en laminado en caliente?
13.12 ¿Cuál es el molino Sendzimir? ¿Cuáles son sus características importantes?
13.13 ¿Qué se hace comúnmente para asegurar que el producto en laminado plano no tenga coronas?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 3.14 Explique por qué se inventó y desarrolló el proceso de laminado.
13.15 El laminado plano reduce el espesor de placas y láminas. Por otro lado, también es posible reducir el espesor simplemente estirando el material. ¿Sería éste un proceso factible? Explique su respuesta.
13.16 Explique cómo se invierten los patrones de esfuerzos residuales mostrados en la figura 13.9 cuando se cambia el radio del rodillo o la reducción por pase.
13.17 Explique si sería práctico aplicar la técnica de nivelación de rodillos mostrada en la figura 13.7 a placas gruesas.
13.18 Describa los factores que influyen en la magnitud de la fuerza de laminado (F) en la figura 13.2c.

- 13.19 Explique cómo aplicaría las tensiones delantera y trasera a hojas metálicas durante el laminado. ¿Cómo haría para controlar estas tensiones?
13.20 Hicimos notar que los rodillos tienden a aplanarse bajo las fuerzas de laminado. Describa los métodos por los cuales se puede reducir el aplanamiento. ¿Qué propiedad o propiedades del material del rodillo se pueden aumentar para reducir el aplanamiento?
13.21 Se indicó que el ensanchado en el laminado plano aumenta con (a) la reducción de la relación anchura a espesor del material de entrada, (b) la reducción de la fricción, y (c) la reducción de la relación de radio del rodillo a espesor de la cinta. Explique por qué.

13.22 Como se indicó en este capítulo, el laminado plano se puede efectuar sólo mediante tensión delantera, utilizando rodillos inactivos (laminado Steckel). Puesto que el torque en los rodillos es cero ahora, ¿entonces de dónde proviene la energía para suministrar el trabajo de deformación en el laminado?

13.23 ¿Cuál es la consecuencia de aplicar una tensión posterior demasiado alta en el laminado?

13.24 En la figura 13.3d, observe que los rodillos impulsados (rodillos motorizados) son el tercer conjunto del rodillo de trabajo. ¿Por qué no se aplica potencia por medio de este último rodillo? ¿Es posible? Explique su respuesta.

13.25 Describa la importancia de controlar las velocidades de los rodillos, los espacios de laminación, la temperatura y otras variables del proceso en una operación de

laminado compuesto o de tándem, como se muestra en la figura 13.11. Explique cómo determinaría la distancia entre las estaciones.

13.26 En la figura 13.9a, si retira la capa superior a compresión mediante, digamos, rectificado, ¿la cinta permanecerá plana? Si no es así, ¿de qué manera se curvaría y por qué?

13.27 Nombre varios productos que se puedan fabricar por medio de cada una de las operaciones mostradas en la figura 13.1.

13.28 Liste las posibles consecuencias de laminar (a) a una velocidad demasiado alta, y (b) a una velocidad demasiado baja.

13.29 Describa sus observaciones en relación con la figura 13.12.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

13.30 Utilizando relaciones geométricas simples y el principio de plano inclinado para la fricción, demuestre la ecuación 13.1.

13.31 Estime la fuerza de laminado (F) y el torque para una cinta de acero al carbón AISI 1020 que tiene 200 mm de ancho y 10 mm de espesor y que se lamina a un espesor de 7 mm. El radio del rodillo es de 200 mm y gira a 200 rpm.

13.32 En el ejemplo 13.1, calcule la fuerza y potencia de laminado para el caso en el que el material de la pieza de trabajo sea aluminio 1100-O y el radio del rodillo R de 10 pulgadas.

13.33 Calcule las reducciones individuales en cada uno de los castillos en la operación de laminado compuesto mostrada en la figura 13.11.

13.34 Suponga que es un instructor que cubre los temas descritos en este capítulo y está haciendo un examen sobre los aspectos cuantitativos, para poner a prueba los conocimientos de los estudiantes. Prepare dos problemas cuantitativos y dé las respuestas

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

13.35 En la figura 13.3a se muestra un simple esquema para un castillo de cuatro rodillos. Investigue en la literatura técnica y presente un esquema más detallado de dicha estación, que muestre los componentes principales.

13.36 Consiga un pedazo de goma suave y redonda de hule para borrar, como la de los lápices, y reproduzca el proceso mostrado en la figura 13.18b. Observe cómo empieza a erosionarse la parte central de la goma, produciendo un orificio.

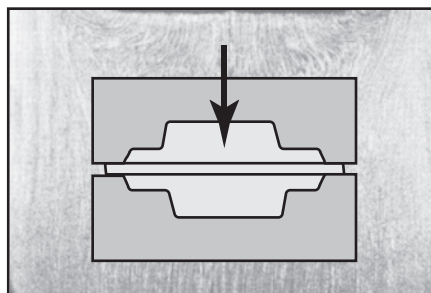
13.37 Si repite el experimento del problema 13.36 con una goma más dura, como la utilizada para tinta, observará que toda la goma empieza a agrietarse y desmoronarse. Explique las razones.

13.38 Diseñe una serie de rodillos para producir secciones transversales distintas de las mostradas en la figura 13.12.

Forjado de metales

CAPÍTULO

14



En este capítulo se examinan los fundamentos de los procesos de forjado y los relacionados con ellos, incluyendo las consideraciones de diseño y económicas. Se incluyen los siguientes temas:

- Operaciones de forjado de matriz abierta para producir formas simples.
- Operaciones de forjado de matriz de impresión y en matriz cerrada para producir formas más intrincadas.
- Diversas operaciones de forjado, como cabeceado, penetrado, acuñado, estampado y extrusión en frío.
- Defectos del forjado y fallas de las matrices y sus causas.
- Economía del forjado en lo que se refiere a la selección de procesos.
- Diseño de piezas forjadas, diseño y manufactura de matrices y selección de materiales y lubricantes.

Partes típicas fabricadas por medio del forjado y otros procesos relacionados con él: flechas de transmisión, engranes, tornillos, álabes de turbinas, herramientas manuales, dados y componentes para maquinaria, transportación e implementos agrícolas.

Procesos alternativos: fundición, metalurgia de polvos, maquinado y fabricación.

- 14.1 Introducción 371
- 14.2 Forjado de matriz abierta 373
- 14.3 Forjado por matriz de impresión y de matriz cerrada 376
- 14.4 Diversas operaciones de forjado 380
- 14.5 Forjabilidad de los metales. Defectos del forjado 384
- 14.6 Diseño de matrices, materiales para matrices y lubricación 387
- 14.7 Métodos de manufactura de matrices. Fallas en las matrices 388
- 14.8 Máquinas para forjado 390
- 14.9 Economía del forjado 392

EJEMPLO:

- 14.1 Cálculo de la fuerza de forjado en el recalco 375

ESTUDIO DE CASO:

- 14.1 Manufactura de un perno escalonado mediante cabeceado y penetrado 382
- 14.2 Componentes de la suspensión del automóvil Lotus Elise 394

14.1 | Introducción

El **forjado** es un proceso básico en el que la pieza de trabajo se moldea mediante fuerzas de compresión aplicadas por medio de matrices y herramientas. Es una de las operaciones más antiguas e importantes en el trabajo de metales; se remonta al año 4000 a.C. y se utilizó por primera vez para realizar joyería, monedas y diversos implementos martillando el metal con herramientas hechas de piedra. En la actualidad, las partes forjadas incluyen grandes rotores para turbinas, engranes, tornillos y remaches, cuchillería (fig. 14.1a), herramientas manuales, diversos componentes estructurales para maquinaria, aeronaves (fig. 14.1b y c) y vías férreas, así como otros equipos de transporte.

A diferencia de las operaciones de laminado descritas en el capítulo 13, que por lo general producen placas, láminas, cintas o varias secciones transversales estructurales continuas, las operaciones de forjado producen *partes discretas*. Debido a que es posible controlar el flujo de metal en una matriz y la estructura de los granos del material, las partes forjadas tienen buena resistencia y tenacidad y son muy confiables en aplicaciones críticas sujetas a grandes esfuerzos (fig. 14.2). Las operaciones de forjado simple se pueden

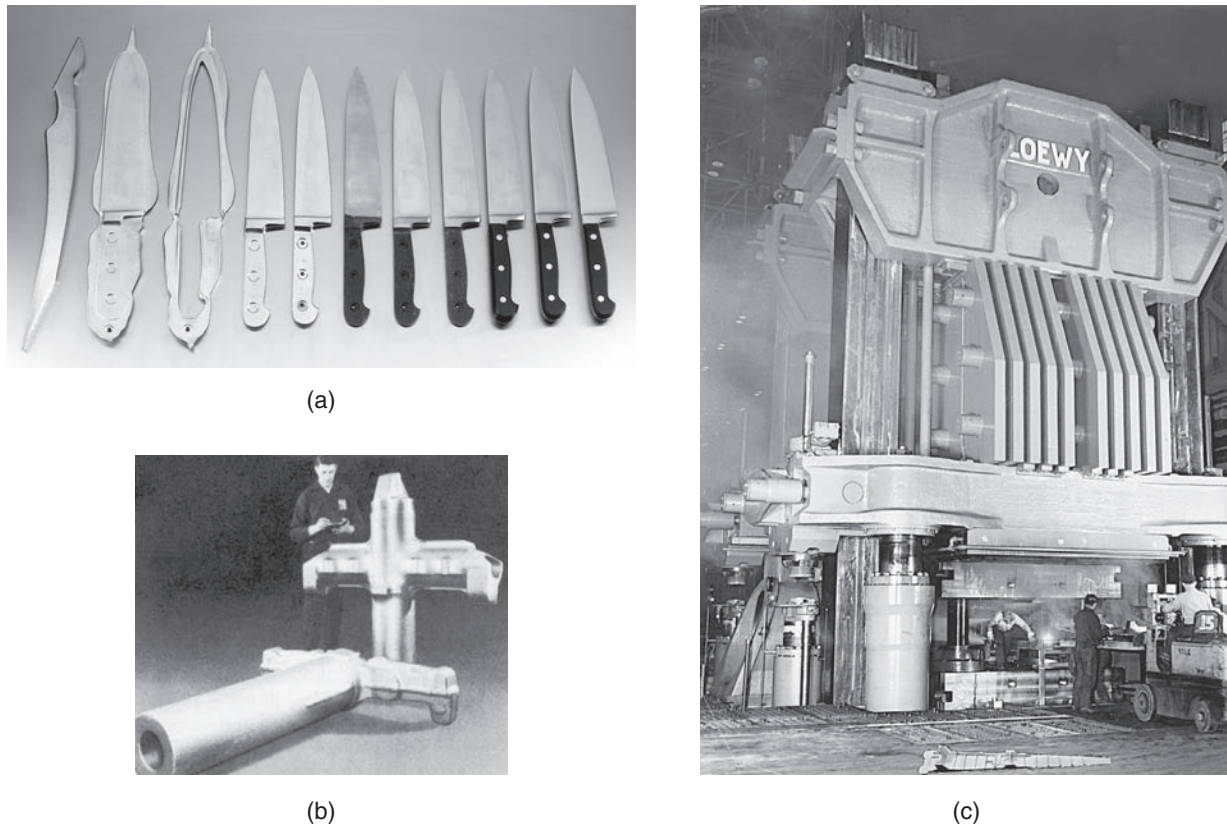


FIGURA 14.1 (a) Esquema de los pasos comprendidos en el forjado de un cuchillo. (b) Componentes hechos mediante forjado del tren de aterrizaje para el avión de transporte C5A y C5B. (c) Vista general de una prensa hidráulica de 445 MN (50,000 toneladas). Fuente: (a) Cortesía de Mundial LLC. (b) y (c) Cortesía de Wyman-Gordon Company.

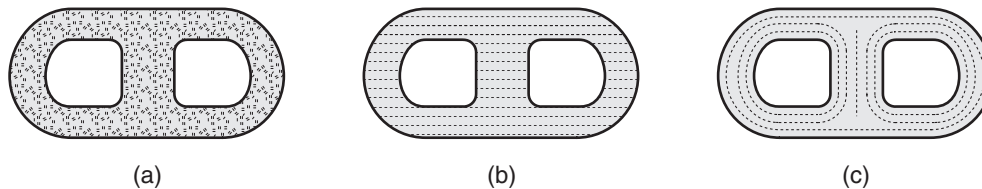


FIGURA 14.2 Esquema de una parte fabricada mediante tres procesos, que muestra el flujo de los granos. (a) Fundición por medio de los procesos descritos en el capítulo 11. (b) Maquinado de una pieza en bruto, como se describe en la parte IV de este libro, y (c) forjado. Cada proceso tiene sus propias ventajas y limitaciones respecto de las características externas e internas, propiedades de los materiales, precisión dimensional, acabado superficial y economía de producción. Fuente: Cortesía de Forging Industry Association.

realizar con un martillo pesado y un yunque, como lo hacen tradicionalmente los herreros. Sin embargo, la mayoría de las forjas requieren una serie de matrices y equipo como prensa y martillo mecánico de forja.

El forjado puede efectuarse a temperatura ambiente (*forjado en frío*) o a temperaturas elevadas (*forjado a temperatura media o en caliente*), dependiendo de la temperatura (ver sección 1.7). El forjado en frío requiere fuerzas más grandes, debido a la mayor resistencia del material de la pieza de trabajo, y éste debe poseer suficiente ductilidad a tempe-

ratura ambiente para someterse a la deformación necesaria sin que se agriete. Las partes forjadas en frío tienen un buen acabado superficial y precisión dimensional. En cambio, el forjado en caliente requiere menores fuerzas, pero la precisión dimensional y el acabado superficial de las partes no son tan elevados como en el forjado en frío.

Por lo general, las partes forjadas se someten a operaciones de acabado adicionales, como el tratamiento térmico, para modificar sus propiedades, y el maquinado, a fin de obtener dimensiones finales exactas y acabado superficial. El *forjado de precisión*, que es un ejemplo importante de los procesos de formado de *formas netas* o *formas casi netas*, puede minimizar esas operaciones de acabado. Como veremos a lo largo del libro, los componentes que se pueden forjar con éxito también pueden fabricarse de manera económica mediante otros métodos, como la fundición (capítulo 11), la metalurgia de polvos (capítulo 17) o el maquinado (parte IV). Cada uno de ellos produce una parte que tiene diferentes características, sobre todo en relación con la resistencia, tenacidad, precisión dimensional, acabado superficial y la posibilidad de defectos internos o externos.

14.2 | Forjado de matriz abierta

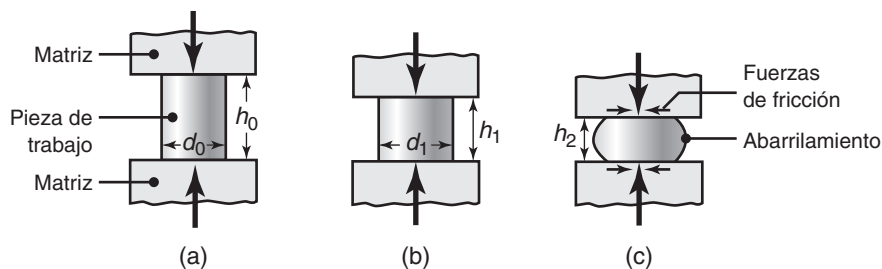
El *forjado de matriz abierta* es la operación más simple de forjado (tabla 14.1). Aunque por lo general la mayoría de las partes forjadas de matriz abierta pesan de 15 a 500 kg (30 a 1000 libras), se han forjado piezas con un peso hasta de 300 toneladas. Las partes pueden ser muy pequeñas, como los clavos, pernos y tornillos, o muy grandes (como los ejes hasta de 23 m [75 pies] de longitud para propulsores de barcos). El forjado de matriz abierta se puede representar mediante una pieza de trabajo sólida colocada entre dos matrices planas y cuya altura se reduce por compresión (fig. 14.3a), proceso que también se conoce como **recalcado** o **forjado con matriz plana**. Asimismo, las superficies de la matriz pueden tener cavidades poco profundas o incorporar rasgos para producir forjas relativamente simples.

En la figura 14.3b se muestra la deformación de la pieza de trabajo en *condiciones sin fricción*. Puesto que el volumen se mantiene constante, cualquier reducción de la al-

TABLA 14.1

Características generales de los procesos de forjado		
Proceso	Ventajas	Limitaciones
Matriz abierta	Matrices simples y poco costosas; amplia gama de tamaños de partes; buenas características de resistencia; por lo general para cantidades pequeñas.	Limitado a formas simples; es difícil mantener tolerancias cerradas; es necesario maquinar para dar forma final; velocidad de producción baja; utilización relativamente deficiente del material; requiere alto grado de habilidad.
Matriz cerrada	Uso de material relativamente adecuado; por lo general con mejores propiedades que los forjados de matriz abierta; buena precisión dimensional; altas velocidades de producción; buena reproducibilidad.	Alto costo de la matriz, no económico para cantidades pequeñas; con frecuencia es necesario el maquinado.
De aproximación o bloqueo	Costos bajos de matriz; altas velocidades de producción.	Es necesario maquinado para dar forma final; partes con almas gruesas y filetes grandes.
Convencional	Requiere mucho menos maquinado que el tipo de aproximación; altas velocidades de producción; utilización adecuada del material.	Costo de la matriz más elevado que el del tipo de aproximación.
De precisión	Tolerancias dimensionales cerradas; es posible producir almas muy delgadas y rebordes; generalmente no es necesario el maquinado; muy buena utilización del material.	Fuerzas elevadas de forjado; matrices intrincadas y previsiones para extraer la forja de las matrices.

FIGURA 14.3 (a) Tocho cilíndrico sólido recalcado entre dos matrices planas. (b) Deformación uniforme del tocho sin fricción. (c) Deformación con fricción. Obsérvese el abarrilamiento del tocho causado por las fuerzas de fricción en las interfaces entre el tocho y la matriz.



tura aumenta el diámetro de la parte forjada. Obsérvese en la figura 14.3b que la pieza de trabajo se deforma *de manera uniforme*. Sin embargo, en las operaciones reales sí existe fricción y la parte desarrolla una forma de *barril* (fig. 14.3c), deformación también conocida como *colapsado*.

El **abarrilamiento** se produce principalmente por las fuerzas de fricción en las interfaces matriz-pieza de trabajo que se oponen al flujo exterior de los materiales en estas interfaces y que, por lo tanto, se pueden minimizar con un lubricante eficaz. El abarrilamiento también puede desarrollarse al recalcar piezas de trabajo calientes entre matrices frías. El material en las superficies de la matriz, o cerca de ellas, se enfría con rapidez, en tanto que el resto de la pieza de trabajo permanece relativamente caliente. En consecuencia, el material en las partes superior e inferior de dicha pieza tiene mayor resistencia a la deformación que el de la parte central. Por lo tanto, la parte central de la pieza se dilata hacia los lados más que en sus extremos. El abarrilamiento que se produce por los efectos térmicos puede reducirse o eliminarse mediante matrices calientes. Para este propósito, también es posible utilizar barreras térmicas, como la tela de vidrio, en las interfaces entre la matriz y la pieza de trabajo.

La **forja de desbaste** (también conocida como *estirado*) es una operación de forjado de matriz abierta en la que el espesor de una barra se reduce por medio de pasos sucesivos de forjado (*reducciones*) a intervalos específicos (fig. 14.4a). Se puede reducir el espesor de barras y anillos mediante técnicas similares de forjado de matriz abierta, como se muestra en la figura 14.4b y c. Debido a que el área de contacto entre la matriz y la pieza de trabajo es pequeña, puede reducirse el espesor de una sección larga de una barra sin requerir grandes fuerzas o maquinaria pesada. Los herreros efectúan dichas ope-

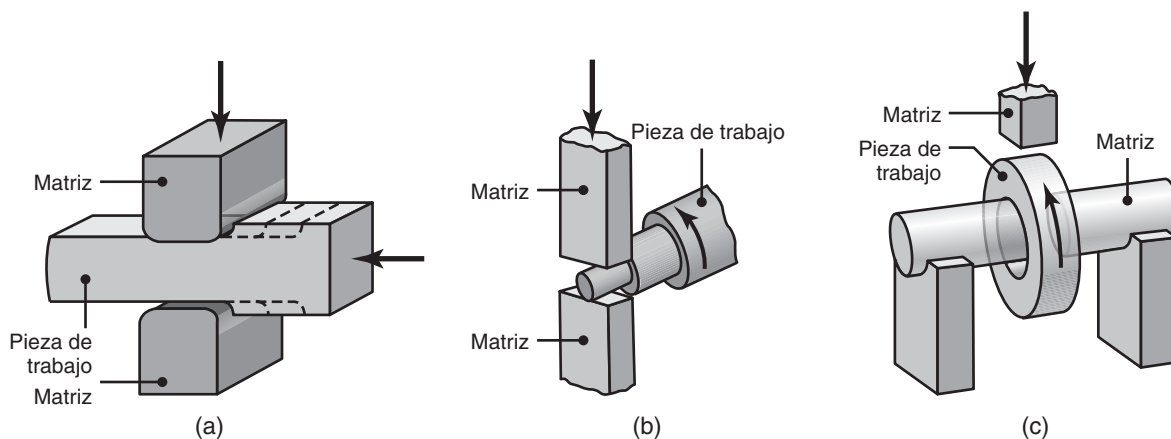


FIGURA 14.4 (a) Esquema de una operación de forja de desbaste en una barra rectangular. Los herreros utilizan este proceso para reducir el espesor de las barras martillando la parte sobre un yunque. La reducción de espesor va acompañada de abarrilamiento, como en la figura 14.3c. (b) Reducción del diámetro de una barra mediante forjado en matriz abierta; obsérvese los movimientos de las matrices y de la pieza de trabajo. (c) Espesor de un anillo que se reduce mediante forjado de matriz abierta.

raciones con un martillo y un yunque mediante piezas calientes de metal: ejemplos comunes de estos productos son las cercas de hierro de diversos diseños. En consecuencia, la forja de desbaste puede ser un sustituto aproximado de las operaciones de laminado. Por lo general, la forja de desbaste de piezas de trabajo más grandes se hace con equipo mecanizado y controles por computadora, en los que se coordinan los movimientos laterales y verticales para producir la parte deseada.

Fuerza de forjado. La *fuerza de forjado* (F) en una operación de *forjado de matriz abierta*, en una pieza sólida cilíndrica, se puede calcular a partir de la fórmula

$$F = Y_f \pi r^2 \left(1 + \frac{2 \mu r}{3h} \right) \quad (14.1)$$

en la que Y_f es el *esfuerzo de flujo* del material (ver el ejemplo siguiente), μ el coeficiente de fricción entre la pieza de trabajo y la matriz, y r y h son el radio y la altura de la pieza de trabajo, respectivamente. (En las referencias listadas en la bibliografía al final del capítulo se proporciona la derivación de esta fórmula y de otras para diversos procesos de forjado).

EJEMPLO 14.1 Cálculo de la fuerza de forjado en el recalcado

Un trozo de metal cilíndrico hecho de acero inoxidable 304 tiene 150 mm (6 pulgadas) de diámetro y 100 mm (4 pulgadas) de altura. Ésta se reduce 50% a temperatura ambiente por medio de forjado de matriz abierta con matrices planas. Si el coeficiente de fricción es de 0.2, calcule la fuerza de forjado al *final* del recorrido o carrera.

Solución La fuerza de forjado al final del recorrido se calcula mediante la ecuación 14.1, en la que las dimensiones corresponden a las dimensiones finales del forjado. Por lo tanto, la altura final es $h = 100/2 = 50$ mm y el radio final (r) se determina a partir del volumen constante, igualando los volúmenes antes y después de la deformación. Por lo que

$$(\pi)(75)^2(100) = (\pi)(r)^2(50)$$

y por lo tanto, $r = 106$ mm (4.17 pulgadas).

La cantidad Y_f en la ecuación 14.1 es el esfuerzo de flujo del material, que es el esfuerzo requerido para continuar con la deformación plástica de la pieza de trabajo bajo una deformación real particular. El valor absoluto de la deformación real a la que se somete dicha pieza al final del recorrido en esta operación es

$$\epsilon = \ln\left(\frac{100}{50}\right) = 0.69$$

Podemos determinar el esfuerzo de flujo si vemos la ecuación 2.8 y observamos en la tabla 2.3 que para el acero inoxidable 304, $K = 1275$ MPa y $n = 0.45$. Por lo tanto, se calcula que para una deformación real de 0.69, el esfuerzo de flujo es de 1100 MPa. Otro método consiste en ver la figura 2.6 y observar que el esfuerzo de flujo para el acero inoxidable 304, a una deformación real de 0.69, es de unos 1000 MPa (140 ksi). La pequeña diferencia entre los dos valores se debe a que los datos de la tabla 2.3 y la figura 2.6 son de fuentes distintas. Tomando el último valor ya se puede calcular la fuerza de forjado, considerando que en este problema las unidades de la ecuación 14.1 deben estar en N y m. Por consiguiente,

$$\begin{aligned} F &= (1000)(10^6)(\pi)(0.106)^2 \left(1 + \frac{(2)(0.2)(0.106)}{(3)(0.050)} \right) \\ &= 4.5 \times 10^7 \text{ N} = 45 \text{ MN} = 10^7 \text{ lb} = 5000 \text{ toneladas}^{\text{N. del RT.}} \end{aligned}$$

N. del RT. Una tonelada corta equivale a 2000 lb.

14.3 Forjado por matriz de impresión y de matriz cerrada

En el *forjado por matriz de impresión*, la pieza de trabajo toma la forma de la cavidad de la matriz mientras se va forjando entre dos matrices con forma (fig. 14.5a a c). Por lo general, este proceso se realiza a temperaturas elevadas para mejorar la ductilidad de los metales y disminuir las fuerzas. Obsérvese que en la figura 14.5c, durante la deformación, parte del material fluye hacia el exterior y forma unos **bigotes o rebaba de forja**. La rebaba desempeña un papel importante en el forjado por matriz de impresión. La temperatura elevada y la alta resistencia a la fricción resultante en la rebaba representan una severa restricción al flujo exterior del material en la matriz. Por lo tanto, con base en el principio de que en la deformación plástica los materiales fluyen hacia donde hay menor resistencia (debido a que requiere menos energía), el material empieza a fluir al interior de la cavidad de la matriz, llenándola finalmente.

En la figura 14.5d se muestra la terminología estándar para una matriz común de forjado. En vez de hacerse de una sola pieza, las matrices se pueden fabricar de varias piezas (segmentadas), incluyendo **insertos de matrices** (fig. 14.6) y en particular para formas complejas. Es posible reemplazar estos insertos con facilidad en caso de desgaste o falla en una sección particular de la matriz, y por lo general se hacen de materiales más resistentes y duros. Por supuesto que las matrices deben permitir la extracción de las forjas sin dificultad (ver también sección 14.6).

La pieza en bruto, o tocho, que se va a forjar, se prepara por medios como (a) *cor-te* de un barra de material extruido o estirado; (b) una preforma de operaciones como *metalurgia de polvos*; (c) *fundición*; o (d) utilización de una pieza en bruto preformada mediante una operación previa de forjado. Dicha pieza se coloca en la matriz inferior y conforme la matriz superior empieza a descender, la forma de la pieza en bruto cambia gradualmente, como se muestra para el forjado de una biela en la figura 14.7a.

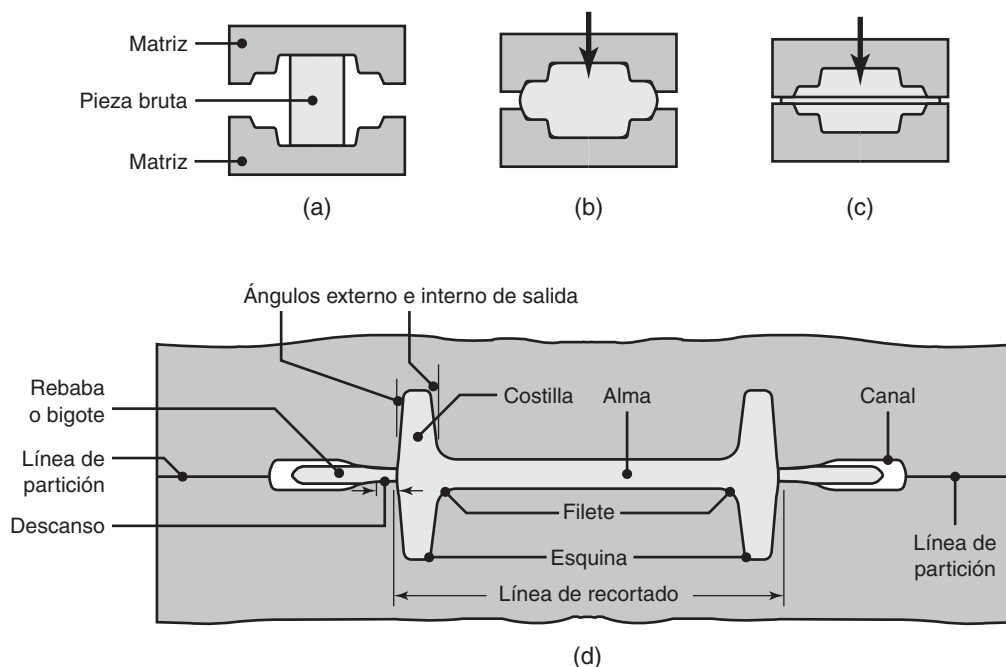


FIGURA 14.5 (a) a la (c) Etapas en el formado por matriz de impresión de un tocho sólido. Obsérvese la formación de rebaba, que es el exceso de metal que se recorta posteriormente (ver fig. 14.7). (d) Terminología estándar para diversas características de una matriz de forjado.

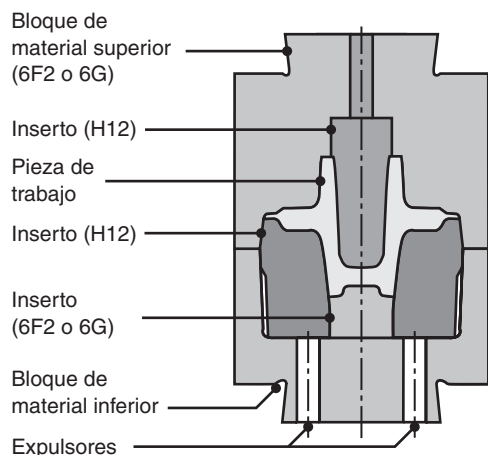
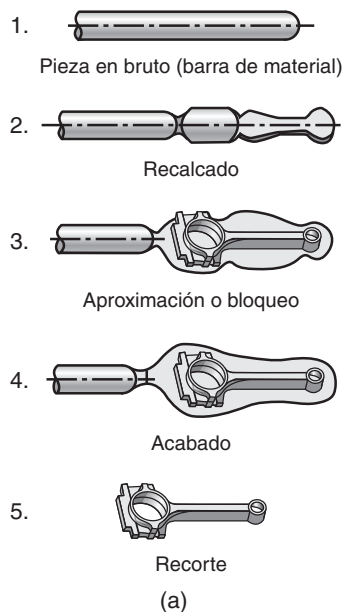
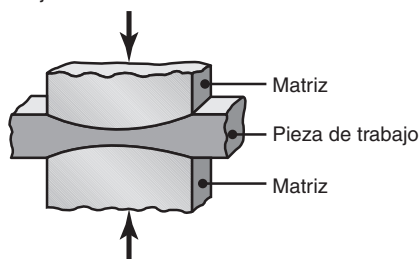


FIGURA 14.6 Insertos de matriz utilizados en el forjado del alojamiento de un eje automovilístico.

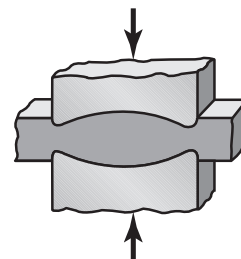


Forjado con dado convexo



(b)

Forjado con dado cóncavo



(c)

FIGURA 14.7 (a) Etapas de forjado de una biela para un motor de combustión interna. Obsérvese la cantidad de rebaba requerida para asegurar el llenado apropiado de las cavidades de la matriz. (b) Operaciones de forjado con dado convexo y (c) con dado cóncavo para distribuir el material de manera apropiada cuando se da forma previa a la pieza en bruto para forjarla.

Por lo general, las **operaciones de preformado** (fig. 14.7b y c) se utilizan para distribuir el material adecuadamente en varias regiones de la pieza en bruto, mediante matrices con formas simples de diversos contornos. En el **forjado con dado convexo**, se *retira* el material de un área. En el **forjado con dado cóncavo**, se *acumula* en un área localizada. Después se le da a la parte una forma aproximada (digamos, una biela) por medio de un proceso conocido como **aproximación o bloqueo**, utilizando *matrices de aproximación*. La operación final es el terminado del forjado en las *matrices de impresión*, que le proporcionan su forma final. Luego se elimina la rebaba mediante una operación de recortado de rebabas (fig. 14.8).

Fuerza de forjado. La *fuerza de forjado* (F) requerida para efectuar una operación de *forjado con matriz de impresión* se puede calcular a partir de la fórmula

$$F = k Y_f A \quad (14.2)$$

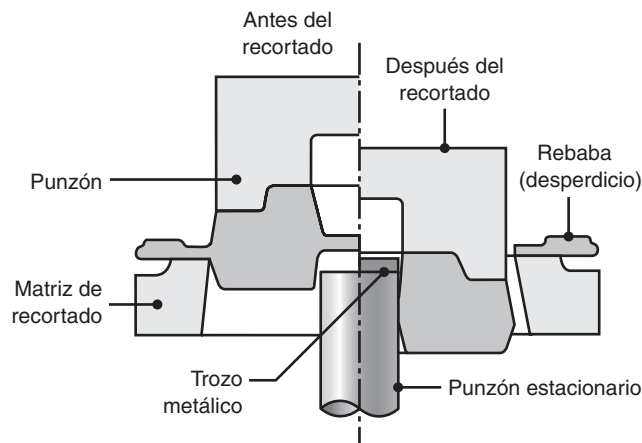


FIGURA 14.8 Recorte de rebaba de una parte forjada. Obsérvese que el material delgado en el centro se elimina mediante troquelado.

en la que k es un factor multiplicador que se obtiene de la tabla 14.2, Y_f el esfuerzo de flujo del material a la temperatura de forjado y A el área proyectada de la pieza forjada, incluyendo la rebaba. Por lo general, en las operaciones de forjado en caliente, la presión real del forjado para la mayoría de los metales va de 550 a 1000 MPa (80 a 140 ksi). Como ejemplo, supóngase que el esfuerzo de flujo plástico de un material a la temperatura de forjado es 100,000 psi y una parte (como la mostrada en la fig. 14.7a) tiene un área proyectada (con rebaba) de 60 pulg². Tomando un valor de $k = 10$ de la tabla 14.2, la fuerza de forjado sería $F = (10)(100,000)(60) = 60 \times 10^6 \text{ lb} = 30,000 \text{ toneladas cortas} = 26.8 \text{ toneladas}$.

Forjado en matriz cerrada. Al proceso mostrado en la figura 14.5 también se le conoce como *forjado en matriz cerrada*. Sin embargo, en éste no se forma rebaba (de ahí el término *forjado sin rebaba*) y la pieza de trabajo llena la cavidad de la matriz (ver el lado derecho de la fig. 14.9b). Por consiguiente, la presión de forjado es muy alta. Son fundamentales el control preciso del volumen de la pieza en bruto y el diseño adecuado de la matriz para producir un forjado con las tolerancias dimensionales deseadas. Las piezas en bruto subdimensionadas evitan el llenado de la cavidad de la matriz; por el contrario, las piezas sobredimensionadas generan presiones excesivas y pueden hacer que las matrices fallen de manera prematura o que la máquina se atasque.

Forjado de precisión. Con el fin de reducir el número de operaciones de acabado adicionales (formado de forma neta), y en consecuencia el costo, se tiende hacia una mayor precisión en los productos forjados. Algunos productos comunes obtenidos por forjado de precisión son los engranes, las bielas y los álabes para turbinas. Este forjado requiere (a) matrices especiales y más complejas, (b) control preciso del volumen y la forma de la pieza en bruto, y (c) posicionamiento exacto de dicha pieza en la cavidad de la matriz. Además, debido a las mayores fuerzas que se necesitan para obtener detalles finos en la parte, este proceso requiere equipo de más capacidad. Las aleaciones de aluminio y magnesio son adecuadas, en especial para el forjado de precisión, debido a las

TABLA 14.2

Intervalo de valores de k para la ecuación 14.2	
Formas simples, sin rebaba	3–5
Formas simples, con rebaba	5–8
Formas complejas, con rebaba	8–12

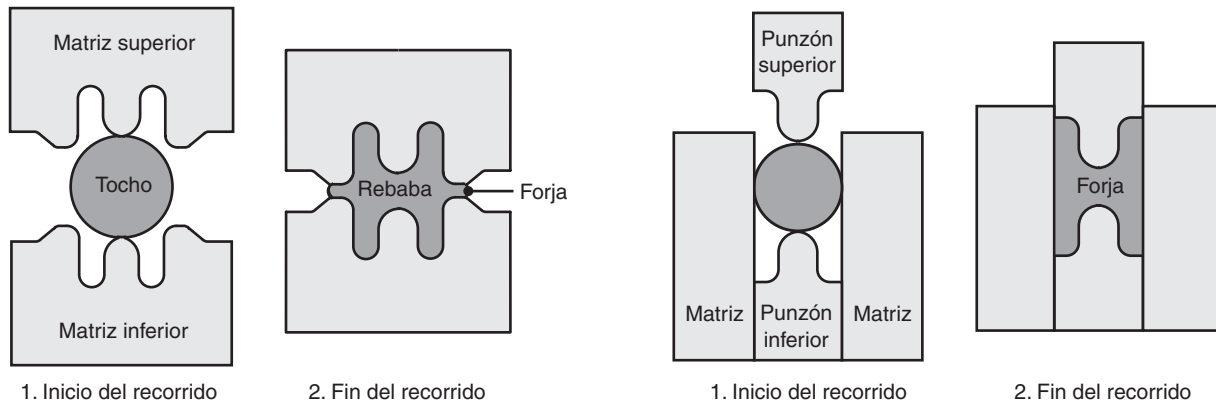


FIGURA 14.9 Comparación de (a) forjado en matriz cerrada con rebaba, y (b) forjado de precisión o sin rebaba de un tocho redondo. Fuente: H. Takemasu, V. Vázquez, B. Painter y T. Altan.

cargas y temperaturas de forjado relativamente bajas que exigen; también se pueden utilizar los aceros y el titanio en el forjado de precisión.

Operación característica de forjado y calidad de los productos. Por lo general, una operación de forjado comprende la siguiente secuencia de pasos:

1. Preparar una pieza de metal, tocho o preforma mediante procesos como cizallado (recorte), aserrado o tronzado. De ser necesario, limpiar las superficies por medios como la limpieza con chorro de granalla.
2. Para forjado en caliente, calentar la pieza de trabajo en un horno apropiado y después, de ser necesario, eliminar la cascarilla tras el calentamiento con un cepillo de alambre, chorro de agua, vapor o raspado. La cascarilla también se puede eliminar durante las etapas iniciales del forjado, ya que es quebradiza y se desprende durante la deformación.
3. Para forjado en caliente, precalentar y lubricar las matrices; para forjado en frío, lubricar la matriz.
4. Forjar el tocho en las matrices apropiadas y en la secuencia adecuada. De ser necesario, eliminar cualquier exceso de material (como las rebabas) por medio de recortado, maquinado o esmerilado.
5. Limpiar la forja, verificar sus dimensiones y (de ser necesario) maquinarla hasta obtener las dimensiones finales y las tolerancias especificadas.
6. Efectuar operaciones adicionales, como enderezado y tratamiento térmico (para mejorar las propiedades mecánicas). Además, realizar las operaciones de acabado que sean necesarias, como maquinado y rectificado.
7. Inspeccionar la forja en caso de cualquier defecto externo e interno.

La calidad, tolerancias dimensionales y acabado superficial de una forja dependen de cuán bien se efectúan y se controlan estas operaciones. Por lo general, las tolerancias se clasifican entre ± 0.5 y $\pm 1\%$ de las dimensiones de la forja. En una buena práctica, por lo general las tolerancias para forjado en caliente del acero son menores a ± 6 mm (1/4 pulgada); en el forjado de precisión, pueden ser hasta de ± 0.25 mm (0.01 pulgada). Otros factores que contribuyen a las imprecisiones dimensionales son los ángulos de salida, los radios, los filetes, el desgaste y cierre de las matrices (si cierran bien o no) y la asimetría de las mismas. El acabado superficial de la forja depende de la preparación de la pieza en bruto, el acabado superficial de la matriz, el desgaste de ésta y la eficacia del lubricante.

14.4 Diversas operaciones de forjado

Para proporcionar la forma y las características deseadas a los productos forjados, se realizan muchas otras operaciones relacionadas con el proceso básico de forjado.

Acuñado. Se trata de un proceso de forjado en matriz cerrada que por lo general se utiliza en el troquelado de monedas, medallas y joyería (fig. 14.10). La pieza en bruto o trozo de metal se acuña en la cavidad de una matriz completamente cerrada. Para producir detalles finos (por ejemplo, el detalle en monedas recién troqueladas), las presiones requeridas pueden ser tan elevadas como cinco o seis veces la resistencia del material. En algunas partes es posible que se requieran varias operaciones de acuñado. En éste no se pueden aplicar lubricantes, porque quedarían atrapados en las cavidades de la matriz y, al no poder comprimirse, evitarían la reproducción total de los detalles de la superficie de la matriz y el acabado superficial.

El **marcado** de partes con letras y números también se puede realizar con rapidez por medio de este proceso. El acuñado se utiliza asimismo con forjas y otros productos para mejorar el acabado superficial y proporcionar la precisión dimensional deseada con pocos o ningún cambio en el tamaño de la parte. Conocido como **dimensionado**, este proceso requiere presiones elevadas.

Cabeceado. También conocido como **forjado por recalado**, el *cabeceado* es básicamente una operación de recalado que por lo general se efectúa en el extremo de una barra redonda o alambre para aumentar la sección transversal. Los ejemplos típicos son los clavos, las cabezas de tornillos, los pernos, remaches y muchos otros sujetadores (fig. 14.11a). El cabeceado puede realizarse en frío, en caliente o a temperatura media. Una consideración importante en él es la tendencia de la barra a curvarse si su relación de longitud a diámetro sin soporte es demasiado elevada. Por lo general, esta relación se limita a menos de 3:1, pero con las matrices apropiadas puede ser más alta. Por ejemplo, se pueden tolerar relaciones más altas si el diámetro de la cavidad de la matriz no es mayor a 1.5 veces el diámetro de la barra.

Las operaciones de cabeceado se efectúan en máquinas conocidas como **cabeceadoras**, que suelen automatizarse en gran medida con velocidades de producción de cientos de piezas por minuto para partes pequeñas. Operaciones de cabeceado en caliente en piezas más grandes se realizan comúnmente en *recalcadores horizontales*. Estas máquinas tienden a ser ruidosas; se requiere una cubierta a prueba de ruido o el uso de protec-

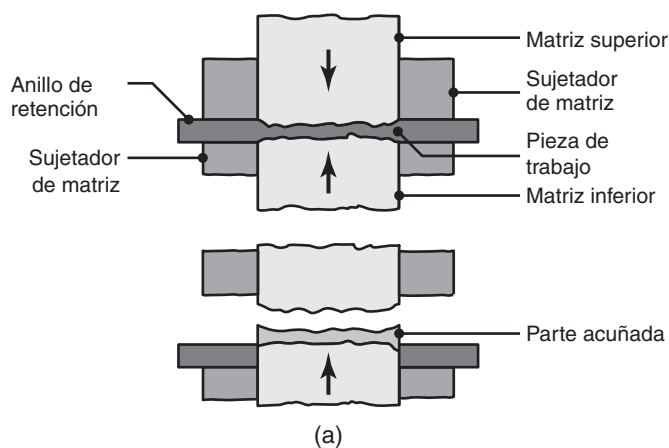


FIGURA 14.10 (a) Esquema del proceso de acuñado. Las monedas más antiguas se hacían por medio de forjado de matriz abierta y carecían de precisión y detalles de forma. (b) Ejemplo de operación moderna de acuñado que muestra la pieza de trabajo y las herramientas. Obsérvese el detalle y el acabado superficial superior que se puede obtener con este proceso. *Fuente:* Cortesía de C & W Steel Stamp Co., Inc.

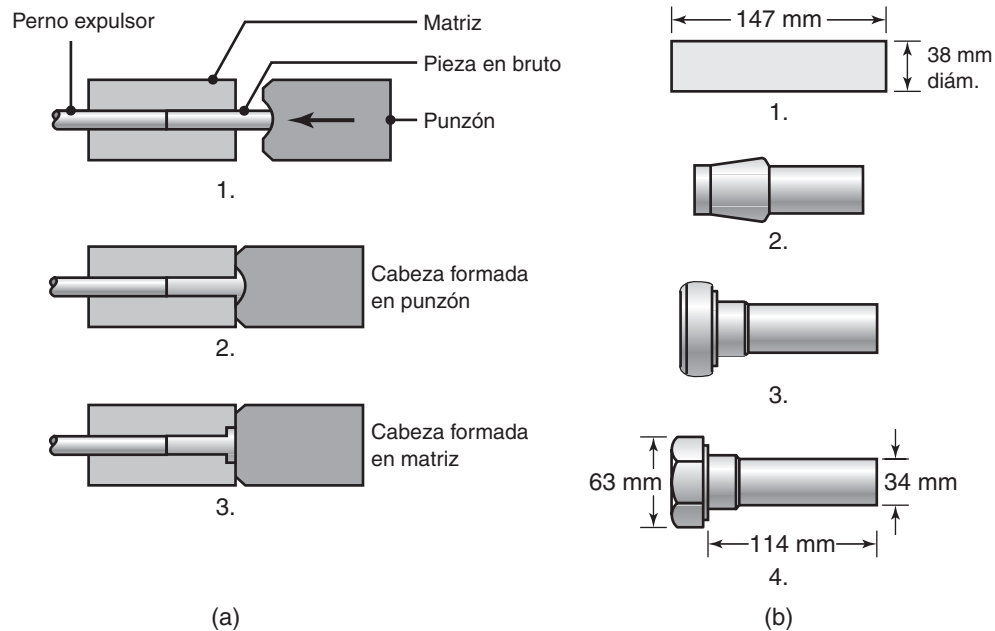


FIGURA 14.11 (a) Operación de cabeceado para formar cabezas en sujetadores, como clavos y remaches. (b) Secuencia de operaciones para producir la cabeza de un tornillo común por medio de cabeceado.

tores auditivos. Las operaciones de cabeceado se pueden combinar con procesos de extrusión en frío para fabricar varias partes, como se describe en la sección 15.4.

Penetrado. Este es un proceso de penetración de la superficie de una pieza de trabajo (aunque sin pasar a través de ella) con un punzón para producir una cavidad o una impresión (fig. 14.12). Dicha pieza se puede confinar en un contenedor (como la cavidad de una matriz) o dejar sin restricciones. Su deformación dependerá de cuánto se limita su flujo conforme descende el punzón. Ejemplos comunes de penetrado son el ahuecamiento y la cavidad hexagonal en las cabezas de los tornillos. Después del penetrado, puede seguir el troquelado para producir un orificio en la parte (para una descripción similar de esta situación, ver la *masa* arriba del punzón estacionario en la parte central de la fig. 14.8). El penetrado también se utiliza para producir regiones huecas en las forjas mediante equipo auxiliar de acción lateral.

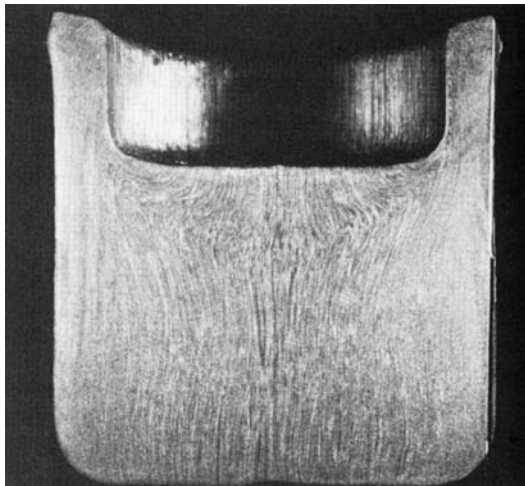


FIGURA 14.12 Tocho redondo penetrado que muestra el patrón de flujo de los granos (ver también fig. 14.2c). Fuente: Cortesía de Ladish Co., Inc.

La *fuerza de penetrado* depende de (a) el área de la sección transversal y la geometría de la punta del punzón, (b) la resistencia del material, y (c) la magnitud de la fricción en las interfaces de deslizamiento. La presión puede ser de tres a cinco veces la resistencia del material, que se encuentra casi al mismo nivel de esfuerzo requerido para efectuar una penetración en las pruebas de dureza.

ESTUDIO DE CASO 14.1

Manufactura de un perno escalonado mediante cabeceado y penetrado

La figura 14.13a muestra un perno escalonado hecho de acero SAE 1008 y utilizado como parte del ensamble de un rodillo para ajustar la posición del asiento de un automóvil. La parte es bastante compleja y debe producirse de manera progresiva a fin de reproducir los detalles requeridos y llenar la matriz. En la figura 14.13b se muestran los pasos de forjado en frío usados para fabricar esta parte. Primero, se extruye una pieza en bruto cilíndrica sólida, en dos operaciones, seguida de una operación de recalcado. Ésta emplea una sección transversal cónica en la matriz para producir la preforma y se orienta de manera que el material se concentre en la parte superior para asegurar el llenado apropiado de la matriz. Después del formado por matriz de impresión, se realiza una operación de penetrado a fin de formar el agujero. La parte se produce con forma neta en una máquina de formado en frío a una velocidad de 240 partes por minuto.

Punzonado de cavidades o clavado. Este proceso consiste en prensar un punzón endurecido con una geometría especial de la punta, dentro de la superficie de un bloque de metal. La cavidad producida se utiliza después como matriz para operaciones de formado, como las que se utilizan para artículos de mesa. Por lo general, la cavidad de la matriz es poco profunda; para cavidades más profundas se puede eliminar parte del material de la superficie mediante maquinado antes del clavado (ver fig. 23.3c). La *fuerza de clavado* se puede calcular a partir de la ecuación

$$\text{Fuerza de clavado} = 3(\text{UTS})(A) \quad (14.3)$$

en la que UTS se obtiene de la tabla 2.2 y A es el área proyectada de la impresión. Por ejemplo, para un acero de alta resistencia con $\text{UTS} = 1500 \text{ MPa}$ y una parte con un área proyectada de 400 mm^2 , la fuerza de clavado sería $(3)(1500 \text{ N/mm}^2)(400 \text{ mm}^2) = 1.8 \text{ MN} = 179 \text{ toneladas métricas}$.

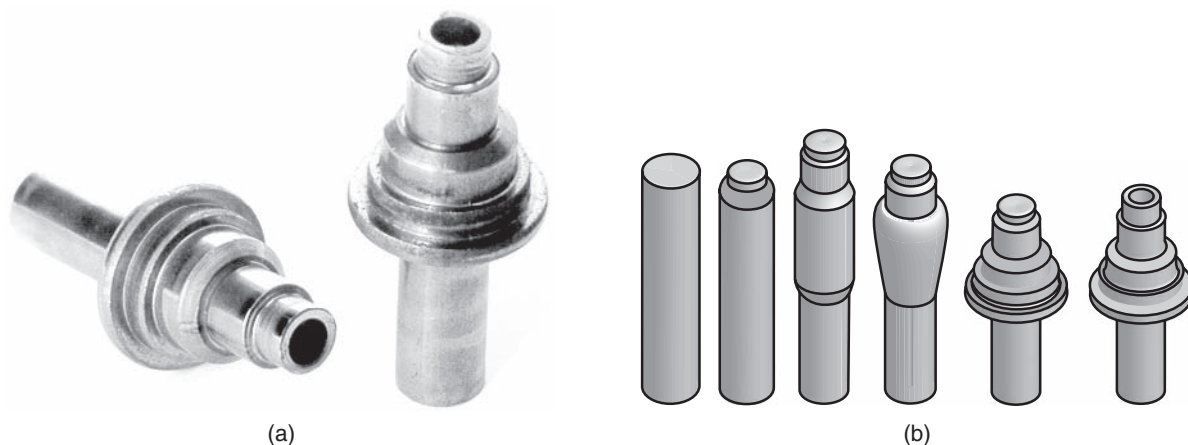


FIGURA 14.13 (a) Perno escalonado que se utilizó en el estudio de caso 14.1. (b) Ilustración de los pasos de manufactura empleados para producir el perno escalonado. *Fuente:* Cortesía de National Machinery, LLC.

Forjado orbital. Este es un proceso en el que la matriz superior se mueve a lo largo de una trayectoria orbital y da forma a la parte de manera *progresiva*. La operación es similar a la acción de la mano y del mortero utilizados para moler hierbas y semillas. Aunque no son de uso regular, los componentes comunes que se pueden forjar mediante este proceso son partes con forma de disco y cónicas, como engranes cónicos y piezas en bruto para engranes. La fuerza de forjado es relativamente menor debido a que en cualquier instante específico el contacto de la matriz se concentra en una pequeña área de la pieza de trabajo (ver también *forjado progresivo* a continuación). La operación es silenciosa y las partes se pueden formar en 10 a 20 ciclos de la matriz orbital.

Forjado progresivo. En este proceso, se forja una pieza en bruto dándole forma con una herramienta que la trabaja en varios pasos pequeños. Obsérvese que esta operación es similar a la forja de desbaste (ver fig. 14.4), en la que la matriz penetra la pieza en bruto a diferentes profundidades a lo largo de la superficie. Debido a que el área de contacto de la matriz es más pequeña, este proceso requiere fuerzas mucho menores en comparación con el forjado convencional por matriz de impresión y las herramientas son más simples y menos costosas.

Forjado isotérmico. También se conoce como *forjado por matriz en caliente*. Las matrices en este proceso se calientan a la misma temperatura que la de la pieza de trabajo caliente. Como permanece caliente, durante el forjado se mantienen la resistencia baja y la alta ductilidad de la pieza de trabajo. Además, la carga de forjado es baja y se mejora el flujo del material dentro de la cavidad de la matriz. Se pueden forjar isotérmicamente partes complejas, con buena precisión dimensional para una forma casi neta con un golpe en una prensa hidráulica. Por lo general, las matrices para forjado en caliente de aleaciones de alta temperatura están hechas de aleaciones de níquel y molibdeno (debido a su resistencia a altas temperaturas), aunque para las aleaciones de aluminio se pueden utilizar matrices de acero. El forjado isotérmico es costoso y la velocidad de producción es baja. Sin embargo, puede ser económico para forjas intrincadas especiales, fabricadas con materiales como el aluminio, titanio y superaleaciones, siempre que la cantidad requerida sea suficientemente grande para justificar los costos de las matrices.

Forjado rotatorio. En este proceso (también conocido como *forjado radial*, *forjado rotatorio* o simplemente *estampado*), una barra sólida o tubo se somete a fuerzas de impacto radial por medio de una serie de matrices reciprocantes de la máquina (fig. 14.14a y b). Los movimientos de las matrices se obtienen mediante una serie de rodillos en una jaula, por medio de una acción similar a la de un rodamiento de rodillos. La pieza de trabajo se mantiene estacionaria y las matrices giran (mientras se mueven radialmente en sus ranuras), golpeando la pieza a velocidades tan altas como 20 golpes por segundo. En las *máquinas de estampado con matrices de cierre*, los movimientos de las matrices se obtienen mediante el movimiento alternativo de cuñas (fig. 14.14c). Las matrices se pueden abrir más que las de las forjadoras rotatorias, soportando así partes de diámetro grande o variable. En otro tipo de máquina, las matrices no giran, sino que se mueven radialmente adentro y afuera. Los productos comunes fabricados por este método son las hojas de los desarmadores y las puntas de hierro para soldadoras.

El proceso de forjado rotatorio también se puede utilizar para *ensamblar* accesorios en cables y alambres; en dichos casos, el accesorio tubular se stampa directamente en el cable. Este proceso se usa asimismo para operaciones como *punteado* (ahusado de la punta de una parte cilíndrica) y *dimensionado* (terminación de las dimensiones de una parte).

Por lo general, el forjado rotatorio se limita a un diámetro máximo de la pieza de trabajo de 150 mm (6 pulgadas); se han estampado pequeñas partes hasta de 0.5 mm (0.02 pulgada). Las tolerancias dimensionales van de ± 0.05 a ± 0.5 mm (0.002 a 0.02 pulgada). El proceso es adecuado para velocidades medias a altas de producción, en las que son posibles velocidades hasta de 50 partes por minuto, dependiendo de la complejidad de la parte. Es un proceso versátil y su longitud sólo se limita por la longitud de la barra que soporta el mandril (si se requiere alguno).

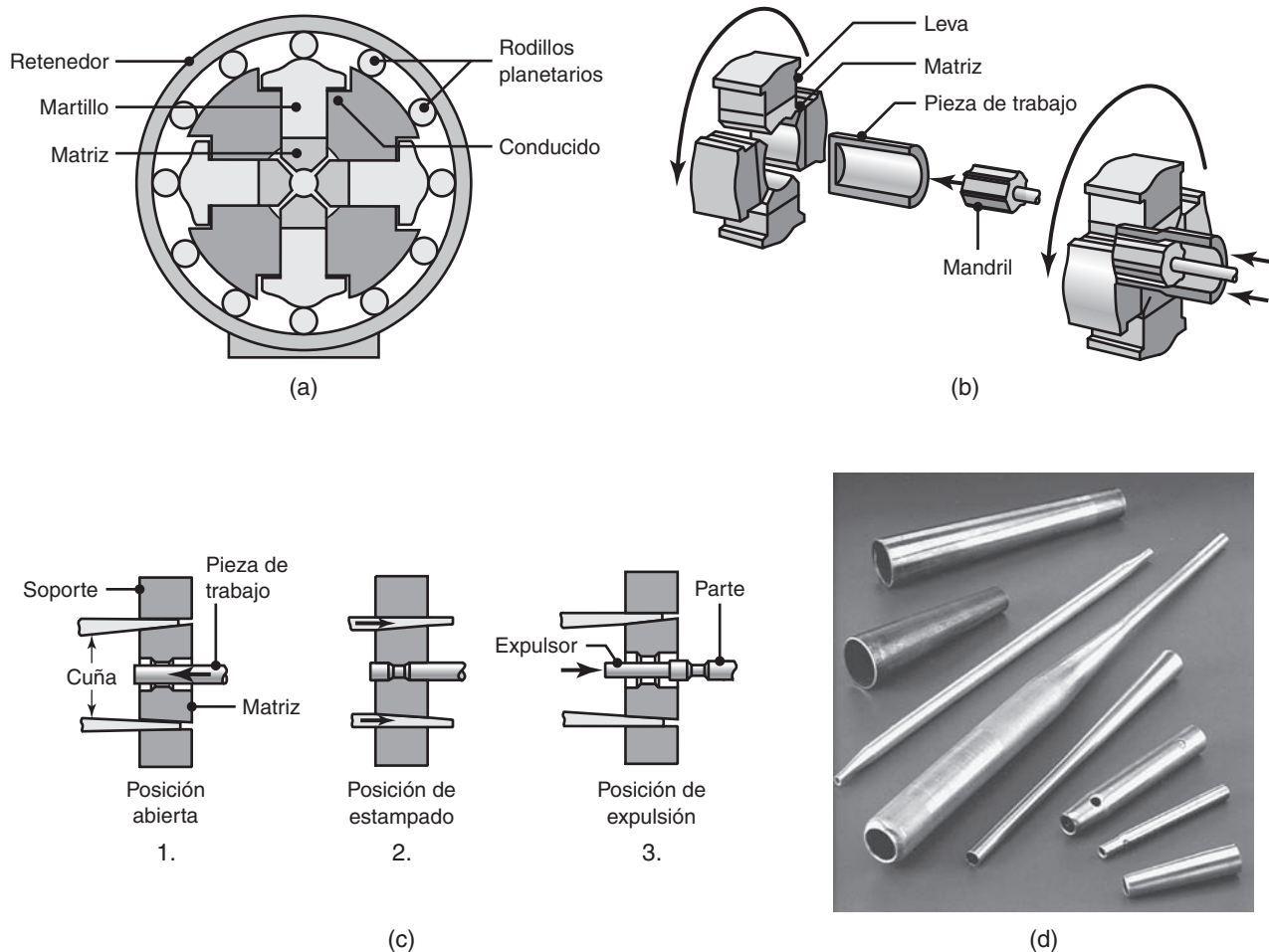


FIGURA 14.14 (a) Esquema del proceso del forjado rotatorio. (b) Formación de perfiles internos en una pieza de trabajo tubular por medio de forjado rotatorio. (c) Máquina de forjado rotatorio con matriz de cierre que muestra el formado de un eje escalonado. (d) Partes comunes producidas mediante forjado rotatorio. Fuente: (d) Cortesía de J. Richard Industries.

Extrusión de tubos. En este proceso se reduce el diámetro interno y/o espesor del tubo con el uso de *mandriles internos* o sin él (fig. 14.15a y b). Para la tubería de diámetro pequeño se puede utilizar alambre de alta resistencia como mandril. Los mandriles también pueden fabricarse con estrías longitudinales que permiten la extrusión de tubos con forma interior (fig. 14.15c). Por ejemplo, el estriado en los cañones de las armas (estrías internas en espiral que proporcionan el efecto giroscópico a las balas) se puede producir si se estampa un tubo sobre un mandril con estrías en espiral. Se ha construido maquinaria especial para estampar cañones de armas y otras partes con diámetros iniciales grandes, hasta de 350 mm (14 pulgadas).

14.5 Forjabilidad de los metales. Defectos del forjado

Por lo general, la *forjabilidad* se define como la capacidad de un material para someterse a deformación sin agrietarse. Se han desarrollado varias pruebas para cuantificar la forjabilidad; sin embargo, debido a su naturaleza compleja, sólo dos pruebas simples han tenido aceptación general: el recalcado y la torsión en caliente.

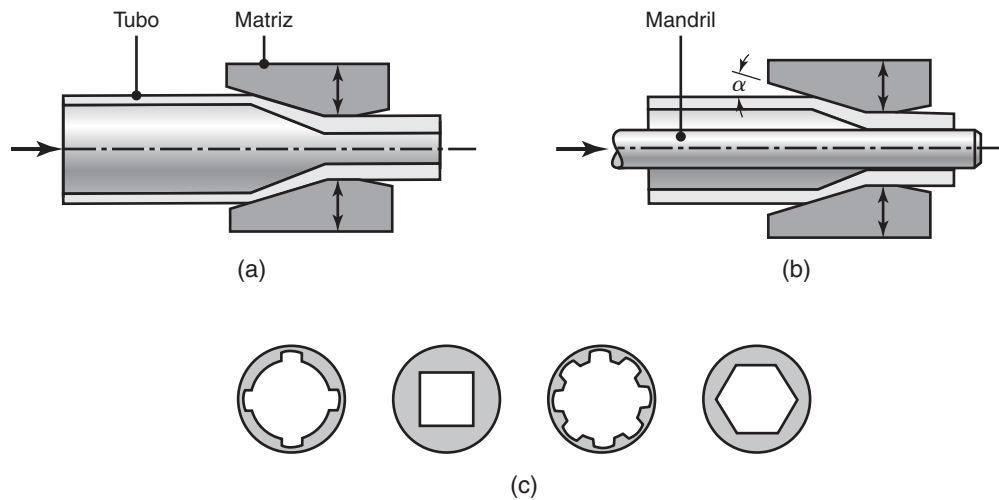


FIGURA 14.15 (a) Forjado rotatorio de tubos sin un mandril; obsérvese el aumento del espesor de la pared en la separación de la matriz. (b) Forjado rotatorio con mandril; nótese que el espesor final de la pared del tubo depende del diámetro del mandril. (c) Ejemplos de las secciones transversales producidas por el forjado rotatorio en mandriles con forma. El estriado (estrías internas en espiral) en los cañones de las armas se puede producir mediante este proceso.

En la **prueba de recalado**, se recalca un espécimen cilíndrico sólido entre matrices planas y se observa la reducción de la altura a la que empieza el agrietamiento en las superficies abarilladas (ver también fig. 2.19d). Cuanto más grande sea la deformación antes del agrietamiento, más grande será la forjabilidad del metal. El segundo método es el **ensayo de torsión en caliente**, en el que un espécimen redondo se tuerce de manera continua en la misma dirección hasta que se rompe. Esta prueba se efectúa en cierta cantidad de especímenes a diferentes temperaturas y se grafica la cantidad de vueltas totales a las que se somete cada espécimen antes de romperse a cada temperatura. Así, la temperatura a la que ocurre la máxima cantidad de vueltas se convierte en la temperatura de forjado para la forjabilidad máxima. Se ha descubierto que el ensayo de torsión en caliente es útil, en especial para aceros.

En la tabla 14.3 se da la forjabilidad de diversos metales y aleaciones, en orden decreciente. Se basan en consideraciones como ductilidad y resistencia del material, temperatura requerida para el forjado, comportamiento de fricción y calidad de las forjas producidas. Estos valores se deben considerar sólo como guías generales. En la tabla 14.3 se incluyen los intervalos característicos de la *temperatura de forjado en caliente* para varios metales y aleaciones. Obsérvese que la temperatura de forjado más alta no necesariamente indica mayor dificultad en el forjado del material. Para forjado a *temperatura media*, las temperaturas van de 200 °C a 300 °C (400 °F a 600 °F) para aleaciones de aluminio y de 550 °C a 750 °C (1000 °F a 1400 °F) para aceros.

Defectos del forjado. Además del agrietamiento de la superficie durante el forjado, también se pueden desarrollar otros defectos debido al patrón de flujo del material en la matriz, como se describe en la sección 14.6 respecto del diseño de matrices. Por ejemplo, si no existe suficiente volumen de material para llenar la cavidad de la matriz, el alma se puede torcer durante el forjado y desarrollar pliegues (fig. 14.16a). Por otro lado, si el alma es demasiado gruesa, el exceso de material fluye nuevamente sobre las partes ya formadas de la forja y desarrolla grietas internas (fig. 14.16b).

TABLA 14.3

Clasificación de metales en orden decreciente de forjabilidad	
Metal o aleación	Intervalo aproximado de temperaturas para forjado en caliente (°C)
Aleaciones de aluminio	400–550
Aleaciones de magnesio	250–350
Aleaciones de cobre	600–900
Aceros al carbono y de baja aleación	850–1150
Aceros inoxidables martensíticos	1100–1250
Aceros inoxidables austeníticos	1100–1250
Aleaciones de titanio	700–950
Superalaciones de base hierro	1050–1180
Superalaciones de base cobalto	1180–1250
Aleaciones de tantalio	1050–1350
Aleaciones de molibdeno	1150–1350
Superalaciones de base níquel	1050–1200
Aleaciones de tungsteno	1200–1300

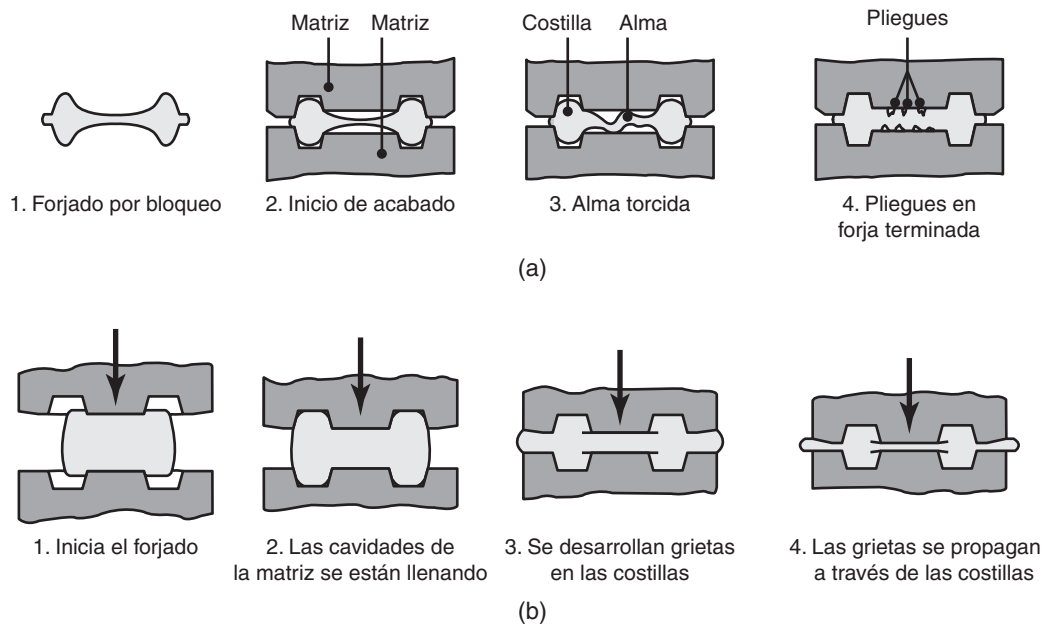


FIGURA 14.16 Ejemplos de defectos en partes forjadas. (a) Pliegues formados por el pandeo del alma durante el forjado; se debe aumentar el espesor del alma para evitar este problema. (b) Defectos internos producidos por un tocho sobredimensionado. Las cavidades de la matriz se llenan de manera prematura y el material en el centro fluye más allá de las regiones ya llenas cuando se cierran las matrices.

Los diversos radios en la cavidad de la matriz de forjado pueden influir de manera significativa en la formación de dichos defectos. Los defectos internos también se pueden desarrollar por (a) deformación no uniforme del material en la cavidad de la matriz, (b) los gradientes de temperatura a lo largo de la pieza de trabajo durante el forjado y (c) los cambios microestructurales a causa de las transformaciones de las fases. También es importante el patrón de flujo de los granos del material en el forjado. Las líneas de flujo pueden alcanzar una superficie en forma perpendicular, como se muestra en la figura

14.12. Esta condición, conocida como **granos de orilla**, expone los límites de los granos directamente al ambiente, que los puede atacar desarrollando una superficie rugosa, actuando además como elevadores de esfuerzos.

Los defectos de forjado pueden causar fallas por fatiga y otros problemas como la corrosión y el desgaste durante la vida útil del componente forjado. Es obvia la importancia de inspeccionar las forjas antes de ponerlas en servicio, sobre todo en aplicaciones críticas, como en el caso de los aviones. En el capítulo 36 se describen las técnicas de inspección para partes manufacturadas.

14.6 Diseño de matrices, materiales para matrices y lubricación

El diseño de las matrices de forjado requiere bastante conocimiento y experiencia respecto de la forma y complejidad de la pieza de trabajo, su ductilidad, resistencia y sensibilidad a la velocidad de deformación y temperatura, además de sus características de fricción. La distorsión de la matriz bajo cargas elevadas de forjado también debe considerarse en el diseño, en particular si se requieren tolerancias dimensionales cerradas. La regla más importante en el diseño de matrices es que la parte fluye hacia donde hay menor resistencia. Por ello, deben planearse las *formas intermedias* de la pieza de trabajo de manera que llenen adecuadamente las cavidades de la matriz. En la figura 14.6a se muestra un ejemplo de formas intermedias para una biela.

Con los constantes avances en el desarrollo de simulaciones confiables de todo tipo de operaciones de trabajo de los metales, se cuenta con paquetes de aplicación (software) para ayudar a predecir el flujo del material en las cavidades de las matrices de forjado en diversas condiciones, como temperatura y transferencia de calor, condiciones de fricción en las superficies de contacto entre la matriz y la pieza de trabajo y velocidad de forjado. Dichos paquetes de aplicación pueden ser muy útiles en el diseño de matrices y en la eliminación de futuros problemas con forjas defectuosas (ver sección 38.7).

Preformado. En una pieza de trabajo preformada de manera correcta, el material no debe fluir con facilidad hacia la rebaba (ya que de otro modo la matriz se llenaría de forma incompleta); el patrón del flujo de los granos debe ser favorable para la resistencia y confiabilidad de los productos y se debe minimizar el deslizamiento excesivo en las interfaces de la pieza de trabajo y la matriz, con el fin de reducir el desgaste de esta última. La selección de las preformas requiere bastante experiencia y comprende cálculos de áreas de secciones transversales en cada lugar de la forja. Las técnicas computarizadas de modelado y simulación son muy útiles en dichos cálculos.

Características de diseño de las matrices. En la figura 14.5d se muestra la terminología de las matrices para forjado y a continuación se describe la importancia de diversas características. Algunas de estas consideraciones son similares a las de la fundición (sección 12.2). Para la mayoría de las forjas, la línea de partición se encuentra en la sección transversal más grande de la parte. Por lo general, en el caso de formas simétricas simples, la línea de partición es una línea recta en el centro de la forja, aunque para formas más complejas quizá no quede en un solo plano. Por lo tanto, las matrices se diseñan de manera que se cierran durante el acoplamiento, para evitar el empuje lateral y las fuerzas de compensación y mantener la alineación de la matriz durante el forjado.

Después de restringir el flujo lateral lo suficiente para garantizar un llenado correcto de la matriz, se permite que el material de la rebaba fluya a un *canal*, de modo que la rebaba adicional no aumente innecesariamente la carga de forjado. Como guía general, la holgura de la rebaba entre las matrices debe ser 3% del espesor máximo de la forja. La longitud del *descanso* suele ser de dos a cinco veces el espesor de la rebaba.

Los **ángulos de salida** son necesarios en casi todas las matrices de forjado para facilitar la extracción de la parte de la matriz. Al enfriarse, la forja se contrae radial y longi-

tudinalmente, de modo que se forman ángulos de salida internos mayores a los externos. Los ángulos internos son de 7° a 10° , en tanto que los externos son de entre 3° y 5° .

La selección de los radios adecuados para esquinas y filetes es importante a fin de garantizar un flujo suave del metal en la cavidad de la matriz y mejorar la vida de esta última. Por lo general, no son deseables los radios pequeños debido a su efecto adverso en el flujo del metal y su tendencia a desgastarse con rapidez (como resultado de una concentración de esfuerzos y ciclos térmicos). Los radios de filetes pequeños también pueden causar agrietamiento por fatiga de las matrices. Por regla general, estos radios deben ser tan grandes como lo permita el diseño de la pieza forjada. Como sucede con los modelos utilizados en la fundición, en el diseño de las matrices de forjado se proveen *tolerancias*, porque quizá sea necesario el maquinado de la forja para obtener las dimensiones finales y el acabado superficial deseado. Se debe proveer una tolerancia para el maquinado en bridas, orificios y superficies coincidentes.

Materiales para matrices. La mayoría de las operaciones de forjado (en especial para partes grandes) se efectúa a temperaturas elevadas. De este modo, los requisitos generales de los materiales para matrices son:

- Resistencia y tenacidad a temperaturas elevadas.
- Templabilidad y capacidad de endurecimiento uniforme.
- Resistencia al impacto mecánico y térmico.
- Resistencia al desgaste (en particular al abrasivo) debido a la presencia de cascari-lla en el forjado en caliente.

Los materiales comunes para matrices son los aceros para herramientas y matrices que contienen cromo, níquel, molibdeno y vanadio (ver las tablas 5.5 y 5.6). Las matrices se producen de bloques de material, que a su vez se forjan a partir de fundiciones y después se maquinan y terminan con la forma y el acabado superficial deseados. En la sección 14.7 se describen los métodos de manufactura de las matrices.

Lubricación. En el forjado se puede utilizar una gran variedad de fluidos para trabajo de los metales, como se describe en la sección 33.7. Los lubricantes influyen en gran medida en la fricción y el desgaste. Por consiguiente, afectan las fuerzas requeridas (ver ecuación 14.1) y la manera en la que el material fluye en las cavidades de las matrices. También pueden actuar como barrera térmica entre la pieza de trabajo caliente y las matrices relativamente frías, lo que reduce la velocidad de enfriamiento de dicha pieza y mejora el flujo del metal. Otro papel importante del lubricante es actuar como *agente separador*, que evita que la pieza forjada se adhiera a las matrices y ayuda a extraerla de la matriz.

14.7 Métodos de manufactura de matrices.

Fallas en las matrices

Con base en los temas descritos hasta ahora, es evidente que la calidad y la vida útil de las matrices son aspectos muy significativos de la operación total de la manufactura, incluyendo la calidad de las partes producidas. En particular, vale la pena resaltar esto dado que la vasta mayoría de las partes discretas que se producen en grandes cantidades (como engranes, ejes, tornillos y diversos componentes de maquinaria y equipo de transporte y agrícola), así como las fundiciones de todo tipo de productos, se hacen en matrices y moldes individuales. Las matrices también afectan la economía general de la manufactura debido a su costo y al tiempo de entrega necesario para producirlas, ya que varias requieren meses para su manufactura. Factores igualmente importantes son el mantenimiento de las matrices y sus modificaciones cuando las partes se producen por primera vez.

Se pueden utilizar varios métodos de manufactura, individualmente o en conjunto, para fabricar matrices de forjado y para otros procesos de trabajo de los metales. Estos procesos incluyen (a) fundición, (b) forjado, (c) maquinado, (d) rectificado, (e) métodos eléc-

tricos y electroquímicos (en particular maquinado por descarga eléctrica [EDM] o electroerosión, con electrodo, y de alambre), y (*f*) rayos láser para matrices pequeñas. Un desarrollo importante y continuo es la producción de herramientas y matrices por medio de **producción rápida de herramientales** mediante técnicas de elaboración rápida de prototipos, como se describe en la sección 20.5.

El proceso de producción de la cavidad de una matriz en un **bloque de material** se conoce como **estampado de matrices**. El proceso de *punzonado de cavidades o clavado* (sección 14.4), ya sea en frío o en caliente, también puede utilizarse para hacer matrices pequeñas con cavidades poco profundas. Por lo general, a las matrices se les da tratamiento térmico para obtener una mayor dureza y resistencia al desgaste (capítulo 31). De ser necesario, el perfil de su superficie y el acabado se mejoran más por medio de rectificado y pulido de acabado, ya sea manualmente o con robots industriales programables.

La elección de un método de manufactura de matrices depende de su tamaño y forma, así como de la operación específica en la que se van a utilizar, como fundición, forjado, extrusión, metalurgia de polvos o moldeo de plásticos. Como en todas las operaciones de manufactura, con frecuencia el costo rige el proceso seleccionado debido a que los costos de los herramientales y las matrices pueden ser significativos. Se pueden **fundir** matrices de varios tamaños y formas a partir de aceros, hierros fundidos y aleaciones no ferrosas. Los procesos utilizados para prepararlas pueden ser desde fundición en arena (para matrices grandes que pesan varias toneladas) hasta moldeo en cáscara (para fundición de matrices pequeñas). Por lo general, se prefieren los aceros fundidos para matrices grandes debido a su resistencia y tenacidad, así como por la facilidad con que se puede controlar y modificar la composición del acero, el tamaño de los granos y las propiedades.

Es más común que las matrices se *maquinen* a partir de *bloques forjados* por medio de procesos como el fresado, torneado, rectificado y maquinado por descarga eléctrica y electroquímico. En la figura I.14b se muestra dicha operación para fabricar moldes para armazones de lentes. En el caso de los materiales para matrices de alta resistencia y resistentes al desgaste, que son duros o a los que se da tratamiento térmico (por lo que son difíciles de maquinar), procesos como el maquinado duro (sección 25.6) y el maquinado eléctrico y electroquímico son una práctica común. En general, una matriz se maquina por medio de fresado en máquinas herramienta controladas por computadora con diversos paquetes de aplicación o software (ver fig. 24.2), que tienen la capacidad (en términos de economía) de optimizar la trayectoria de las herramientas de corte. Por lo tanto, es posible obtener el mejor acabado superficial en el menor tiempo de maquinado. De igual importancia es el montaje para el maquinado, porque las matrices deben maquinarse en un solo montaje sin tener que retirarlas de sus accesorios y reorientarlas para operaciones posteriores de maquinado.

Por lo general, después de utilizar el tratamiento térmico para obtener las propiedades mecánicas deseadas, las matrices se someten a *operaciones de acabado* (sección 26.7), como rectificado, pulido y procesos químicos y eléctricos, a fin de obtener el acabado superficial y la precisión dimensional deseados. Esto también incluye *tratamientos superficiales con rayo láser y recubrimientos* (capítulo 34) para mejorar la vida de la matriz. El láser se utiliza asimismo con el propósito de reparar matrices y reconfigurar las regiones desgastadas de las mismas (ver también fig. 33.11).

Costos de las matrices. De acuerdo con lo descrito, es evidente que el costo de una matriz dependerá en gran medida de su tamaño, complejidad de forma, aplicación y acabado superficial requeridos, así como de su material y manufactura, su tratamiento térmico y los métodos utilizados en el acabado. Por ello, no es fácil clasificar los costos específicos de las matrices. A lo largo de este libro se proporcionan algunos intervalos cualitativos de los costos de herramientales y matrices, como se hace en la tabla 12.6. Incluso la fabricación de matrices pequeñas y relativamente simples puede costar cientos de dólares, en tanto que el costo de un conjunto de matrices para piezas de carrocerías automotrices puede ser hasta de 2 millones de dólares. Por otro lado, ya que suele fabricarse una gran cantidad de partes con un conjunto de matrices, el *costo de la matriz por pieza fabricada* es generalmente una par-

te pequeña del costo de manufactura de una parte (ver también la sección 40.11). El tiempo de entrega requerido para producir matrices también puede afectar significativamente el costo general de manufactura, en particular en un mercado global y competitivo.

Fallas en las matrices. Por lo general, las fallas de las matrices en las operaciones de manufactura se deben a una o más de las siguientes causas:

- Diseño inadecuado de la matriz.
- Selección defectuosa o inapropiada del material de la matriz.
- Manufactura y operaciones inadecuadas de tratamiento térmico y acabado.
- Sobrecalentamiento y agrietamiento por calor (es decir, agrietamiento provocado por los ciclos de la temperatura).
- Desgaste excesivo.
- Sobrecarga (es decir, fuerza excesiva sobre la matriz).
- Alineación inapropiada de los componentes de la matriz con respecto a sus movimientos.
- Mal uso.
- Manejo inapropiado de la matriz.

Aunque estos factores se aplican generalmente a matrices fabricadas con aceros para herramientas y matrices, muchos también se aplican a otros materiales para matrices, como carburos, cerámicas y diamante.

El diseño apropiado de las matrices es tan importante como la selección adecuada de los materiales que las conforman. Para resistir las fuerzas correspondientes, una matriz debe tener secciones transversales y holguras suficientemente grandes (a fin de evitar atascamientos). Los cambios abruptos de sección transversal, las esquinas, radios y filetes filosos y el acabado superficial grueso (incluyendo marcas de rectificado y su orientación en las superficies de las matrices), actúan como elevadores de esfuerzos y, por lo tanto, pueden dañar la vida de la matriz. Para obtener una mejor resistencia y reducir la tendencia al agrietamiento, las matrices se pueden fabricar en segmentos y ensamblar como una matriz completa con anillos que las pretensan. Es esencial el manejo, la instalación, el ensamble y la alineación adecuados de las matrices. La sobrecarga de los herramientas y matrices puede producir fallas prematuras. Una causa común de falla en los dados de extrusión en frío es que el operador (o un robot programable) no extraiga del dado una pieza ya formada antes de cargarla con otra pieza en bruto.

14.8 Máquinas para forjado

Existe una variedad de máquinas para forjado con una gama de características de capacidad (fuerza en toneladas), velocidades y velocidad-carreras (tabla 14.4).

TABLA 14.4

Intervalos característicos de velocidades del equipo de forjado	
Equipo	m/s
Prensa hidráulica	0.06–0.30
Prensa mecánica	0.06–1.5
Prensa de tornillo	0.6–1.2
Martinete de caída por gravedad	3.6–4.8
Martinete de caída mecánica	3.0–9.0
Contramartillo	4.5–9.0

Prensas hidráulicas. Estas prensas funcionan a velocidades constantes y son *de carga limitada o restringida*. En otras palabras, una prensa se detiene si la carga requerida excede su capacidad. Se pueden transmitir grandes cantidades de energía a una pieza de trabajo por medio de una carga constante a través de un recorrido, cuya velocidad se puede controlar. Puesto que el forjado en una prensa hidráulica es más tardado que en otros tipos de máquinas de forjado descritos, la pieza de trabajo se puede enfriar con rapidez a menos que se calienten las matrices (ver *forjado isotérmico*, sección 14.4). En comparación con las prensas mecánicas, las prensas hidráulicas son más lentas y tienen costos iniciales más altos, pero requieren menor mantenimiento.

Por lo general, una prensa hidráulica consiste en un bastidor marco de forja con dos o cuatro columnas, pistones, cilindros (fig. 14.17a), arietes y bombas hidráulicas accionadas por motores eléctricos. Se puede variar la velocidad del ariete durante el recorrido. Las capacidades de prensado van de 125 MN (14,000 toneladas cortas) para forjado de matriz abierta, hasta 450 MN (50,000 toneladas cortas) en América del Norte, 640 MN (72,000 toneladas cortas) en Francia y 730 MN (82,000 toneladas cortas) en Rusia para forjado en matriz cerrada. La viga principal de soporte del tren de aterrizaje del avión Boeing 747 se forja en una prensa hidráulica de 450 MN (50,000 toneladas cortas), que se muestra en la figura 14.1c (con la pieza en la parte frontal). Esta parte está fabricada con una aleación de titanio y pesa casi 1350 kg (3000 libras).

Prensas mecánicas. Estas prensas son básicamente de tipo manivela o excéntrica (fig. 14.17b). La velocidad varía desde un máximo en el centro del recorrido, hasta cero en su parte inferior, por lo que son *de recorrido o carrera limitada*. La energía en una prensa mecánica se genera con un gran volantín accionado por un motor eléctrico. Un embrague acopla el volantín en un eje excéntrico. Una biela traduce el movimiento giratorio en movimiento lineal alternativo. En la figura 14.17c se muestra una prensa mecánica de *junta articulada*. Debido al diseño de la unión, se pueden aplicar fuerzas muy altas en este tipo de prensa (ver también fig. 11.18).

La fuerza disponible en una prensa mecánica depende de la posición del recorrido y se vuelve extremadamente alta en la parte inferior del centro “muerto”. Por lo tanto, una instalación adecuada es fundamental para evitar que se rompan las matrices o los componentes del equipo. Las prensas mecánicas tienen altas velocidades de producción, son más fáciles de automatizar y requieren menos habilidades del operador que otros tipos de máquinas. Las capacidades de la prensa van de 2.7 a 107 MN (300 a 12,000 toneladas cortas). Las prensas mecánicas son preferibles para el forjado de partes de alta precisión.

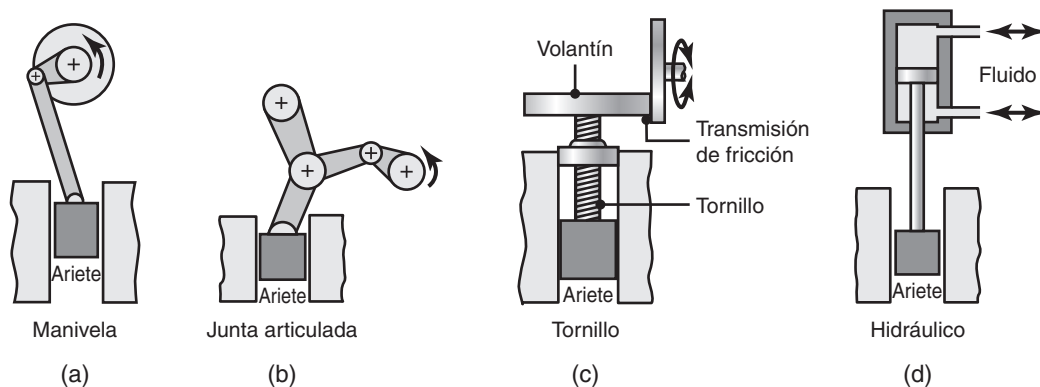


FIGURA 14.17 Esquema de los principios de diversas máquinas de forjado. (a) Prensa mecánica con accionamiento excéntrico; la flecha excéntrica se puede reemplazar con un cigüeñal para dar movimiento al ariete arriba y abajo. (b) Prensa de junta articulada. (c) Prensa de tornillo. (d) Prensa hidráulica.

Prensas de tornillo. Estas prensas (fig. 14.17d) obtienen su energía de un volantín, por lo que son de *energía limitada*. La carga de forjado se transmite a través de un tornillo vertical grande y el ariete se para cuando se disipa la energía del volantín. Si las matrices no cierran al final del ciclo, la operación se repite hasta que se complete el forjado. Las prensas de tornillo se utilizan para varias operaciones de matriz abierta y matriz cerrada. En particular, son adecuadas para pequeñas cantidades de producción, sobre todo partes delgadas con alta precisión, como los álabes de las turbinas. Las capacidades de las prensas van de 1.4 a 280 MN (160 a 31,500 toneladas cortas).

Martillos. Los martillos obtienen su energía de la energía potencial del ariete, que se convierte en energía cinética, por lo que son de *energía limitada*. A diferencia de las prensas hidráulicas, los martillos (como se infiere de su nombre) operan a altas velocidades y el tiempo reducido de formado minimiza el enfriamiento de una forja en caliente. De esta manera, las bajas velocidades de enfriamiento permiten el forjado de formas complejas, en especial aquéllas con cavidades delgadas y profundas. Por lo general, para completar el forjado se realizan varios impactos sucesivos sobre la misma matriz. Hay martillos disponibles en una variedad de diseños y son el tipo más versátil y menos costoso de equipo de forjado.

Martinetes. En los *martinetes mecánicos*, el recorrido del ariete hacia abajo se acelera con presión de vapor, aire o hidráulica hasta casi 750 kPa (100 psi). Los pesos de los arietes van de 225 a 22,500 kg (500 a 50,000 libras) con capacidades de energía que van hasta 1150 kJ (850,000 pies-libras). En la operación de los *martinetes por gravedad* (proceso conocido como **forjado de caída libre**), la energía se obtiene del ariete en caída libre (energía potencial). La energía disponible en un martinete es el producto del peso del ariete por la altura de su caída. Los pesos del ariete van de 180 a 4500 kg (400 a 10,000 libras) con capacidades de energía que van hasta 120 kJ (90,000 pies-libras).

Contramartillos. Este martillo tiene dos arietes que se acercan al mismo uno al otro, horizontal o verticalmente, a fin de forjar la parte. Como en las operaciones de forjado de matriz abierta, la parte se puede girar entre impactos para formar la pieza de trabajo de manera adecuada durante el forjado. Los contramartillos operan a altas velocidades y transmiten menos vibración a sus bases. Las capacidades van hasta 1200 kJ (900,000 pies-libras).

Máquinas de forjado de alto índice de energía (HERF). En este tipo de máquina, el ariete se acelera rápidamente por medio de gas inerte a alta presión y la parte se forja en un impacto a una gran velocidad. A pesar de que existen diversos tipos de estas máquinas, varios problemas asociados con su operación, mantenimiento, ruptura de las matrices y consideraciones de seguridad han limitado en gran medida su uso en la industria.

14.9 | Economía del forjado

El costo del forjado implica diversos factores. Según la complejidad del forjado, los costos de herramientas y matrices van de moderados a elevados. Sin embargo, como en otras operaciones de manufactura, este costo se distribuye entre la cantidad de partes forjadas con el conjunto de matrices en particular. Por lo tanto, aunque el costo del material de cada pieza de trabajo permanece constante, los costos por pieza del montaje y del herramental disminuyen al aumentar la cantidad de forjas (fig. 14.18).

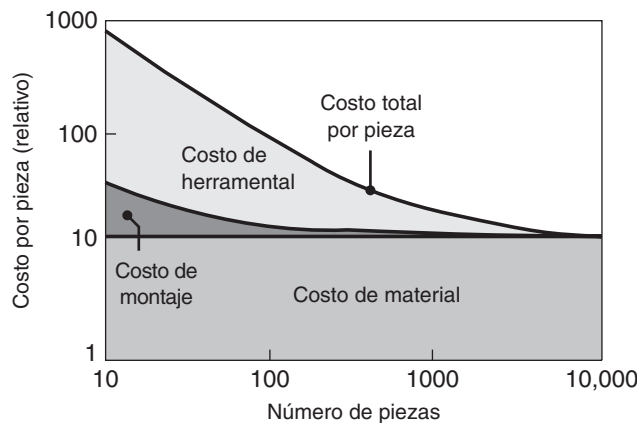


FIGURA 14.18 Costo característico por pieza en forjado; obsérvese cómo disminuyen los costos por pieza relativos al montaje y al herramental al aumentar el número de piezas forjadas si todas las piezas utilizan la misma matriz.

La relación del costo del material de la matriz con el costo total del forjado de la parte aumenta con el peso de las forjas; cuanto más costoso es el material, más alto será el costo del material respecto del costo total. Debido a que las matrices se deben fabricar y las operaciones de forjado se deben realizar, sin importar el tamaño de la forja, el costo de las matrices y de la operación de forjado respecto del costo del material es elevado para partes pequeñas y, por el contrario, los costos del material de la matriz son relativamente bajos.

El tamaño de las forjas también tiene el mismo efecto sobre el costo. Los tamaños van desde forjas pequeñas (como utensilios y pequeños componentes automovilísticos) hasta grandes (como engranes, cigüeñales y bielas para motores grandes). Al aumentar el tamaño de la forja, también se incrementa la proporción del costo del material en el costo total, aunque en menor proporción. Esto ocurre debido a que (a) el aumento progresivo en el costo de las matrices para matrices más grandes es relativamente pequeño, (b) la maquinaria y las operaciones involucradas son en lo fundamental las mismas, independientemente del tamaño de la forja, y (c) la mano de obra incorporada en cada pieza fabricada no es mucho mayor.

El costo total comprendido en una operación de forjado no se ve afectado de manera importante por el tipo de materiales forjados. Los costos de la mano de obra en el forjado suelen ser moderados, ya que se han reducido de manera significativa gracias a las operaciones automatizadas y controladas por computadora. Además, en la actualidad, las técnicas de diseño y manufactura se efectúan con la ayuda de las computadoras (capítulo 38), lo que produce ahorros importantes de tiempo y esfuerzos.

En un mercado global competitivo, el costo de forjado de una parte, en comparación con el de su producción por medio de otras técnicas como fundición, metalurgia de polvos, maquinado u otros métodos, es un factor que se debe considerar.

Por ejemplo, si se mantienen iguales todos los demás factores y dependiendo del número de piezas requeridas, la fabricación de una pieza mediante, digamos, la fundición en molde desechable, puede ser bastante más económica que su producción por medio de forjado para lotes más cortos de producción (fig. 14.19). Este método de fundición no requiere moldes ni herramientas costosas, en tanto que el forjado exige matrices costosas. Los aspectos competitivos de la selección de la manufactura y el proceso se tratarán con mayor detalle en el capítulo 40.

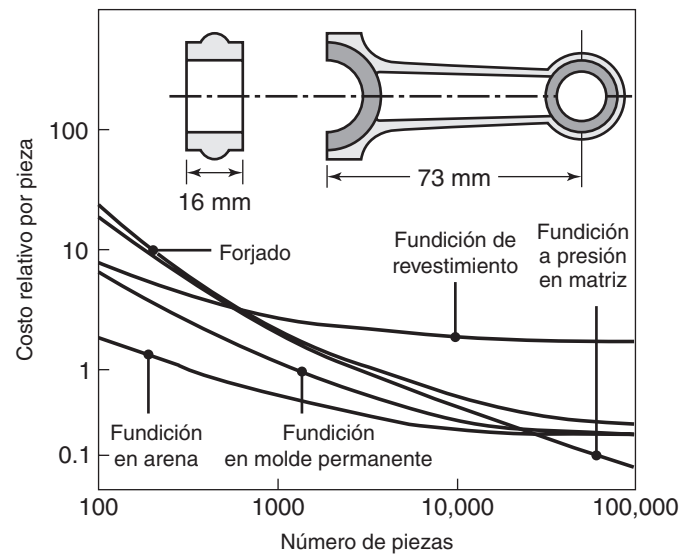


FIGURA 14.19 Costos unitarios relativos de una pequeña biela fabricada por medio de diferentes procesos de forjado y fundición. Obsérvese que, para grandes cantidades, el forjado es más económico. La fundición en arena es el proceso más económico para menos de 20,000 piezas.

ESTUDIO DE CASO 14.2 Componentes de la suspensión del automóvil Lotus Elise

La industria automotriz se ha visto sujeta cada vez más a una demandante serie de normas de desempeño, de costo, ambientales y de eficiencia del combustible. Una de las principales estrategias para mejorar el diseño del vehículo respecto de todas estas restricciones (aparentemente) contradictorias consiste en reducir el peso del auto mediante materiales y procesos de fabricación avanzados para preservar el desempeño y la seguridad. La optimización de los diseños anteriores ha demostrado que se pueden obtener ahorros de peso hasta de 34% en los componentes del sistema de suspensión, lo que es significativo, ya que las suspensiones constituyen casi 12% de la masa de un auto. Estos ahorros de peso se pueden lograr en gran medida con el desarrollo de diseños óptimos, utilizando herramientas analíticas avanzadas y forjas de acero de forma neta, cercana a la neta, en vez de componentes de hierro fundido. Además, ha habido ahorros importantes en los costos de muchas partes cuando se utilizan forjas optimizadas de acero en lugar de fundiciones y extrusiones de aluminio.

El Lotus Elise es un auto deportivo de alto rendimiento, diseñado para una conducción y un manejo más exigentes. El grupo Lotus investigó el uso de forjas de acero en lugar de soportes de suspensión con aluminio extruido para reducir el costo y mejorar la confiabilidad y el rendimiento. Sus esfuerzos de desarrollo consistieron en dos fases, como se muestra en la figura 14.20. La primera fase comprendía el desarrollo de un componente de acero forjado que se puede utilizar en los autos deportivos Elise ya existentes; la segunda fase comprendía la producción de un soporte de suspensión para un nuevo modelo.

Se desarrolló un nuevo diseño mediante un proceso interactivo con herramientas avanzadas de software para reducir el número de componentes y determinar la geometría óptima. El material seleccionado para el soporte fue un acero forjado enfriado por aire, que da un tamaño y microestructura uniforme de los granos y una alta resistencia uniforme sin necesidad de tratamiento térmico. Estos materiales también tienen resistencias a la fatiga casi 20% más altas que los aceros al carbono tradicionales, como el AISI 1548-HT, que se utiliza en aplicaciones similares.

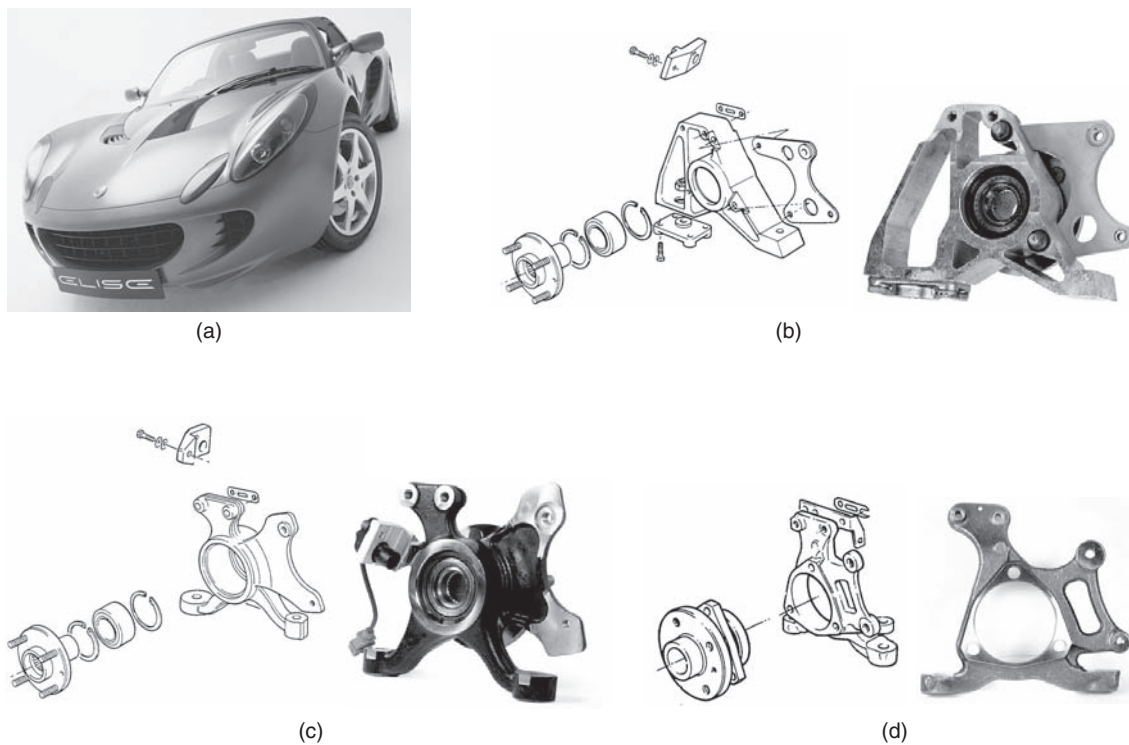


FIGURA 14.20 (a) Automóvil Lotus Elise serie 2; (b) ilustración del diseño original para los soportes verticales de la suspensión, mediante una extrusión de aluminio; (c) diseño de reemplazo utilizando una forja de acero; (d) diseño optimizado de forja de acero para nuevos modelos de autos. *Fuente:* (a) Cortesía de Fox Valley Motorcars, (b) a (d) Cortesía de Lotus Engineering y American Iron and Steel Institute.

TABLA 14.5

Comparación de diseños de soportes de suspensión del automóvil Lotus Elise				
Dibujo de la figura 14.20	Material	Aplicación	Masa (kg)	Costo (\$)
(b)	Extrusión de aluminio, soporte de acero, buje de acero, caja de acero	Diseño original	2.105	85
(c)	Acero forjado	Fase I	2.685 (+28%)	27.7 (−67%)
(d)	Acero forjado	Fase II	2.493 (+18%)	30.8 (−64%)

Los diseños modificados se resumen en la tabla 14.5. Como se podrá ver, el nuevo diseño optimizado de forjado (fig. 14.20d) produjo importantes ahorros de costos. Aunque también ocasiona un pequeño aumento de peso en comparación con el diseño de extrusión de aluminio, se reconoce que la penalidad por el peso es bastante pequeña y el uso de acero forjado para estos componentes tiene grandes ventajas en las condiciones de carga de fatiga que los componentes de la suspensión encuentran constantemente. El nuevo diseño también tenía ciertas ventajas de rendimiento dado que la rigidez del componente ahora es mayor, lo que se registró como una mejor satisfacción del cliente y mejor “sensación” durante su manejo. Además, el nuevo diseño redujo el número de partes requeridas, satisfaciendo así otro principio fundamental del diseño.

Fuente: Cortesía de Lotus Engineering y American Iron and Steel Institute.

RESUMEN

- El forjado denota una familia de procesos de trabajo de los metales en los que la deformación de la pieza de trabajo se realiza mediante fuerzas de compresión aplicadas por lo general a través de una serie de matrices. El forjado tiene la capacidad de producir una amplia variedad de partes estructurales con características favorables, como resistencia, tenacidad, precisión dimensional y confiabilidad en el servicio.
- El proceso de forjado puede efectuarse a temperatura ambiente, media o alta. El comportamiento del material de la pieza de trabajo durante la deformación, la fricción, la transferencia de calor y las características de flujo del material en la cavidad de la matriz son factores que deben considerarse, como la selección adecuada del material para las matrices, los lubricantes, la temperatura de la pieza de trabajo y de las matrices, las velocidades de forjado y el equipo.
- Si el proceso de forjado no se controla de manera apropiada se pueden desarrollar varios defectos, sobre todo en la calidad de la pieza de trabajo, la forma del tocho o de la forma previa y la geometría de la matriz. En la actualidad, se usan técnicas de diseño y fabricación asistidas por computadora, sobre todo en el diseño y fabricación de matrices, diseño de formas previas, predicción del flujo de material y para evitar la posibilidad de defectos internos y externos durante el forjado.
- Existen varias máquinas de forjado, cada una con sus propias capacidades y características. En la actualidad, las operaciones de forjado se automatizan en gran medida con el uso de robots industriales y controles por computadora.
- El forjado rotatorio es una operación de forja que reduce el diámetro de una barra o tubo sólido con el movimiento radial alternativo de un conjunto de dos o cuatro matrices. El proceso es apropiado para producir tramos cortos o largos de barra o tubería con diversos perfiles internos o externos.
- Debido a que las fallas en las matrices tienen un importante impacto económico, su diseño, la selección del material y el método de producción son de suma importancia. Existen varios materiales para matrices y métodos de fabricación, incluyendo procesos avanzados de remoción del material y de acabado.

TÉRMINOS CLAVE

Abarrilamiento	Forjado con dado cóncavo	Forjado progresivo
Acuñado	Forjado con dado convexo	Forjado rotatorio
Bigotes o rebaba de forja	Forjado de forma neta	Granos de orilla
Cabeceado	Forjado de matriz abierta	Martillos
Dimensionado	Forjado de precisión	Penetrado
Ensayo de torsión en caliente	Forjado en matriz cerrada	Prensas
Forja de desbaste	Forjado isotérmico	Punzonado de cavidades o clavado
Forjabilidad	Forjado orbital	Recalcado
Forjado	Forjado por matriz de impresión	

BIBLIOGRAFÍA

- Altan, T., Ngaile, G. y Shen, G. (eds.), *Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications*, ASM International, 2004.
- ASM Handbook, Vol. 14: *Forming and Forging*, ASM International, 1988.

- Blazynski, T. Z., *Plasticity and Modern Metal-forming Technology*, Elsevier, 1989.
- Byrer, T. G. (ed.), *Forging Handbook*, Forging Industry Association, 1985.
- Dieter, G. E., Kuhn, H. A. y Semiatin, S. L. (eds.), *Handbook of Workability and Process Design*, ASM International, 2003.
- Lange, K. (ed.), *Handbook of Metal Forming*, McGraw-Hill, 1985.
- Open Die Forging Manual*, 3a. ed., Forging Industry Association, 1982.
- Prasad, Y. V. R. K. y Sasidhara, S. (eds.), *Hot Working Guide: A Compendium of Processing Maps*, ASM International, 1997.
- Product Design Guide for Forging*, Forging Industry Association, 1997.
- Reid, D. T. (ed.), *Fundamentals of Tool Design*, 3a. ed., Society of Manufacturing Engineers, 1991.
- Thomas, A., *DFRA Forging Handbook: Die Design*, Drop Forging Research Association, 1980.
- Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, 4a. ed., Vol. 2, *Forming*, Society of Manufacturing Engineers, 1984.

PREGUNTAS DE REPASO

- 14.1 ¿Cuál es la diferencia entre forjado en frío, en caliente y a temperatura media?
- 14.2 Explique la diferencia entre forjado de matriz abierta y por impresión de matriz.
- 14.3 Explique la diferencia entre forjado con dado cóncavo, convexo y bloqueado.
- 14.4 ¿Qué factores están involucrados en el forjado de precisión?
- 14.5 ¿Qué tipo de partes puede producir el forjado rotatorio?
- 14.6 Explique las características de una matriz típica de forjado.
- 14.7 Explique a qué se refieren los términos “de carga limitada”, “de energía limitada” y “de recorrido o carrera limitada” en relación con las máquinas para forjado.
- 14.8 ¿Qué es un bigote o rebaba de forja?
- 14.9 ¿Por qué el punzonado de cavidades, o clavado, es una alternativa atractiva para producir matrices simples?
- 14.10 ¿Cuál es la diferencia entre penetrado y troquelado?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 14.11 ¿Cómo puede decir si una parte está forjada o fundida? Explique las características que investigaría.
- 14.12 ¿Por qué es importante la forma intermedia de una parte en las operaciones de forjado?
- 14.13 Explique las funciones de las rebabas en un forjado por impresión de matriz.
- 14.14 ¿Por qué el control del volumen de la pieza en bruto es importante en el forjado en matriz cerrada?
- 14.15 ¿Por qué hay tantos tipos de máquinas para forjado? Describe las capacidades y limitaciones de cada una.
- 14.16 ¿Cuáles son las ventajas y limitaciones de (a) una operación de desbaste, y (b) forjado isotérmico?
- 14.17 Describa sus observaciones en relación con la figura 14.16.
- 14.18 ¿Cuáles son las ventajas y limitaciones de utilizar insertos de matrices?
- 14.19 Revise la figura 14.5d y explique por qué los ángulos de salida interiores son más grandes que los exteriores. ¿Esto también es cierto para la fundición de molde permanente?
- 14.20 Haga comentarios en relación con el patrón de flujo de los granos en la figura 14.12.
- 14.21 Haga comentarios en relación con el control del espesor final de un tubo en la figura 14.15.
- 14.22 Si inspecciona algunos productos forjados (como una llave para tubos) puede ver que las letras sobre ellos se resaltan en vez de estar rebajadas. Explique por qué están producidas de esa manera.
- 14.23 Describa las dificultades comprendidas al definir con precisión el término “forjabilidad”.
- 14.24 Identifique las normas de diseño de la fundición (descritas en la sección 12.2) que también se pueden aplicar al forjado.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

14.25 Calcule la fuerza de forjado de una pieza de trabajo sólida, cilíndrica, producida con acero 1020, que tiene 3.5 pulgadas de altura y 5 pulgadas de diámetro, y cuya altura se va a reducir 30%. Considere un coeficiente de fricción de 0.2.

14.26 Mediante la ecuación 14.2, estime la fuerza de forjado de la pieza de trabajo del problema 14.25, suponiendo que es un forjado complejo y que el área proyectada de la rebaba es 40% mayor que el área proyectada de la pieza de trabajo forjada.

14.27 Tome dos especímenes sólidos cilíndricos del mismo diámetro pero de diferentes alturas, y comprímalos (sin fricción) al mismo porcentaje de reducción de la altura. Muestre que los diámetros finales son los mismos.

14.28 En el ejemplo 14.1, calcule la fuerza de forjado, suponiendo que el material es aluminio 1100-O y que el coeficiente de fricción es 0.2.

14.29 Mediante la ecuación 14.1, realice un diagrama de la fuerza de forjado (F) en función del radio (r) de la pieza de trabajo. Suponga que el esfuerzo de flujo (Y_f) del material es constante. Recuerde que el volumen del material permanece constante durante el forjado, así que cuando h disminuye, r aumenta.

14.30 ¿Cómo haría para calcular la fuerza requerida en una operación de punzonado de cavidades, suponiendo que el material es acero dulce y el área proyectada de la impresión es 0.5 pulg^2 ? Explique con claridad. (*Sugerencia:* vea la sección 2.6 sobre dureza).

14.31 Una prensa mecánica se activa por medio de un motor de 30 hp y opera a 40 golpes por minuto. Utilice un volantín, de modo que la velocidad del cigüeñal no varíe de manera considerable durante la carrera. Si ésta es de 6 pulgadas, ¿cuál es la máxima fuerza constante que se puede ejercer sobre toda la longitud de la carrera o recorrido?

14.32 Para la misma prensa mecánica del problema 14.31, ¿a qué espesor se puede forjar un cilindro de aluminio 5052-O que tiene 3 pulgadas de diámetro y 2 pulgadas de altura que se forjará antes de que la prensa se detenga?

14.33 Suponga que es un instructor que cubre los temas descritos en este capítulo y está haciendo un examen sobre los diversos aspectos para evaluar los conocimientos de los estudiantes. Elabore dos problemas cuantitativos y proporcione las respuestas.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

14.34 Diseñe un método experimental por el cual pueda medir sólo la fuerza requerida para forjar la rebaba en el forjado por impresión de matriz.

14.35 Suponga que representa a la industria del forjado y que está enfrentando a un representante de la industria de la fundición. ¿Qué le diría a esa persona sobre los méritos de los procesos de forjado?

14.36 En la figura P14.36 se muestra una forja redonda por impresión de matriz producida con una pieza en bruto cilíndrica, como se muestra a la izquierda. Conforme a lo descrito en este capítulo, dichas partes están hechas en una secuencia de operaciones de forjado. Sugiera una secuencia de pasos intermedios de forjado para hacer la parte de la derecha y dibuje la forma de las matrices requeridas.

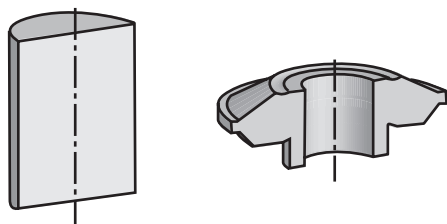


FIGURA P14.36

14.37 Los engranes se pueden fabricar por medio de forjado, en particular los engranes cónicos. Investigue en la bibliografía técnica y describa la secuencia de los pasos de manufactura comprendidos. Comente la calidad de dicho engrane si se compara con uno fabricado mediante los procesos de fundición descritos en el capítulo 11.

14.38 El forjado es un método de producción de álabes para turbinas de motores a reacción (además de la fundición o el maquinado). Estudie el diseño de dichos álabes y la literatura técnica; después prepare un procedimiento paso por paso para producir álabes mediante forjado. Comente las posibles dificultades que se pueden encontrar y ofrezca soluciones.

14.39 Al comparar partes forjadas y fundidas, notamos que una misma parte se puede fabricar mediante ambos procesos. Comente las ventajas y desventajas de cada proceso, considerando factores como el tamaño de la parte y la complejidad de la forma, la flexibilidad del diseño, las propiedades mecánicas desarrolladas y el desempeño durante el servicio.

14.40 Con base en los datos proporcionados en la tabla 14.3, obtenga el valor aproximado de la resistencia a la fluencia de estos materiales a temperaturas de forjado en caliente. Dibuje una gráfica de barras que muestre el diá-

metro máximo de una parte forjada en caliente producida en una prensa con capacidad de 60 toneladas en función del material.

14.41 Consiga varios pernos, clavos y tornillos de diferentes tamaños. Mida el volumen de las cabezas y calcule la relación original sin soporte de longitud a diámetro para estas partes. Analice estos números en relación con lo tratado en el texto.

14.42 Revise la secuencia de operaciones en la producción del perno escalonado que se muestra en la figura

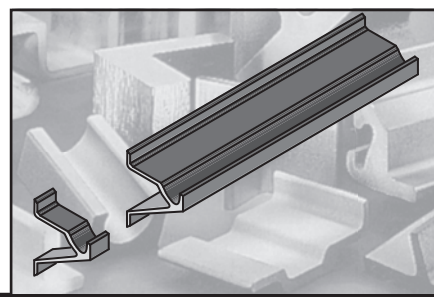
14.13. Si no se efectúa el paso de recalcado cónico, ¿cuáles serían las consecuencias en la parte final?

14.43 Efectúe operaciones de forja de desbaste simple en piezas de arcilla mediante una pieza plana de madera y realice observaciones sobre el ensanchamiento de las piezas en función de las secciones transversales originales de los especímenes de arcilla (por ejemplo, cuadrada o rectangular con diferentes relaciones de espesor a anchura).

14.44 Discuta sobre los posibles problemas ambientales relacionados con las operaciones descritas en este capítulo.

CAPÍTULO 15

Extrusión y estirado (trefilado) de metales



- 15.1 Introducción 400
- 15.2 El proceso de extrusión 402
- 15.3 Extrusión en caliente 405
- 15.4 Extrusión en frío 409
- 15.5 Defectos de la extrusión 413
- 15.6 Equipo para extrusión 414
- 15.7 El proceso de estirado (trefilado) 415
- 15.8 Prácticas de estirado 416
- 15.9 Defectos del estirado y esfuerzos residuales 419
- 15.10 Equipo para estirado 419

EJEMPLO:

- 15.1 Cálculo de la fuerza de extrusión en caliente 404
- 15.2 Manufactura de un disipador de calor de aluminio 408
- 15.3 Parte extruida en frío 411

En este capítulo se examinan los fundamentos de la extrusión y el estirado (trefilado) y sus aplicaciones en la manufactura. En particular, se describe lo siguiente:

- Características de la extrusión directa, indirecta e hidrostática.
- Fuerzas comprendidas en la extrusión en función de los parámetros del material y del procesamiento.
- Prácticas de extrusión y diseño de matrices para evitar defectos comunes.
- Estirado (trefilado) de barra, alambres y tubería.
- Diseño de matrices para la integridad de los productos.

Partes típicas fabricadas mediante extrusión y estirado (trefilado): Piezas grandes con una amplia variedad de secciones transversales constantes, barras redondas, flechas, barras para maquinaria y aplicaciones de trenes de potencia automovilísticos, escaleras de aluminio, tubos contráctiles, alambre para diversas aplicaciones eléctricas y mecánicas.

Procesos alternativos: Maquinado, metalurgia de polvos y fundición.

15.1 | Introducción

La extrusión y el estirado (trefilado) tienen numerosas aplicaciones en la manufactura de productos continuos y discretos a partir de una gran variedad de metales y aleaciones. En la **extrusión**, una palanquilla cilíndrica se fuerza a través de un dado o matriz (fig. 15.1) de manera similar a como se aprieta el tubo de la pasta dental o se extruye Play-Doh® (una masa para niños) en varias secciones transversales en una prensa de juguete. Por medio de la extrusión se pueden producir una gran variedad de secciones transversales sólidas o huecas, que fundamentalmente son partes semiterminadas. Una característica de la extrusión (del latín *extrudere*, que significa “sacar por la fuerza”) es que pueden ocurrir grandes deformaciones sin fracturas (ver sección 2.2.8) porque el material se somete a compresión triaxial elevada. Debido a que la geometría del dado permanece sin cambios durante la operación, por lo general los productos extruidos tienen una sección transversal constante. En el siglo XVIII, los tubos de plomo se producían por medio de extrusión. Como se describe en la sección 19.2, los plásticos se extruyen ampliamente.

Entre los productos comunes fabricados mediante extrusión se encuentran los rieles para puertas corredizas, los marcos de ventanas, la tubería de diversas secciones transversales, las escaleras de aluminio y numerosas formas estructurales y arquitectónicas. Los extrudidos se pueden cortar a las longitudes deseadas, que después se convierten en partes discretas, como soportes, engranes y ganchos para ropa (fig. 15.2). Los mate-

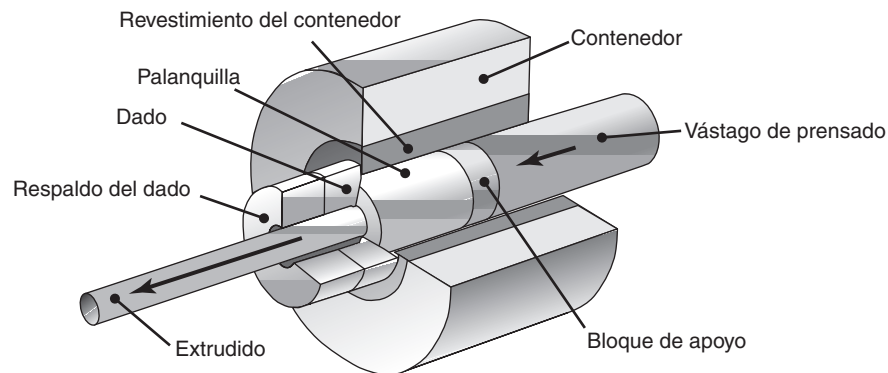


FIGURA 15.1 Esquema del proceso de extrusión directa.

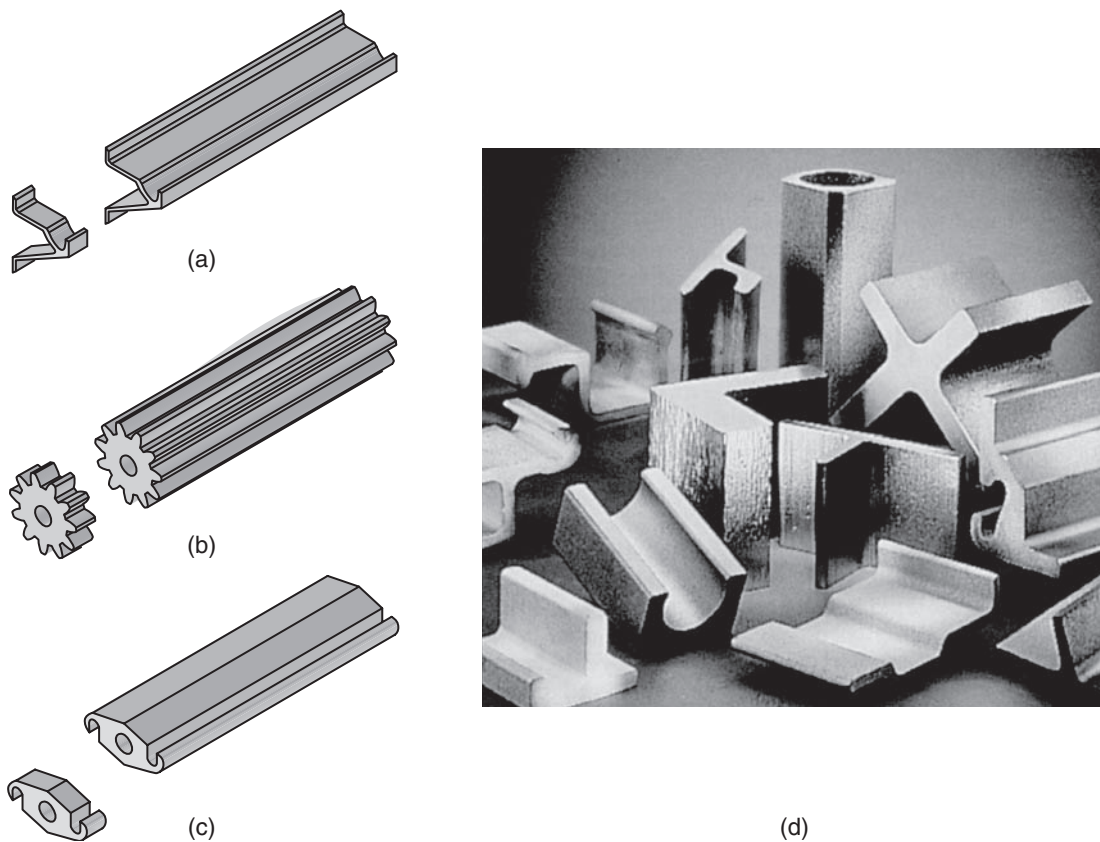


FIGURA 15.2 Extrudidos y ejemplos de productos fabricados mediante el corte de extrudidos.
Fuente: Cortesía de Plymouth Extruded Shapes.

riales comúnmente extruidos son el aluminio, cobre, acero, magnesio y plomo; también se pueden extruir otros metales y aleaciones, con diferentes niveles de dificultad.

Debido a que en la extrusión existe una cámara, cada palanquilla se extruye de manera individual, así que éste es un proceso por lotes o semicontinuo. La extrusión puede ser económica tanto para corridas de producción grandes como para las cortas. Por lo general, los costos del herramental son bajos, en particular para producir secciones transversales simples y sólidas.

Dependiendo de la ductilidad del material, la extrusión se puede efectuar a temperatura ambiente o elevada. Con frecuencia, la extrusión a temperatura ambiente se combina con operaciones de forjado, en cuyo caso se conoce como **extrusión en frío** (ver sección 14.4). Tiene aplicaciones importantes, incluyendo sujetadores y componentes para automóviles, bicicletas, motocicletas, maquinaria pesada y equipo de transporte.

El **estirado (trefilado)** es una operación desarrollada entre los años 1000 y 1500 d.C., en la que la sección transversal de una barra sólida, alambtrón o tubería se reduce o cambia de forma al pasarla a través de un dado. Las barras estiradas se utilizan para flechas, husillos y pequeños pistones y como materia prima para sujetadores (como remaches, tornillos y pernos). Además de las barras redondas, se pueden estirar varios perfiles.

La distinción entre los términos **barra** y **alambre** es arbitraria, ya que la barra tiene una sección transversal mayor a la del alambre. En la industria, por lo general el alambre se define como barra que se ha estirado (trefilado) a través de un dado, por lo menos una vez. El estirado de alambres implica diámetros más pequeños que el estirado de barras, con tamaños inferiores a 0.01 mm (0.0005 pulgada) para hilo magnético, e incluso menores para su uso en fusibles de muy baja corriente.

15.2 El proceso de extrusión

Existen tres tipos básicos de extrusión. En el proceso más común (conocido como **extrusión directa** o **en avance**), se coloca una palanquilla en una *cámara* (contenedor) y se fuerza a través de la abertura de un dado mediante el accionamiento hidráulico de un pistón (vástago o punzón de presión), como se muestra en la figura 15.1. La abertura del dado puede ser redonda o tener diversas formas, lo que depende de la forma extruida deseada. La función del bloque de apoyo o ficticio es proteger la punta del vástago de presión, sobre todo en la extrusión en caliente. Otros tipos de extrusión son la indirecta, la hidrostática y la de impacto.

En la extrusión **indirecta** (también conocida como invertida o retroextrusión), el dado se mueve hacia la palanquilla no extruida (fig. 15.3a). En la extrusión **hidrostática** (fig. 15.3b), la palanquilla tiene un diámetro más pequeño que la cámara (que se llena con un fluido) y la presión se transmite a la palanquilla por medio de un pistón. A diferencia de la extrusión directa, no existe fricción a vencer en las paredes del contenedor, porque la palanquilla se encuentra estacionaria con respecto al mismo. Un tipo menos común de extrusión es la **extrusión lateral** (o de *lado*) (fig. 15.3c).

Como se puede ver en la figura 15.4, las variables geométricas en la extrusión son el ángulo del dado (α) y la relación del área transversal de la palanquilla con la del producto extruido (A_o/A_f), conocida como **relación de extrusión (R)**. Otras variables son la

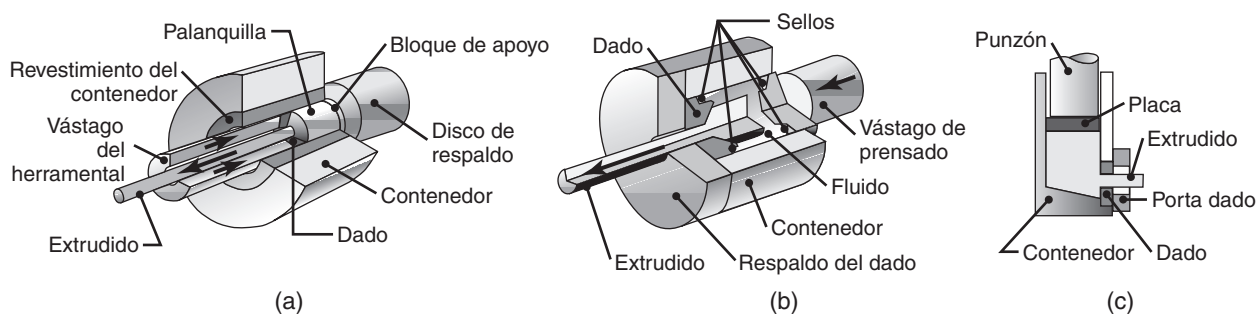


FIGURA 15.3 Tipos de extrusión: (a) indirecta, (b) hidrostática; (c) lateral.

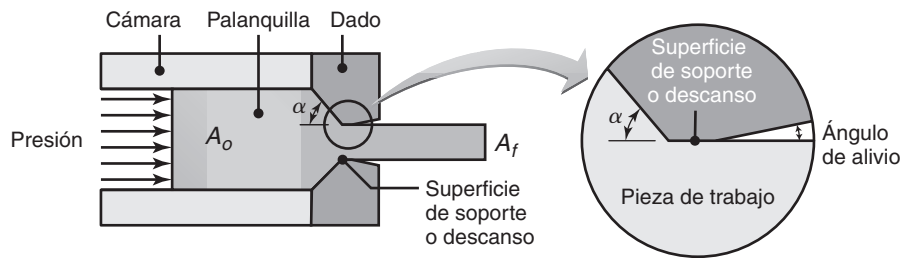


FIGURA 15.4 Variables del proceso en extrusión directa. Todos, el ángulo del dado, la reducción en la sección transversal, la velocidad de extrusión, la temperatura de la palanquilla y la lubricación, afectan la presión de la extrusión.

temperatura de la palanquilla, la velocidad a la que avanza el pistón y el tipo de lubricante utilizado.

Fuerza de extrusión. La fuerza requerida para la extrusión depende de (a) la resistencia del material de la palanquilla, (b) la relación de extrusión, (c) la fricción entre la palanquilla y las superficies de la cámara y el dado, y (d) las variables del proceso, como la temperatura de la palanquilla y la velocidad de extrusión. La *fuerza de extrusión* (F) se puede estimar a partir de la fórmula:

$$F = A_o k \ln \left(\frac{A_o}{A_f} \right) \quad (15.1)$$

en la que k es la **constante de extrusión** (que se determina de manera experimental), y A_o y A_f son las áreas de la palanquilla y del producto extruido, respectivamente. De este modo, el valor de k en la ecuación 15.1 es una medida de la resistencia del material que se extruye y las condiciones de fricción. En la figura 15.5 se dan los valores de k de diversos metales para una gama de temperaturas de extrusión.

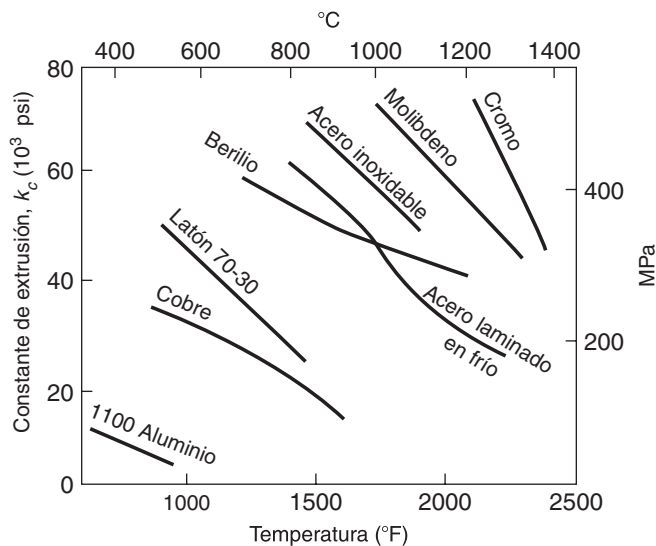


FIGURA 15.5 Constante de extrusión k de diversos metales a diferentes temperaturas. Fuente: P. Loewenstein.

EJEMPLO 15.1 Cálculo de la fuerza de extrusión en caliente

Una palanquilla redonda hecha de latón 70-30 se extruye a una temperatura de 1250 °F (675 °C). Su diámetro es de 5 pulgadas (125 mm) y el diámetro de la extrusión es de 2 pulgadas (50 mm). Calcúlese la fuerza de extrusión requerida.

Solución La fuerza de extrusión se calcula mediante la ecuación 15.1, en la que la constante de extrusión (k) se obtiene de la figura 15.5. Para este material, $k = 35,000$ psi (250 MPa) a la temperatura de extrusión determinada. Por lo tanto,

$$F = \pi(2.5)^2(35,000) \ln \left[\frac{\pi(2.5)^2}{\pi(1.0)^2} \right] = 1.26 \times 10^6 \text{ lb}$$

$$= 630 \text{ toneladas} = 5.5 \text{ MN}$$

(Ver en la sección 15.6 las capacidades de las prensas de extrusión.)

Flujo del metal en la extrusión. El patrón de flujo del metal en la extrusión, como en otros procesos de formado, es importante por su influencia en la calidad y las propiedades mecánicas del producto extruido. Este patrón se determina con base en el principio básico de que la energía se minimiza en cualquiera de los procesos citados. El material fluye longitudinalmente, de modo muy similar al flujo de un fluido incompresible en un canal; por lo tanto, los productos extruidos tienen una estructura de granos alargada (orientación preferida). La sección 15.5 describe la manera en que el flujo inapropiado del metal puede producir varios defectos en el producto extruido durante la extrusión.

Una técnica común para investigar el patrón de flujo consiste en seccionar la palanquilla redonda longitudinalmente a la mitad y después marcar una cara con un patrón de rejilla cuadrada. Las dos mitades se colocan juntas dentro de la cámara y se extruyen. Luego se separan y se estudian en forma individual. En la figura 15.6 se muestran los patrones de flujo comunes obtenidos mediante esta técnica para el caso de extrusión directa con *dados rectos* (ángulo del dado de 90°). El patrón de flujo es función de diversas variables, incluyendo la fricción.

En la leyenda de la figura 15.6 se describen las condiciones en que ocurren estos patrones de flujo. Obsérvese las **zonas de metal muerto** en las figuras 15.6b y c, en las que el metal se encuentra básicamente estacionario en las esquinas. Esta situación es similar al estancamiento del flujo de un fluido en los canales que tienen ángulos agudos o vueltas. Por ejemplo, el aluminio suele extruirse en caliente, con dados rectos y sin nin-

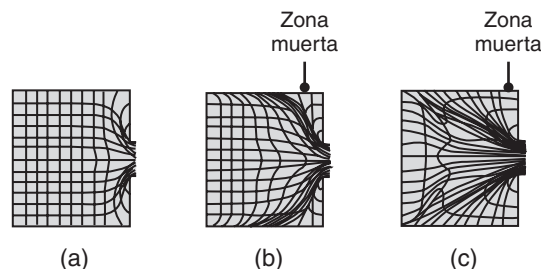


FIGURA 15.6 Tipos de flujo metálico en la extrusión con dados rectos o a 90°. (a) Patrón de flujo obtenido a baja fricción o en extrusión indirecta. (b) Patrón obtenido con alta fricción en las interfaces de la palanquilla y la cámara. (c) Patrón obtenido con alta fricción o con enfriamiento de las regiones exteriores de la palanquilla dentro de la cámara. Este tipo de patrón, que se observa en metales cuya resistencia aumenta con rapidez al disminuir la temperatura, provoca un defecto conocido como defecto (o extrudido) tipo tubo.

guna lubricación. La superficie brillante, satinada, es resultado del flujo del material por la interfaz con la zona de metal muerto.

Parámetros del proceso. Debido a que tienen alta ductilidad, el aluminio forjable, el cobre, el magnesio y sus aleaciones, los aceros comunes y los inoxidable, se extruyen con relativa facilidad en diversas formas. También pueden extruirse otros metales (como el titanio y los metales refractarios), pero sólo con cierta dificultad y considerable desgaste del dado.

En la práctica, las relaciones de extrusión (R) van por lo general de 10 a 100. Pueden ser mayores en aplicaciones especiales (400 para metales no ferrosos más blandos), o inferiores en materiales menos dúctiles, aunque la relación tiene que ser por lo menos 4 para deformar plásticamente el material a través de toda la masa de la pieza de trabajo. Es común que los productos extruidos presenten una longitud menor a 7.5 m (25 pies) debido a la dificultad de manejar magnitudes más grandes, pero pueden tener una longitud hasta de 30 m (100 pies). Las velocidades del pistón varían hasta 0.5 m/s (100 pies/min). En general, son preferibles velocidades inferiores para aluminio, magnesio y cobre, con velocidades superiores para aceros, titanio y aleaciones refractarias. Es común que las tolerancias dimensionales en la extrusión se encuentren en el intervalo de ± 0.25 –2.5 mm (± 0.01 –0.1 pulgada) y se incrementen con el aumento de la sección transversal.

La mayoría de los productos extruidos, en particular los que tienen secciones transversales pequeñas, requieren enderezado y torcido. Esto suele realizarse mediante el estirado y el torcido de dichos productos en un estirador hidráulico equipado con mandíbulas. Un ángulo del dado hace que una pequeña parte del extremo de la palanquilla quede en la cámara tras concluir la operación. Esta parte (conocida como desperdicio o *extremo tope*) se elimina recortando la extrusión a la salida del dado y extrayendo el desperdicio de la cámara. De manera alternativa, se puede colocar otra palanquilla o bloque de grafito en la cámara para extruir la pieza que queda de la extrusión anterior.

En la **extrusión coaxial** o de **revestimiento** se extruyen juntas palanquillas coaxiales, siempre que la resistencia y ductilidad de los dos metales sean compatibles. Un ejemplo es el revestimiento de cobre con plata. Los *extruidos escalonados* se producen extruyendo la palanquilla parcialmente en un dado y después en uno o más dados mayores (ver también *extrusión en frío*, sección 15.4). La extrusión lateral (fig. 15.3c) se utiliza para revestir cable o recubrir el cable eléctrico con plástico.

15.3 | Extrusión en caliente

Para metales y aleaciones que carecen de suficiente ductilidad a temperatura ambiente (o para reducir las fuerzas requeridas), la extrusión se efectúa a temperaturas elevadas (tabla 15.1). Como en todas las demás operaciones de trabajado en caliente, la extrusión en caliente tiene requisitos especiales debido a las altas temperaturas de operación. Por ejemplo, el desgaste de un dado puede ser excesivo, y el enfriamiento de las superficies de la palanquilla caliente (en la cámara más fría) y del dado puede provocar una deformación muy poco uniforme (fig. 15.6c). Para reducir el enfriamiento de la palanquilla y prolongar la vida del dado, los dados de extrusión se pueden precalentar, como se hace en las operaciones de forjado en caliente.

Cuando la palanquilla está caliente, desarrolla una capa de óxido, a menos que se caliente en un horno de atmósfera inerte. Esta capa puede ser abrasiva (ver sección 33.2) y afectar el patrón de flujo del material. También da como resultado un producto extruido que puede ser inaceptable cuando se requiere un buen acabado superficial. Para evitar la formación de capas de óxido en el producto extruido en caliente, el bloque de apoyo colocado delante del pistón (fig. 15.1) se fabrica de un diámetro más pequeño que el contenedor, y en éste se queda, en consecuencia, un cascarón delgado (*costra*) que está constituido principalmente por la capa exterior oxidada de la palanquilla. Después se extrae la costra de la cámara.

TABLA 15.1

Intervalos característicos de temperaturas de extrusión para diversos metales y aleaciones

	°C
Plomo	200–250
Aluminio y sus aleaciones	375–475
Cobre y sus aleaciones	650–975
Aceros	875–1300
Aleaciones refractarias	975–2200

Diseño de los dados y matrices. El diseño del dado requiere considerable experiencia, como puede apreciarse al revisar la figura 15.7. Las *matrices en escuadra* (*dados de corte*) se utilizan en la extrusión de metales no ferrosos, en particular aluminio. Las matrices en escuadra desarrollan zonas de metal muerto, que a su vez forman un “ángulo de dado” (ver figs. 15.6b y c) a lo largo del cual fluye el material en el área de deformación. Estas zonas producen extrudidos con terminados brillantes, debido al bruñido que ocurre conforme el material fluye sobre la superficie del “ángulo de dado”.

La *tubería* se extruye a partir de una palanquilla sólida o hueca. Por lo general, el espesor de la pared se limita a 1 mm (0.040 pulgada) para el aluminio, 3 mm (0.125 pulgada) para los aceros al carbono y 5 mm (0.20 pulgada) para los aceros inoxidable. Cuando se utilizan palanquillas sólidas, el pistón se equipa con un mandril que perfora un orificio en la palanquilla. También pueden extruirse así palanquillas con un orificio previamente perforado. Debido a la fricción y severidad de la deformación, los extrudidos de paredes delgadas son más difíciles de producir que los de paredes gruesas.

Las *secciones transversales huecas* (fig. 15.8a) se pueden extruir con métodos de cámara de soldadura y utilizando diversos dados conocidos como *dados de araña*, *dados tipo ojo de buey* y *dados tipo puente* (fig. 15.9b). Durante la extrusión, el metal se divide y fluye alrededor de los soportes del mandril interno en forma de filamentos. (Esta condición es muy similar a la del flujo de aire alrededor de un auto en movimiento y que se reúne corriente abajo, o del agua que fluye alrededor de grandes rocas en un río y que se reúne posteriormente.) Los filamentos que se extruyen se vuelven a soldar bajo las altas presiones existentes en la cámara de soldado antes de salir a través de la matriz. Las superficies resoldadas tienen buena resistencia porque no se exponen al ambiente, que de lo contrario desarrollaría óxidos en ellas inhibiendo la soldadura apropiada. Sin embargo, el proceso de la cámara de soldado es adecuado sólo para el aluminio y algunas de sus alea-

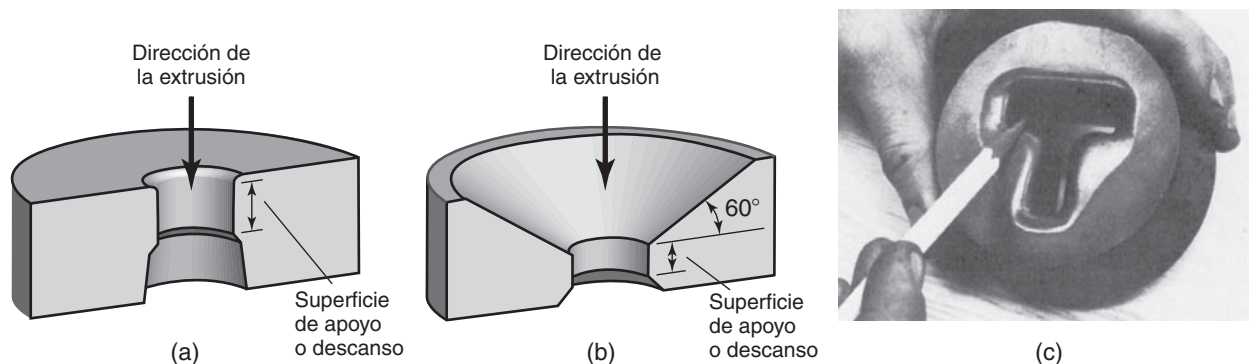


FIGURA 15.7 Configuraciones comunes de dados de extrusión: (a) dado para metales no ferrosos; (b) dado para metales ferrosos; (c) dado para extrusión en forma de T fabricado de acero para dados o matrices para trabajo en caliente y utilizado con vidrio fundido como lubricante. Fuente: © Cortesía de LTV Steel Company.

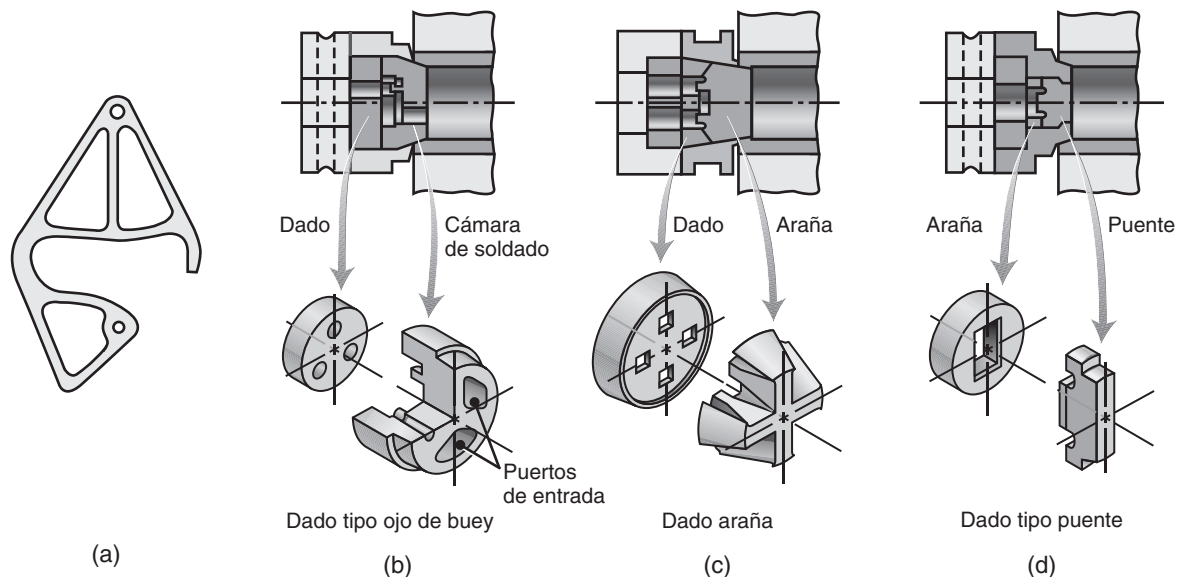


FIGURA 15.8 (a) Seguro para escalera de aluminio 6063-T6 extruido para escaleras de extensión de aluminio. Esta parte tiene 8 mm (5/16 pulgada) de espesor y se corta con una sierra a partir de la pieza extruida (ver fig. 15.2). (b) a (d) Componentes de diversos dados para extrusión de formas huecas intrincadas. Fuente: (b) a (d) K. Laue y H. Stenger.

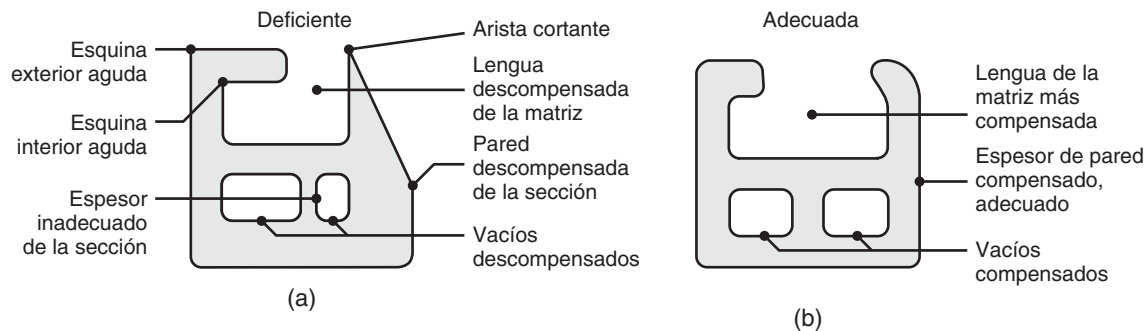


FIGURA 15.9 Ejemplos de secciones transversales deficiente y adecuada para extrusión. Obsérvese la importancia de eliminar las esquinas agudas y de mantener uniformes los espesores de las secciones. Fuente: J. G. Bralla (ed.), *Handbook of Product Design for Manufacturing*. New York: McGraw-Hill Publishing Company, 1986. Uso con permiso.

ciones, debido a su capacidad para desarrollar una soldadura resistente bajo presión (como se describe en la sección 30.2). Por supuesto que no se pueden utilizar lubricantes, porque evitan la resoldadura del metal dentro del dado.

En la figura 15.9 se ilustran los lineamientos para el diseño apropiado del dado para extrusión. Obsérvese (a) la importancia de la simetría de una sección transversal, (b) la prevención de esquinas puntiagudas, y (c) la prevención de cambios extremos en las dimensiones del dado dentro de la sección transversal.

Materiales para dados y matrices. Por lo general, como materiales para dados se utilizan los aceros para dados y matrices para trabajado en caliente (sección 5.7). Se pueden aplicar revestimientos (como el zirconio parcialmente estabilizado) a los dados para prolongar su vida. Los dados de zirconio parcialmente estabilizado (sección 8.2.2) tam-

bién se usan para extrusión en caliente de tubos y barras; sin embargo, no son los más adecuados si se desea fabricar dados para extrusiones complejas, debido a los severos gradientes de esfuerzo desarrollados en el dado que pueden producir fallas prematuras.

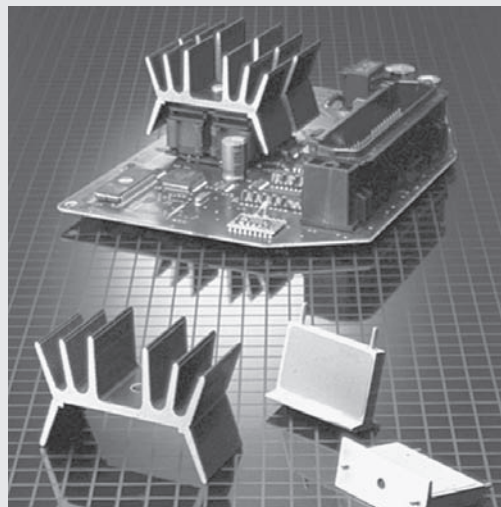
Lubricación. La lubricación es importante en la extrusión en caliente por sus efectos sobre (a) el flujo del material durante la extrusión, (b) el acabado y la integridad de la superficie, (c) la calidad del producto, y (d) las fuerzas de extrusión. El *vidrio* (sección 8.4) es un excelente lubricante para aceros simples e inoxidables y para metales y aleaciones de alta temperatura. En un proceso desarrollado en la década de 1940, conocido como **proceso Séjournet** (llamado así en honor de J. Séjournet), se coloca un soporte circular de vidrio en la cámara a la entrada del dado. La palanquilla caliente conduce calor a dicho soporte, por medio del cual comienza a fundirse como una delgada capa de vidrio que actúa como lubricante en la interfaz del dado conforme avanza la extrusión. Antes de colocar la palanquilla en la cámara, su superficie cilíndrica se recubre con una capa de vidrio en polvo para desarrollar una delgada capa lubricante en la interfaz de la palanquilla y la cámara.

En el caso de los metales que tienden a adherirse al contenedor y al dado, la palanquilla se puede recubrir con un contenedor de pared delgada fabricado con un metal más blando y de resistencia inferior, como el cobre o acero dulce. Este procedimiento se conoce como **encamisado** o **enlatado**. Además de actuar como interfaz de baja fricción, esta camisa evita que el ambiente contamine la palanquilla. Además, si el material de la palanquilla es tóxico o radioactivo, la camisa evita que contamine el ambiente. Esta técnica también se puede utilizar para extruir polvos de metales reactivos (sección 17.3).

EJEMPLO 15.2 Manufactura de un disipador de calor de aluminio

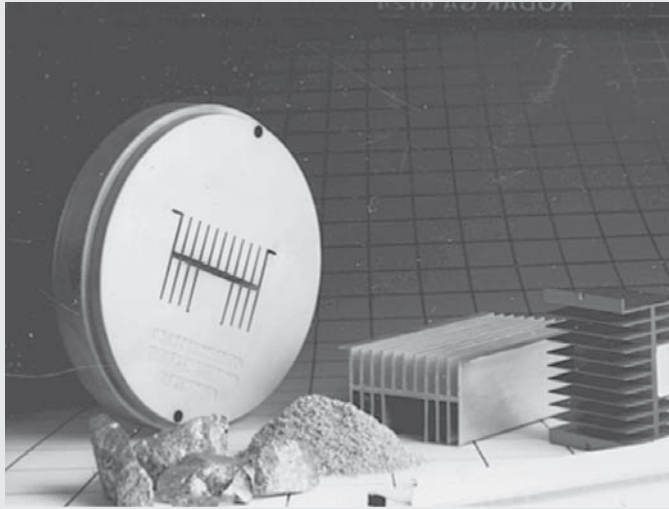
El aluminio se utiliza ampliamente para transferir calor a las aplicaciones de enfriamiento y calentamiento debido a su muy alta conductividad térmica. De hecho, con base en la relación peso-costos, ningún otro material conduce calor de manera tan económica.

Para las aplicaciones de disipación de calor, como las de la industria electrónica, se prefieren las extrusiones en caliente del aluminio. Por ejemplo, en la figura 15.10a



(a)

FIGURA 15.10 (a) Extrusión de aluminio utilizada como disipador de calor para una tarjeta de circuitos impresos. *Fuente:* Cortesía de Aluminum Extruders Council.



(b)

FIGURA 15.10 (Continuación) (b) Dado y perfiles resultantes del disipador de calor. Fuente: Cortesía de Aluminum Extruders Council.

se muestra un disipador de calor utilizado para eliminar calor de un transformador en una tarjeta de circuitos impresos. Por lo general, estos disipadores se diseñan con un gran número de aletas cuyo objetivo es maximizar el área de la superficie y se evalúan desde un punto de vista termodinámico mediante simulaciones por computadora. El maquinado, forjado y laminado de estas aletas es muy difícil y costoso. Sin embargo, el herramental para extrusión en caliente se puede producir mediante maquinado por descarga eléctrica, de manera que este proceso es favorable en términos económicos.

En la figura 15.10b se muestra un dado y la sección transversal extruida en caliente, adecuada para servir como disipador de calor. Las formas mostradas pueden producirse mediante una operación de fundición; sin embargo, es preferible la extrusión, pues no se presenta porosidad interna y la conductividad térmica es ligeramente mayor.

15.4 | Extrusión en frío

Desarrollada en la década de 1940, la *extrusión en frío* es un término general que con frecuencia denota una *combinación* de operaciones, como la *extrusión* y el *forjado* direc-

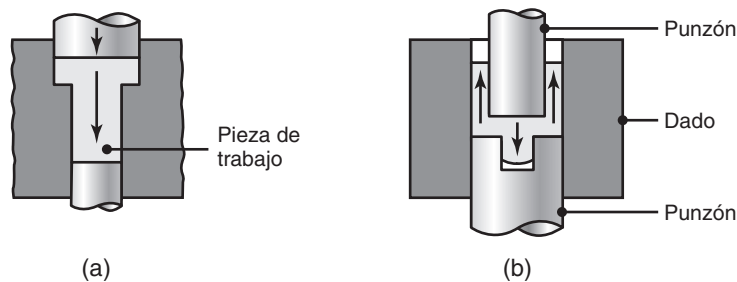


FIGURA 15.11 Dos ejemplos de extrusión en frío. Las flechas delgadas indican la dirección de flujo del metal durante la extrusión.

to e indirecto (fig. 15.11). La extrusión en frío se utiliza ampliamente para componentes de automóviles, motocicletas, bicicletas y aparatos eléctricos, y en equipo de transporte y agrícola.

Este proceso utiliza trozos de metal cortados de barras, alambres o placas terminadas en frío o laminadas en caliente. Los trozos de diámetros menores a 40 mm (1.5 pulgadas) se cizallan (*cortan*) y, de ser necesario, se escuadran sus extremos mediante procesos como recalado, maquinado o rectificado; los trozos de diámetros mayores se maquinan a partir de barras en longitudes específicas. Se pueden fabricar partes extruidas en frío que pesan hasta 45 kg (100 libras) y que tienen longitudes hasta de 2 m (80 pulgadas), aunque la mayoría de estas partes pesan mucho menos. También pueden extruirse en frío trozos de metales en polvo (preformas).

La *fuerza* (F) en la extrusión en frío se puede estimar a partir de la fórmula:

$$F = 1.7A_oY_{\text{prom}}\epsilon \quad (15.2)$$

en la que A_o es el área transversal de la pieza bruta, Y_{prom} el esfuerzo de flujo promedio del metal y ϵ la deformación real a la que se somete la pieza con base en su área transversal original y final; es decir, $\ln(A_o/A_f)$. Por ejemplo, supóngase que un trozo de metal redondo de 10 mm de diámetro y producido con un metal con $Y_{\text{prom}} = 50,000$ psi se reduce a un diámetro final de 7 mm por medio de extrusión en frío. La fuerza sería:

$$F = 1.7(\pi)(10^2/4)(50,000)[\ln(10/7)^2] = 4.8 \times 10^6 \text{ lb} = 2140 \text{ toneladas cortas}^{\text{N. del RT.}}$$

N. del RT. Una tonelada corta (TC) equivale a 2000 lb.

La extrusión en frío tiene las siguientes ventajas sobre la extrusión en caliente:

- Mejores propiedades mecánicas como resultado del endurecimiento por trabajo, siempre que el calor generado por la deformación plástica y la fricción no recristalicen el metal extruido.
- Buen control de las tolerancias dimensionales, reduciendo la necesidad de operaciones de maquinado o acabado posteriores.
- Mejor acabado superficial, en parte debido a la falta de una capa de óxido, y siempre que la lubricación sea eficaz.
- Velocidades y costos de producción que son competitivos respecto de otros métodos de producción de la misma parte, como el maquinado. Algunas máquinas son capaces de producir más de 2000 partes por hora.

Sin embargo, la magnitud de los esfuerzos en los herramientas de extrusión en frío es muy elevada (en particular con piezas de trabajo de acero y de aleaciones especiales), pues son del orden de la dureza del material de la pieza de trabajo. Por lo general, la dureza del punzón varía entre 60 y 65 HRC y la del dado entre 58 y 62 HRC. Los punzones son un componente crítico, ya que deben poseer no sólo suficiente resistencia, sino también suficiente rigidez y resistencia al desgaste y a la falla por fatiga.

La *lubricación* es crítica, en particular con los aceros, pues cabe la posibilidad de que se adhieran (*agarroten*) entre la pieza de trabajo y los herramientas (en caso de separación del lubricante). El medio más efectivo de lubricación es la aplicación de un *recubrimiento de conversión de fosfato* en la pieza de trabajo, seguido de un recubrimiento de jabón o cera, como se describe en la figura 34.9.

El diseño de los herramientas y la selección apropiada de los materiales para herramientas y dados son cruciales para el éxito de la extrusión en frío. También son importantes la selección y el control del material de la pieza de trabajo respecto de su calidad, la precisión de las dimensiones del trozo metálico y la condición de su superficie. Se han desarrollado diversas aleaciones especiales (en particular para aplicaciones críticas que requieren alto rendimiento), que son adecuadas para varias operaciones de extrusión en frío y formado en caliente con buenas propiedades, tolerancias dimensionales y a bajo costo.

EJEMPLO 15.3 Parte extruida en frío

En la figura 15.12 se muestra un producto común extruido en frío, similar al componente metálico de una bujía para automóvil. Primero se cizalla el extremo de un segmento de barra redonda (fig. 15.12, izquierda). Después se extruye en frío (fig. 15.12, al centro) mediante una operación similar a la mostrada en la figura 15.11, pero con un orificio ciego. Luego se punzona y se extrae el material en el fondo de dicho orificio, produciendo la pequeña pieza metálica mostrada. Obsérvese los diámetros de esta pieza y del orificio al final de la parte seccionada, respectivamente.

Realizar una investigación sobre el flujo de material durante la deformación del trozo de metal evita defectos y lleva a mejorar el diseño del punzón y del dado. Además, por lo general, la parte se secciona en el plano medio, después se pule y se ataca para presentar el flujo de granos, como se muestra en la figura 15.13 (ver también fig. 14.11).



FIGURA 15.12 Pasos de producción de una bujía extruida en frío. *Fuente:* Cortesía de National Machinery Company.



FIGURA 15.13 Sección transversal de la parte metálica de la figura 15.12 que muestra el patrón de flujo de los granos. *Fuente:* Cortesía de National Machinery Company.

15.4.1 Extrusión por impacto

La *extrusión por impacto* es similar a la extrusión indirecta y con frecuencia el proceso se incluye en la categoría de extrusión en frío. El punzón descende con rapidez sobre la pieza bruta (trozo de metal), que se extruye hacia atrás (fig. 15.14). Debido al volumen constante, el espesor de la sección tubular extruida es función de la holgura entre el punzón y la cavidad de la matriz.

En las figuras 15.15a y b se muestran productos comunes fabricados con este proceso. Otros ejemplos de extrusión por impacto son la producción de tubos plegables (similares a los utilizados para la pasta de dientes), soportes ligeros, partes automotrices y pequeños recipientes a presión. La mayoría de los metales no ferrosos pueden extruirse por impacto en prensas verticales y a altas velocidades de producción de hasta dos piezas por segundo.

El diámetro máximo de las piezas producidas es de alrededor de 150 mm (6 pulgadas). El proceso de extrusión por impacto puede producir secciones tubulares de pared delgada, algunas con relaciones espesor-diámetro hasta de 0.005. Por consiguiente, son importantes la simetría de la parte y la concentricidad del pistón y de la pieza bruta.

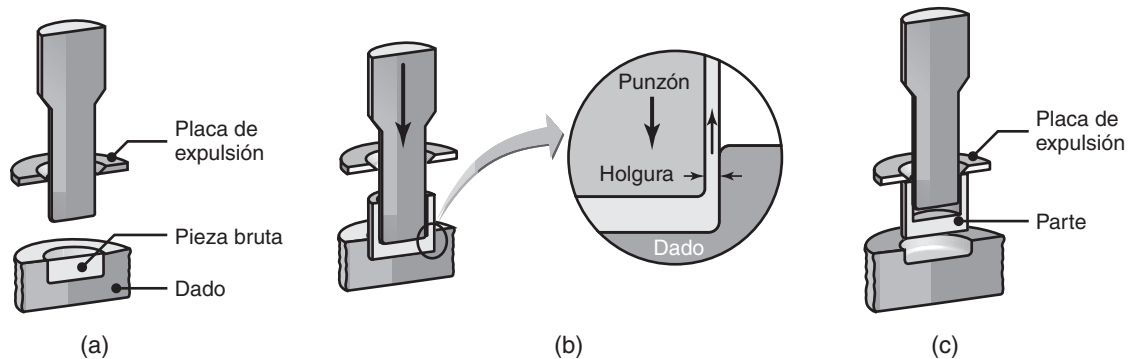


FIGURA 15.14 Esquema del proceso de extrusión por impacto. Las partes extruidas se expulsan mediante el uso de una placa de expulsión, ya que tienden a adherirse al punzón.

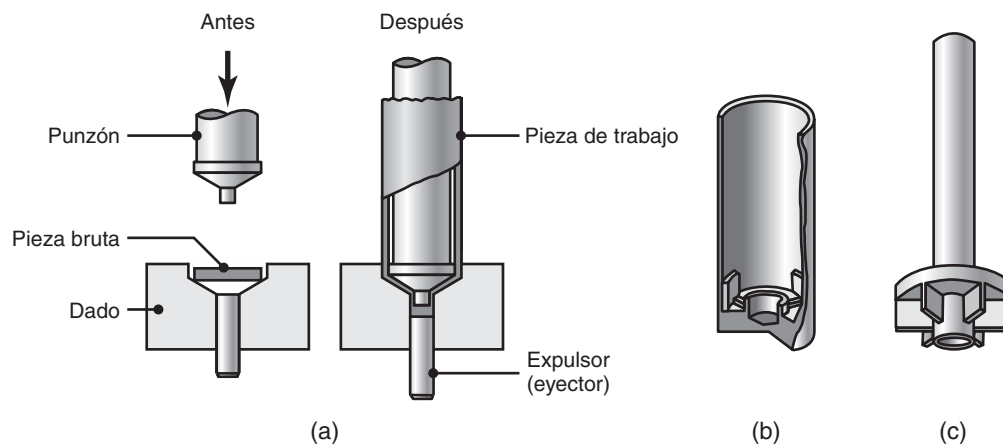


FIGURA 15.15 (a) Extrusión por impacto de un tubo plegable mediante el *proceso Hooker*. (b) y (c) Dos ejemplos de productos fabricados mediante extrusión por impacto. Estas partes también se pueden fabricar mediante fundición, forjado o maquinado. La elección del proceso depende de los materiales utilizados, las dimensiones de la parte y el espesor de pared y las propiedades deseadas del producto. Las consideraciones económicas también son importantes en la selección final del proceso.

15.4.2 Extrusión hidrostática

En la *extrusión hidrostática*, la presión requerida en la cámara se suministra mediante un pistón a través de un medio fluido incompresible que rodea la palanquilla (fig. 15.3b). Por lo general, las presiones son del orden de 1400 MPa (200 ksi). La elevada presión dentro de la cámara transmite parte del fluido a las superficies del dado, donde reduce de manera significativa la fricción. Es común efectuar la extrusión hidrostática a temperatura ambiente, por lo regular mediante aceites vegetales como fluido (en particular aceite de ricino, ya que es un buen lubricante y su viscosidad no se ve muy afectada por la presión).

Por este método se pueden extruir materiales quebradizos, ya que la presión hidrostática (junto con la fricción reducida, el uso de pequeños ángulos de matrices y altas relaciones de extrusión) aumenta la ductilidad del material. También se han extruido alambres largos a partir de una palanquilla de aluminio a temperatura ambiente, con una relación de extrusión de 14,000, lo que significa que una palanquilla de 1 m se convierte en un alambre de 14 km de largo. A pesar del éxito obtenido, la extrusión hidrostática ha tenido aplicaciones industriales limitadas, debido sobre todo a la compleja naturaleza de los herramientas, la experiencia necesaria con presiones elevadas, el diseño de equipo especializado y los largos tiempos requeridos para los ciclos, todo lo cual hace que el proceso sea poco económico.

15.5 Defectos de la extrusión

Dependiendo del material de la pieza de trabajo y de las variables del proceso, los productos extruidos pueden desarrollar diversos tipos de defectos que afectarían de manera significativa su resistencia y su calidad. Algunos defectos pueden percibirse a simple vista, en tanto que otros sólo pueden detectarse mediante las técnicas descritas en la sección 36.10. Existen tres *defectos de extrusión* principales: agrietamiento de la superficie, tubo y agrietamiento interno.

Agrietamiento de la superficie. Si la temperatura de extrusión, la fricción o la velocidad son demasiado elevadas, las temperaturas de la superficie pueden aumentar considerablemente, lo que provocaría que la superficie se agrietase y desgarrase (*agrietamiento de tipo abeto* o *agrietamiento a alta velocidad*). Estas grietas son intergranulares (es decir, a lo largo de los límites de los granos; ver fig. 2.26) y por lo general provocadas por la **fragilización en caliente** (sección 1.4.2). En especial, estos defectos se presentan en aleaciones de aluminio, magnesio y zinc, aunque también pueden ocurrir en aleaciones de alta temperatura. Esta situación se puede evitar si se reducen la temperatura de la palanquilla y la velocidad de extrusión.

La superficie también puede agrietarse a temperaturas inferiores, lo que se ha atribuido a la adhesión periódica del producto extruido a lo largo de la cara del dado. Debido a su apariencia similar a la de la superficie de una vara tipo bambú, se le conoce como **defecto tipo bambú**. Cuando el producto que se está extruyendo se adhiere temporalmente a la cara *del dado* (ver fig. 15.7), la presión de extrusión aumenta con rapidez. Poco después el producto avanza de nuevo y se libera la presión. De este modo, el ciclo se repite de modo continuo, produciendo grietas circunferenciales periódicas en la superficie.

Tubo. El tipo de patrón de flujo del metal en la extrusión mostrada en la figura 15.6c tiende a acumular los óxidos e impurezas de la superficie en el centro de la palanquilla, de manera parecida a la de un embudo. Este defecto se conoce como *tubo*, *tubo de escape* o *cola de pescado*. Es posible que un producto extruido sufra este tipo de defecto hasta en un tercio de su longitud, por lo que debe cortarse como desperdicio. Se puede minimizar la cavidad por contracción si se modifica el patrón de flujo para que sea más uniforme, por ejemplo, mediante el control de la fricción y reduciendo al mínimo los gradientes de temperatura. Otro método consiste en maquinar la superficie de la palanquilla antes de la extrusión para eliminar escamas e impurezas de la superficie. Estas últimas también se pueden eliminar mediante ataque químico de los óxidos de la superficie antes de la extrusión.

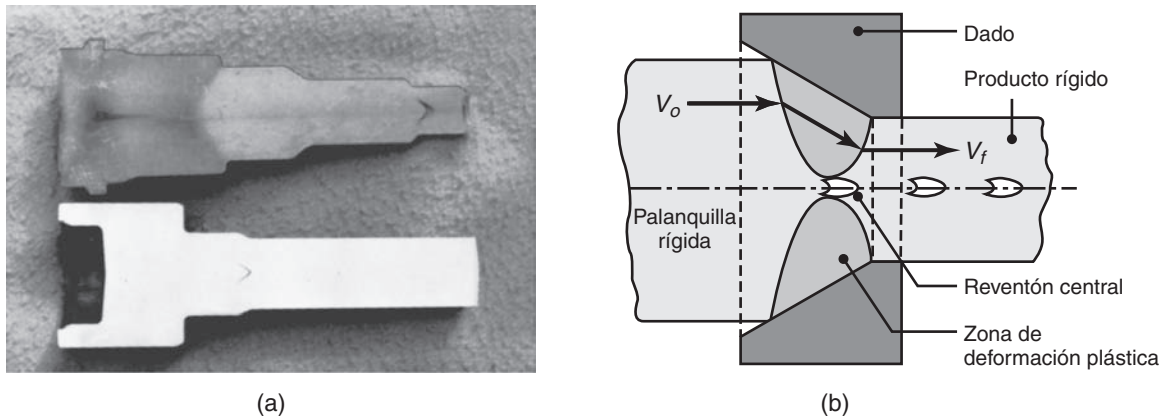


FIGURA 15.16 (a) Agrietamiento en forma de V invertida (reventón central) en barras de acero redondas extruidas. Si los productos no se inspeccionan, los defectos internos pueden continuar sin ser detectados y provocar fallas durante el servicio de la parte. Este defecto también puede desarrollarse en el estirado (trefilado) de barras, alambres y tubos. (b) Esquema de las zonas rígida y plástica en la extrusión. La tendencia al agrietamiento en forma de Chevron o de “V” invertida aumenta si las dos zonas plásticas no se encuentran una a la otra. Obsérvese que la zona plástica se puede hacer más grande disminuyendo el ángulo de la matriz o aumentando la reducción de la sección transversal (o ambas). *Fuente:* B. Avitzur.

Agrietamiento interno. El centro del producto extruido puede desarrollar grietas, conocidas como *agrietamiento central*, *reventón central*, *fractura de punta de flecha* o *agrietamiento tipo Chevron* o *en forma de V invertida* (fig. 15.16a). Estas grietas se atribuyen a un estado de esfuerzo de tensión hidrostática en el eje central de la zona de deformación en la matriz (fig. 15.16b), situación similar a la región de formación del cuello en una probeta de tensión (ver fig. 2.22). Estas grietas también se han observado en la extrusión y el rechazado de tubos (ver figs. 16.43b y c); aparecen en las superficies internas de los tubos. La tendencia al agrietamiento central (a) aumenta con el incremento del ángulo del dado; (b) aumenta al incrementarse la cantidad de impurezas, y (c) disminuye al reducirse la relación de extrusión y la fricción.

15.6 | Equipo para extrusión

El equipo básico para extrusión es una *prensa hidráulica horizontal* (fig. 15.17). Estas prensas (ver también fig. 14.17) son apropiadas para extrusión porque se pueden controlar la carrera y la velocidad de la operación, dependiendo de la aplicación en particular. Son capa-

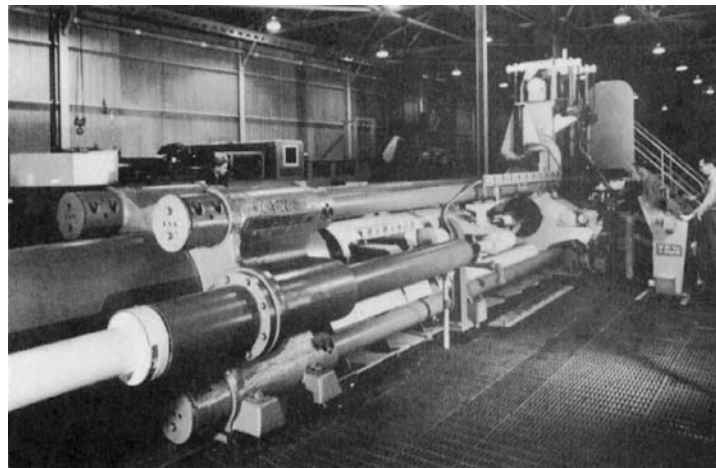


FIGURA 15.17 Vista general de una prensa de extrusión hidráulica de 9 MN (1000 toneladas). *Fuente:* Cortesía de Jones & Laughlin Steel Corporation.

ces de aplicar una fuerza constante en una carrera larga. Por consiguiente, se pueden utilizar palanquillas largas y aumentar así la velocidad de producción. Se han construido prensas hidráulicas con una capacidad de fuerza en el pistón hasta de 120 MN (14,000 toneladas), en particular para la extrusión en caliente de palanquillas de diámetros grandes.

Es común utilizar *prensas hidráulicas verticales comunes* para la extrusión en frío. En general, tienen menos capacidad que las usadas para extrusión en caliente, pero ocupan menos espacio de piso. También se emplean prensas mecánicas de *junta de manivela* o *junta articulada* para la extrusión en frío y para la extrusión por impacto, a fin de producir pequeños componentes en grandes cantidades. Las operaciones de etapas múltiples, en las que el área transversal se reduce por medio de varias operaciones individuales, se realizan en prensas diseñadas especialmente.

15.7 | El proceso de estirado (trefilado)

En el *estirado* se reduce o cambia la sección transversal de una barra o alambre largo, en general jalándola (de ahí el término estirado) a través de un dado conocido como *dado de estirado* (fig. 15.18). Por lo tanto, la diferencia entre el estirado (trefilado) y la extrusión es que en ésta el material se empuja a través de un dado, mientras que en el estirado se jala a través de él. Los productos de barra y alambre abarcan una muy amplia gama de aplicaciones, incluyendo redondos para flechas de transmisión de potencia y movimiento, componentes de máquinas y estructurales, piezas brutas para pernos y remaches, alambre eléctrico, cables, miembros estructurales con carga de tensión, electrodos de soldadura, resortes, sujetadores para papel, rayos para ruedas de bicicleta e instrumentos musicales de cuerda.

Las variables principales de procesamiento en el estirado son similares a las de la extrusión; es decir, la reducción del área transversal, el ángulo del dado, la fricción a lo largo de las interfaces del dado y la pieza de trabajo, así como la velocidad de estirado. El ángulo del dado influye en la fuerza de estirado y la calidad del producto estirado.

Fuerza de estirado. La expresión para la *fuerza de estirado* (F) bajo condiciones ideales y sin fricción es similar a la de la extrusión. Se determina mediante la expresión

$$F = Y_{\text{prom}} A_f \ln \left(\frac{A_o}{A_f} \right) \quad (15.3)$$

en la que Y_{prom} es el esfuerzo real promedio del material en el hueco del dado. Puesto que debe realizarse más trabajo para vencer la fricción, la fuerza aumenta con el incremento de fricción. Además, debido a la deformación no uniforme que ocurre dentro de la zona del dado, también se requiere energía adicional (conocida como *trabajo redundante de deformación*). No obstante que se han desarrollado varias ecuaciones para estimar la fuerza (como se describe de manera más detallada en textos avanzados), una fórmula útil que incluye la fricción y el trabajo redundante es:

$$F = Y_{\text{prom}} A_f \left[\left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) \ln \left(\frac{A_o}{A_f} \right) + \frac{2}{3} \alpha \right] \quad (15.4)$$

en donde α es el ángulo del dado en radianes.

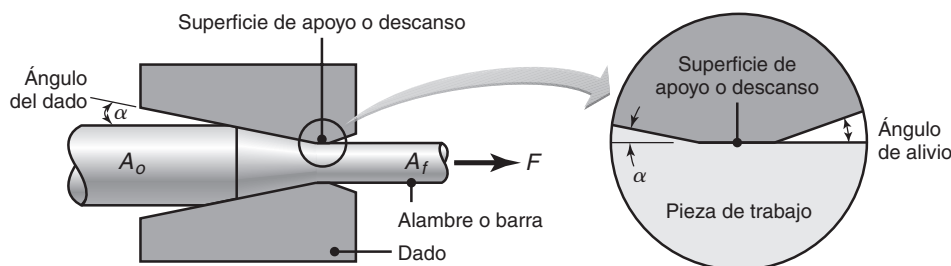


FIGURA 15.18 Variables de proceso en el estirado de alambre. Todo, el ángulo de la matriz, la reducción en el área transversal por pase, la velocidad del estirado, la temperatura y la lubricación, afecta la fuerza de estirado (F).

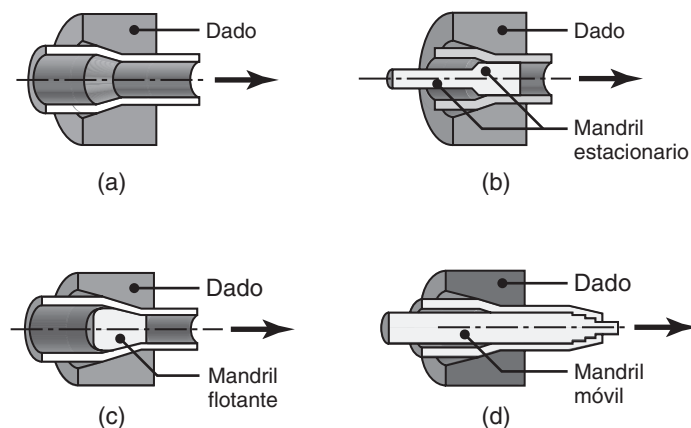


FIGURA 15.19 Ejemplos de operaciones de estirado de un tubo, con mandril interno y sin él. Obsérvese que se puede producir una variedad de diámetros y espesores de pared del mismo tubo inicial (que se ha fabricado mediante otros procesos).

Como se puede ver en estas ecuaciones, la fuerza de estirado aumenta al incrementarse la reducción. Sin embargo, tiene que limitarse la magnitud de la fuerza, porque cuando el esfuerzo de tensión alcanza el esfuerzo de fluencia del metal que se está estirando, la pieza de trabajo cede y finalmente se rompe. Se puede demostrar que, en teoría y sin fricción, la reducción máxima en el área transversal por pase es de 63%. Así que, por ejemplo, una barra de 10 mm de diámetro puede reducirse (como máximo) a un diámetro de 6.1 mm en un solo pase sin que se rompa.

Se puede demostrar que, para cierta reducción de diámetro y cierta condición de fricción, existe un *ángulo óptimo del dado* en el que la fuerza de estirado es mínima. Esto no significa que el proceso deba efectuarse en este ángulo óptimo, porque existen otras consideraciones de calidad en los productos.

Estirado de otras formas. Se pueden producir varias secciones transversales sólidas mediante el estirado a través de dados con diferentes perfiles. El diseño apropiado del dado y la selección adecuada de la secuencia de reducción por pase requieren bastante experiencia para garantizar el flujo apropiado del material en el dado, reducir los defectos internos o externos y mejorar la calidad de la superficie.

El espesor de pared, el diámetro o la forma de los tubos que se han producido por extrusión u otros procesos descritos en este libro se pueden reducir más mediante procesos de *estirado de tubos* (fig. 15.19). Los tubos de diámetros grandes, hasta de 0.3 m (12 pulgadas), pueden estirarse por medio de estas técnicas. Para estas operaciones existen mandriles con diversos perfiles.

Los *dados en forma de cuña* se utilizan para el estirado de cintas planas y sólo se usan en aplicaciones específicas. Sin embargo, el principio de este proceso es el mecanismo básico de deformación del **planchado**, que se emplea ampliamente en la fabricación de latas de aluminio para bebidas, como se muestra en la figura 16.31.

15.8 | Práctica de estirado

Como en todos los procesos de trabajo de los metales, el éxito del estirado requiere la selección cuidadosa de los parámetros del proceso. En el estirado, la reducción de área transversal por pase llega hasta casi 45%. Por lo general, cuanto más pequeña es la sección transversal inicial, más pequeña será la reducción por pase. Es común estirar alambres finos a una reducción de 15% a 25% por pase, y los tamaños mayores, de 20% a

45%. Las reducciones de más de 45% pueden provocar la separación del lubricante, deteriorando el acabado superficial. A pesar de que la mayor parte del estirado se realiza a temperatura ambiente, el estirado de secciones grandes sólidas o huecas puede efectuarse a temperaturas elevadas para reducir las fuerzas.

También se puede hacer una leve reducción (**pase de dimensionado**) en barras para mejorar el acabado superficial y la precisión dimensional. Sin embargo, debido a que sólo deforman las capas de la superficie, por lo general estas reducciones leves producen deformación muy poco uniforme del material y su microestructura. Por lo tanto, las propiedades del material varían según su localización en la sección transversal.

Obsérvese en la figura 15.18 que la punta de una barra o alambre debe tener una sección transversal reducida para que se alimente a través de la abertura del dado y se jale. Por lo general, esto se realiza *estampando* la punta de la barra o alambre de manera similar a la mostrada en las figuras 14.15a y b; a esta operación se le conoce como *punteado*. Las velocidades de estirado dependen del material y de la reducción del área transversal. Éstas pueden variar de 1 a 2.5 m/s (200 a 500 pies/min) para secciones gruesas, hasta 50 m/s (165 pies/s) para alambre muy fino, como el usado en electromagnetos. Debido a que el producto no tiene tiempo suficiente para disipar el calor generado, las temperaturas pueden aumentar sustancialmente a altas velocidades de estirado y perjudicar la calidad del producto.

Los alambres de cobre y latón estirados se designan conforme a su *temple* (como 1/4 de dureza, 1/2 de dureza, etc.), debido al endurecimiento por trabajo. Puede ser necesario un recocido intermedio entre pases para mantener una ductilidad suficiente del material durante el estirado en frío. Los alambres de acero al alto carbono para resortes e instrumentos musicales se fabrican mediante tratamiento térmico (patentado o **temple isotérmico**) del alambre estirado; la microestructura obtenida es perlita fina (ver fig. 4.11). Estos alambres tienen resistencias máximas a la tensión hasta de 5 GPa (700 ksi) y una reducción tensil del área de casi 20%.

Estirado múltiple. A pesar de que mediante el estirado se puede producir alambre muy fino, el costo resultaría muy alto. Un método empleado para aumentar la productividad consiste en estirar muchos alambres (100 o más) de modo simultáneo, esto es, en forma *múltiple*. Los alambres se separan uno del otro mediante un material metálico adecuado con propiedades similares, pero con menor resistencia química (de manera que pueda extraerse por lixiviación de las superficies del alambre estirado).

El estirado múltiple produce alambres cuya sección transversal es poligonal más que redonda. Además de las longitudes continuas, se han desarrollado técnicas para fabricar alambre fino que se rompe o recorta a diversos tamaños y formas. Estos alambres se utilizan como plásticos eléctricamente conductivos, textiles resistentes al calor y eléctricamente conductivos, medios de filtrado, camuflaje contra radares e implantes médicos. Pueden ser tan pequeños como 4 μm (0.00016 pulgada) de diámetro y producirse a partir de materiales como el acero inoxidable, titanio y aleaciones de temperaturas elevadas.

Diseño de los dados. En la figura 15.20 se muestran los rasgos característicos de un dado común para estirado. Los ángulos del dado van de 6° a 15°. Sin embargo, obsérvese que en un dado típico existen dos ángulos (de entrada y de aproximación). El diseño básico para este tipo de dados se ha desarrollado durante muchos años de ensayo y error. El propósito de la superficie de soporte (*descanso o cara interior*) es establecer el diámetro final del producto (*dimensionado*). Además, cuando se rectifica de nuevo un dado desgastado, la cara interior mantiene la dimensión de salida de la abertura del dado.

Para el **estirado de perfiles** se requiere una serie de dados que comprende diversas etapas de deformación, a fin de producir el perfil final. Los dados se pueden hacer de una sola pieza o (según la complejidad del perfil transversal) con varios segmentos, que se mantienen unidos dentro de un anillo de sujeción. Se están implantando técnicas de diseño asistidas por computadora a fin de diseñar dados para un flujo suave de material a través de ellos, así como para minimizar los defectos. También se puede utilizar una serie de rodillos

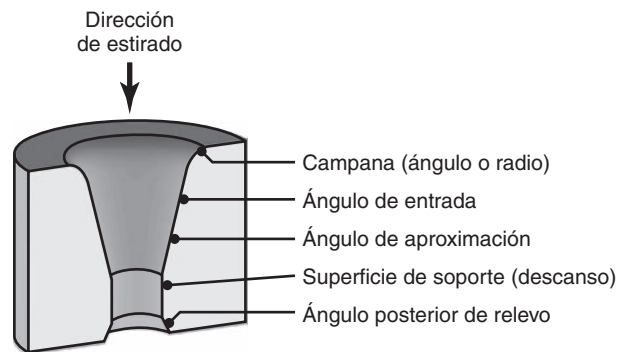


FIGURA 15.20 Terminología de un dado común utilizada para estirar una barra o un alambre redondo.

libres (locos), o de forma, para estirar barras redondas o de diversas formas. Dicho arreglo (*cabeza de turco*) es más versátil que los dados ordinarios de estirado, debido a que los rodillos se pueden ajustar a diferentes posiciones y ángulos para perfiles específicos.

Materiales para dados. Por lo general, los materiales de los dados para estirado (tabla 5.7) son aceros grado herramientas y carburos. Para el estirado en caliente se utilizan dados de acero fundido, por su alta resistencia al desgaste a temperaturas elevadas. Los dados de diamante se emplean para el estirado de alambre fino con diámetros que van de $2\ \mu\text{m}$ a $1.5\ \text{mm}$ (0.0001 a 0.06 pulgada); pueden ser de diamante monocristalino, o en forma policristalina con partículas de diamante en una matriz metálica (*compactos*). Debido a su falta de resistencia a la tensión y tenacidad, los dados de carburo y de diamante se utilizan comúnmente como **insertos** u **pastillas**, que se apoyan en un portainsero de acero (fig. 15.21).

Lubricación. La lubricación adecuada es fundamental en el estirado para mejorar la vida de los dados y el acabado superficial del producto, además de reducir las fuerzas y la temperatura del estirado. La lubricación es crítica, sobre todo en el estirado de tubos, debido a la dificultad para mantener una película de lubricante lo suficientemente gruesa en la interfaz mandril-tubo. En el estirado de barras, un método típico de lubricación utiliza recubrimientos de fosfato (ver sección 15.4).

A continuación se describen los métodos básicos de lubricación utilizados en el estirado de alambre (ver también el capítulo 33):

- **Estirado en húmedo**, en el que los dados y la barra se sumergen por completo en el lubricante.
- **Estirado en seco**, en el que la superficie de la barra a estirar se recubre con un lubricante al pasarla a través de una caja llena con lubricante (caja de aditivos).

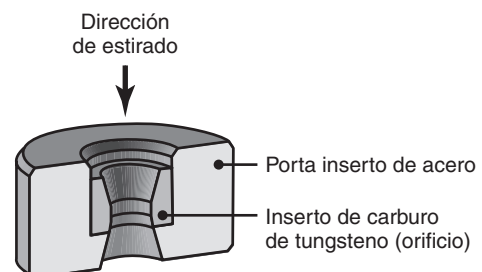


FIGURA 15.21 Inserto de matriz de carburo de tungsteno en un portainsero de acero. Los dados de diamante utilizados en el estirado de alambre delgado se soportan de manera similar.

- **Revestimiento metálico**, en el que la barra o el alambre se recubre con un metal blando, como cobre o estaño, que actúa como lubricante sólido.
- **Vibración ultrasónica** de los dados y los mandriles, en el que las vibraciones reducen las fuerzas, mejoran el acabado superficial y la vida del dado, y permiten reducciones más grandes por pase sin rompimientos.

15.9 Defectos del estirado y esfuerzos residuales

Los defectos típicos en una barra o un alambre estirado son similares a los observados en la extrusión, en particular el agrietamiento central (ver fig. 15.15). Otro tipo principal de defecto en el estirado son los **traslapes**, raspaduras o dobleces longitudinales en el material que se pueden abrir durante operaciones posteriores de formado (como recalado, cabeceado, laminación de roscas o doblado de barra o alambre) y pueden provocar serios problemas en el control de calidad. Muchos otros defectos de la superficie (como raspaduras y marcas de dado) también pueden originarse de la selección inadecuada de los parámetros del proceso, lubricación deficiente o una condición deficiente del dado.

Dado que se someten a deformación irregular durante el estirado, por lo general los productos estirados en frío tienen *esfuerzos residuales*. Para reducciones leves, de sólo un pequeño porcentaje, los esfuerzos residuales de la superficie longitudinal son de compresión (en tanto que el centro se encuentra a tensión) y por lo tanto se mejora la resistencia a la fatiga. Por el contrario, las reducciones mayores inducen esfuerzos de tensión de la superficie (en tanto que el centro se encuentra a compresión). Los esfuerzos residuales pueden ser significativos y causar agrietamiento por esfuerzo-corrosión de la parte durante cierto periodo. Además, hacen que el componente se *combe* si posteriormente se retira una capa de material (ver fig. 2.30), ya sea por rasurado, maquinado o rectificado.

Las barras y los tubos que no son suficientemente rectos (o se suministran en rollo) pueden enderezarse pasándolos a través de un arreglo de rodillos colocados en diferentes ejes, proceso similar al nivelado por rodillos (ver fig. 13.7).

15.10 Equipo para estirado

A pesar de que existen diversos diseños, el equipo para estirado es básicamente de dos tipos: banco de estirado y de tambor.

El **banco de estirado** contiene un dado simple y su diseño es similar al de una larga máquina horizontal de ensayos de tensión (fig. 15.22). La fuerza de estirado la propor-

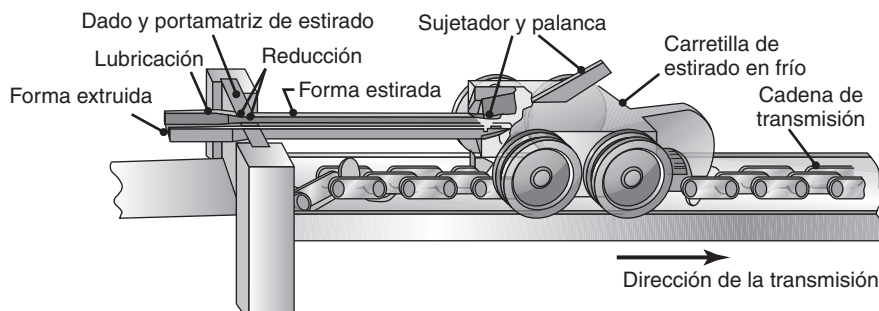


FIGURA 15.22 Estirado en frío de un canal extruido en un banco de estirado para reducir su sección transversal. Por este método se estiran tramos individuales de barras rectas o de secciones transversales.

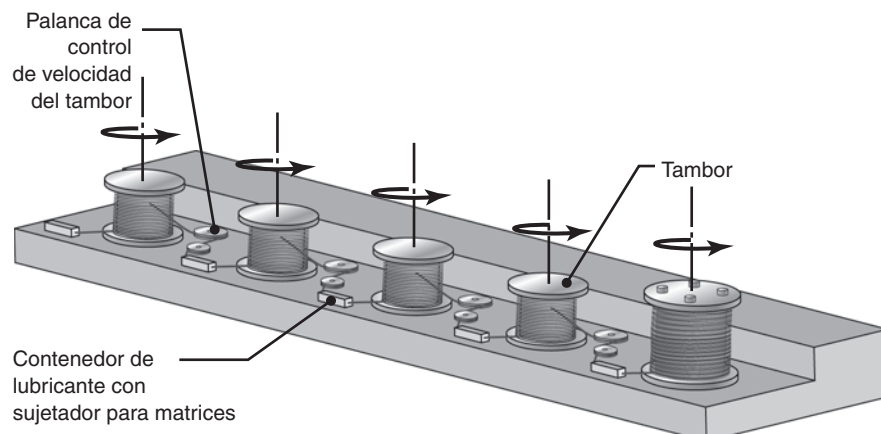


FIGURA 15.23 Ilustración de estirado de alambre de etapas múltiples, utilizadas comúnmente para producir alambre de cobre para cableado eléctrico. *Fuente:* H. Auerswald.

ciona una transmisión de cadena o se acciona hidráulicamente. Los bancos de estirado se utilizan para el estirado de una sola longitud de barras y tubos rectos con diámetros mayores a 20 mm (0.75 pulgada) y longitudes hasta de 30 m (100 pies). Las capacidades de las máquinas alcanzan 1.3 MN (300 klb) de fuerza de jalado con velocidades que van de 6 a 60 m/min (20 a 200 pies/min).

Las barras y el alambre muy largos (de muchos kilómetros) y el alambre de secciones transversales más pequeñas, por lo general de menos de 13 mm (0.5 pulgadas), se estiran por medio de un **tambor** giratorio (**polea grande** o **cabrestante**, fig. 15.23). La tensión en esta configuración proporciona la fuerza requerida para estirar el cable, por lo general mediante matrices múltiples (*estirado compuesto*).

RESUMEN

- La extrusión es el proceso en el que se fuerza una palanquilla a través de un dado para reducir su sección transversal o producir diversas secciones transversales sólidas o huecas. Por lo general, este proceso se efectúa a temperaturas elevadas para reducir las fuerzas y mejorar la ductilidad del material.
- Factores importantes en la extrusión son el diseño del dado, la relación de extrusión, la temperatura de la palanquilla, la lubricación y la velocidad de extrusión. Aunque el término “extrusión en frío” se aplica a la extrusión a temperatura ambiente, también es el nombre dado a una combinación de operaciones de extrusión y forjado. La extrusión en frío es capaz de producir económicamente partes discretas de diversas formas, con buenas propiedades mecánicas y tolerancias dimensionales.
- El estirado de barras, alambres y tubos comprende básicamente el proceso de jalar el material a través de un dado, o una serie de dados o matrices compuestas. Las secciones transversales de la mayoría de los productos estirados son redondas, aunque también se pueden estirar otras formas. El estirado de productos tubulares para reducir su diámetro o su espesor requiere por lo general mandriles internos.
- El diseño de los dados, la reducción del área transversal por pase y la selección de materiales para matrices y lubricantes son parámetros importantes para fabricar productos estirados de alta calidad, con un buen acabado superficial. Tanto en la extrusión como en el estirado pueden desarrollarse defectos externos e internos (agrietamiento en forma de Chevron o “V” invertida). Su minimización o prevención depende sobre todo del ángulo del dado, la reducción por pase y la calidad del material de la pieza de trabajo.

TÉRMINOS CLAVE

Agrietamiento central	Dado corte	Extrusión en frío
Agrietamiento de alta velocidad	Dado de araña	Extrusión hidrostática
Agrietamiento de tipo abeto	Dado tipo ojo de buey	Extrusión por impacto
Agrietamiento de tipo Chevron en forma de “V” invertida	Dado tipo puente	Pase de dimensionado
Alambre	Defecto de tubo	Patentado (temple isotérmico)
Banco de estirado	Defecto tipo bambú	Planchado
Barra	Defectos de extrusión	Polea grande
Cabeza de turco	Encamisado	Proceso Séjournet
Cabrestante	Enlatado	Relación de extrusión
Constante de extrusión	Estirado	Zona de metal muerto
Costura	Estirado múltiple	
	Extrusión	

BIBLIOGRAFÍA

- Altan, T., Ngaile, G. y Shen, G. (eds.), *Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications*, ASM International, 2004.
- ASM Handbook, Vol. 14: *Forming and Forging*, ASM International, 1988.
- Blazynski, T. Z., *Plasticity and Modern Metal-forming Technology*, Elsevier, 1989.
- Hosford, W. F. y Caddell, R. M., *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*, 2a. ed., Prentice Hall, 1993.
- Inoue, N. y Nishihara, M. (eds.), *Hydrostatic Extrusion: Theory and Applications*, Elsevier, 1985.
- Lange, K. (ed.), *Handbook of Metal Forming*, McGraw-Hill, 1985.
- Laue, K. y Stenger, H., *Extrusion—Processes, Machinery, Tooling*, ASM International, 1981.
- Michaeli, W., *Extrusion Dies*, 2a. ed., Hanser, 1992.
- Nonferrous Wire Handbook*, 2 vols. The Wire Association International, Inc., 1977 y 1981.
- Sheppard, T., *Extrusion of Aluminum Alloys*, Chapman & Hall, 1997.

PREGUNTAS DE REPASO

- 15.1 ¿En qué se diferencia la extrusión de los procesos de laminado y forjado?
- 15.2 ¿Cuál es la diferencia entre extrusión y estirado?
- 15.3 ¿Qué es un dado de araña? ¿Para qué se utiliza?
- 15.4 ¿Por qué a veces los alambres se estiran de manera múltiple?
- 15.5 ¿Qué es una zona de metal muerto?
- 15.6 Defina: (a) revestimiento, (b) bloque de apoyo o ficticio, (c) dados de corte, (d) costura, y (e) enlatado.
- 15.7 ¿Por qué el vidrio es un buen lubricante en la extrusión en caliente?
- 15.8 Explique por qué la extrusión en frío es un proceso importante de manufactura.
- 15.9 ¿Qué tipos de defectos pueden ocurrir en: (a) la extrusión, y (b) el estirado?
- 15.10 ¿Cuál es la diferencia entre extrusión directa e inversa?
- 15.11 ¿Qué es un descanso o cara interna del dado de trefilado? ¿Cuál es su función en un dado?
- 15.12 ¿Cómo son los tubos extruidos? ¿También se pueden estirar? Explique su respuesta.
- 15.13 ¿Es posible extruir engranes rectos y engranes cónicos? ¿Qué procesamiento adicional sería necesario?
- 15.14 ¿Qué materiales se utilizan para fabricar dados para extrusión?
- 15.15 ¿Cuál es la diferencia entre el defecto de tubo y el defecto tipo bambú?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

15.16 Explique por qué la extrusión es un proceso por lotes o semicontinuo. ¿Cree que se puede volver un proceso continuo? Explique su respuesta.

15.17 Explique las diferentes maneras por las cuales el cambio del ángulo del dado afecta el proceso de extrusión.

15.18 El vidrio es un buen lubricante en la extrusión en caliente. ¿También utilizaría vidrio para el forjado por matriz de impresión?

15.19 ¿Cómo haría para evitar los defectos de agrietamiento central en la extrusión? Explique por qué serían efectivos sus métodos.

15.20 ¿Cuál es el propósito de una placa de extracción en la extrusión por impacto?

15.21 En la tabla 15.1 se dan los intervalos de temperatura para la extrusión de diversos metales. Describa las posibles consecuencias de extruir a una temperatura: (a) por debajo, y (b) por encima de estos intervalos.

15.22 ¿Varía la fuerza en la extrusión directa conforme la palanquilla se vuelve más corta? Si es así, ¿por qué?

15.23 Comente el significado de los patrones de flujo de los granos, como los mostrados en la figura 15.6.

15.24 ¿En qué aplicaciones podría utilizar el tipo de partes extruidas por impacto que se muestran en la figura 15.14?

15.25 ¿Se pueden fabricar engranes de dientes rectos por medio de: (a) estirado, y (b) extrusión? ¿Se pueden fabricar los engranes helicoidales? Explique su respuesta.

15.26 Ya vimos en el capítulo 13 que aplicar tensión trasera en el laminado reduce la fuerza de laminado. ¿Qué ventajas tendría, en su caso, la aplicación de una tensión semejante en el estirado de barras y alambre? Explique su respuesta.

15.27 ¿Cómo prepararía el extremo de un alambre para que fuera posible alimentarlo a través de una matriz, de manera que se pueda comenzar una operación de estirado?

15.28 ¿Cuál es el propósito de un bloque de apoyo en la extrusión?

15.29 Describa sus observaciones en relación con la figura 15.8.

15.30 En ocasiones, el estirado de alambre de acero se realiza dentro de una envoltura de un metal blando, como cobre o plomo. ¿Por qué sería útil esta envoltura?

15.31 ¿Cuáles son las ventajas del estirado múltiple?

15.32 ¿En qué circunstancias es preferible la extrusión indirecta a la extrusión directa?

15.33 ¿Por qué la lubricación es perjudicial cuando se extruye con un dado tipo ojo de buey?

15.34 ¿Cuál es el propósito de un revestimiento de contenedor en la extrusión directa? (Ver fig. 15.1).

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

15.35 Estime la fuerza requerida para la extrusión de latón 70-30 a 700 °C, si el diámetro de la palanquilla es de 125 mm y la relación de extrusión es 20.

15.36 Suponiendo un proceso ideal de estirado, ¿cuál es el diámetro final más pequeño al que se puede estirar una barra de 100 mm de diámetro?

15.37 Si incluye la fricción en el problema 15.36, ¿sería diferente el diámetro final? Explique su respuesta.

15.38 Calcule la fuerza de extrusión para una palanquilla redonda de 200 mm de diámetro, hecha de acero inoxidable y extruida a 1000 °C para un diámetro de 50 mm.

15.39 Demuestre que para un material plástico perfecto con un esfuerzo de fluencia (Y) y en condiciones sin fricción, la presión (p) en extrusión directa es

$$p = Y \ln \left(\frac{A_o}{A_f} \right)$$

15.40 Demuestre que para las mismas condiciones indicadas en el problema 15.39, el esfuerzo de estirado (σ_d) en el estirado de alambre es

$$\sigma_d = Y \ln \left(\frac{A_o}{A_f} \right)$$

15.41 Grafique las ecuaciones dadas en los problemas 15.39 y 15.40 en función del porcentaje de reducción del área de la pieza de trabajo. Describa sus observaciones.

15.42 Una operación de extrusión planeada comprende acero a 1000 °C con un diámetro inicial de 120 mm y un diámetro final de 20 mm. Existen dos prensas para la operación, una con capacidad de 20 MN y la otra con capacidad de 10 MN. ¿Es suficiente la prensa más pequeña para esta operación? Si no es así, ¿qué recomendaciones haría para permitir el uso de la prensa más pequeña?

15.43 Un alambión hecho de un material perfectamente plástico con un esfuerzo de fluencia de 30,000 psi se está estirando de un diámetro de 0.1 a 0.07 pulgada en un dado de estirado de 15°. Considérese que el coeficiente de fricción es 0.1. Utilizando las ecuaciones 15.3 y 15.4, estime la fuerza de estirado requerida. Comente las diferencias en su respuesta.

15.44 Utilice el problema 15.43, pero para acero inoxidable 304 (ver la tabla 2.3).

15.45 Suponga que es un instructor que cubre los temas descritos en este capítulo y está haciendo un examen sobre los diversos aspectos para poner a prueba los conocimientos de los estudiantes. Elabore dos problemas cuantitativos y proporcione las respuestas.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

15.46 Suponga que es director técnico de asociaciones comerciales de: (a) extrusores, y (b) operaciones de estirado de barra y alambre. Prepare un folleto técnico para clientes potenciales que indique todas las ventajas de estos procesos, respectivamente.

15.47 Suponga que falta el resumen de este capítulo. Escriba un resumen de una página sobre los aspectos importantes del proceso de estirado de alambre.

15.48 Revise la literatura técnica y haga una lista detallada de los pasos de fabricación comprendidos en la manufactura de agujas hipodérmicas metálicas comunes.

15.49 En la figura 15.2 se muestran ejemplos de partes discretas que pueden producirse cortando extrudidos como piezas individuales. Nombre otros productos que se pueden fabricar de manera similar.

15.50 Estudie la literatura técnica y explique cómo se pueden aplicar vibraciones externas al estirado de alambre para reducir la fricción. También comente las posibles direcciones de vibración, como longitudinal o torsional.

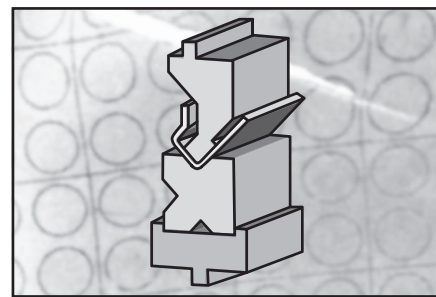
15.51 Un juguete popular para niños es una prensa de extrusión en miniatura que utiliza una pasta o masa blanda para producir diversas formas. Consiga dicho juguete y demuestre los defectos superficiales que se pueden desarrollar.

15.52 En el estudio de caso 14.2 sobre soportes de suspensiones en el capítulo 14, se indicaba que había una mejora significativa del costo utilizando forjas en lugar de extrusiones. Liste y explique las razones por las que considera que fueron posibles estos ahorros en los costos.

15.53 Se indicó que en el estirado múltiple, los alambres producidos tenían una sección transversal poligonal más que redonda. Produzca algunas piezas delgadas de arcilla redonda, o consiga espagueti cocido, sujételas todas juntas y comprímalas radialmente sobre un soporte adecuado, de manera similar a apretarse el cinturón. Comente las formas producidas.

CAPÍTULO 16

Proceso de formado de hojas metálicas



16.1	Introducción	424
16.2	Cizallado	425
16.3	Características y formabilidad de las hojas metálicas	435
16.4	Pruebas de formabilidad para hojas metálicas	437
16.5	Doblado de hojas, placas y tubos	440
16.6	Operaciones diversas de doblado y otras relacionadas	445
16.7	Embutido profundo	451
16.8	Formado con hule	460
16.9	Rechazado	461
16.10	Formado superplástico	463
16.11	Procesos especializados de formado	465
16.12	Manufactura de estructuras metálicas tipo panel	470
16.13	Consideraciones de diseño en el formado de hojas metálicas	471
16.14	Prensas de formado de hojas metálicas	474
16.15	Economía de las operaciones de formado de hojas metálicas	476

EJEMPLOS:

16.1	Cálculo de la fuerza de punzonado	428
16.2	Hoja metálica soldada a la medida para aplicaciones automotrices	431
16.3	Manufactura de fuelles	450
16.4	Manufactura de latas para alimentos y bebidas	458
16.5	Aplicaciones del formado superplástico/unión por difusión	465

ESTUDIO DE CASO:

16.1	Manufactura de platillos musicales	468
------	------------------------------------	-----

En este capítulo se describen las características importantes de las hojas metálicas y de los procesos de manufactura empleados para producir numerosos productos laminados. Los temas cubiertos incluyen:

- Propiedades materiales específicas de las hojas metálicas que afectan su formabilidad.
- Las operaciones de cizallado en las que se cortan piezas en bruto a partir de grandes hojas y cintas.
- Varias operaciones de doblado para hojas, placas y tubos.
- Los fundamentos de las operaciones de formado, entre ellas el formado por estirado, con hule, por martillado, abombado, rechazado y superplástico.
- El embutido profundo y planchado para la producción de contenedores de pared delgada.
- Diseño y consideraciones económicas para el formado de las hojas metálicas.

Productos comúnmente fabricados mediante el formado de hojas metálicas: carrocerías automotrices, muebles de oficina, artículos electrodomésticos, fuselajes para aviones, tractocamiones, tanques de combustible y artículos de cocina.

Procesos alternativos: fundición a presión en matriz (o dado) (partes relativamente pequeñas, con paredes delgadas), termoformado.

16.1 | Introducción

Los productos fabricados con **hojas metálicas** están a nuestro alrededor. Incluyen una amplia gama de objetos de consumo e industriales, como latas para bebidas, artículos de cocina, archiveros, escritorios metálicos, aparatos electrodomésticos, carrocerías automotrices, tractocamiones y fuselajes para aviones (fig. 16.1). El formado de hojas data del año 5000 a.C., cuando se fabricaron utensilios domésticos y joyería mediante el martillado y estampado de oro, plata y cobre. En comparación con las fabricadas por fundición y por forjado, las partes de hojas metálicas ofrecen las ventajas de su ligereza y versatilidad.

Como se describe a lo largo de este capítulo, existen numerosos procesos para hacer partes con hojas metálicas. Sin embargo, el término **trabajo de prensado** o **formado por prensado** se utiliza comúnmente en la industria para describir las operaciones generales de formado de hojas, ya que se realizan en *prensas* (descritas en las secciones 14.8



FIGURA 16.1 Ejemplos de partes de hojas metálicas. (a) Partes estampadas, (b) partes producidas mediante rechazado. Fuente: (a) Cortesía de Williamsburg Metal Spinning & Stamping Corp.

y 16.14) mediante juegos de matrices o dados. A las partes producidas en las prensas con hojas metálicas se les llama *estampados* (de la palabra *estampa*, usada por primera vez alrededor del año 1200 d.C., que significa “forzar hacia abajo” o “machacar”). Obsérvese que éste es un término similar a *forjado* o *fundición*, que suelen emplearse para describir partes producidas mediante esos procesos individuales utilizando matrices o moldes, respectivamente.

El acero al bajo carbono es la hoja metálica de mayor uso por su bajo costo y sus características de resistencia y formabilidad, en general buenas. El aluminio es el material que más se utiliza al transformar las hojas metálicas en latas para bebidas, empaques, utensilios de cocina y aplicaciones para resistencia a la corrosión. Los materiales metálicos que más se aplican en aeronaves y naves espaciales son el aluminio y el titanio, aunque han sido reemplazados de manera creciente con materiales compósitos, como se señala en los capítulos 9 y 19.

En este capítulo primero se describen los métodos por medio de los cuales se cortan piezas en bruto de grandes rollos de hojas metálicas, que después se procesan para darles las formas deseadas mediante una amplia variedad de métodos. Este capítulo también incluye discusiones acerca de las características de las hojas metálicas, las técnicas empleadas para determinar su formabilidad y la construcción de diagramas de límites de formado. Se describen además todos los procesos importantes de formado de hojas y el equipo utilizado para fabricar productos de láminas metálicas (como se indica en la tabla 16.1).

16.2 | Cizallado

Para fabricar una parte con una hoja metálica, se retira una *pieza en bruto* de dimensiones adecuadas de una hoja más grande (por lo general un rollo) mediante el *cizallado*. Esta lámina se corta sometiendo a esfuerzos de corte con un punzón y una matriz (fig. 16.2a). En las figuras 16.2b y c se muestran las características típicas de las orillas cizalladas de la hoja y de la masa restante, respectivamente. Nótese que estas orillas no son lisas ni perpendiculares al plano de la hoja.

Por lo general, el cizallado se inicia con la formación de grietas en las orillas superior e inferior de la pieza de trabajo (en los puntos A y B, y C y D de la fig. 16.2a). Al fi-

TABLA 16.1

Características generales de los procesos de formado de hojas metálicas (en orden alfabético)	
Proceso de formado	Características
Embutido	Partes de poca o mucha profundidad con formas relativamente simples, altas capacidades de producción, costos elevados de herramental y equipo.
Por explosión	Hojas (láminas) grandes con formas relativamente simples, bajos costos de herramental pero con costos elevados de mano de obra, producción de cantidades pequeñas, tiempos largos de ciclo.
Por pulso magnético	Operaciones de formado de poca profundidad, abombado y repujado en hojas de resistencia relativamente baja, requiere herramental especial.
Martillado	Contornos de poca profundidad en hojas grandes, flexibilidad de operación, costos de equipo generalmente elevados, el proceso también se utiliza para enderezar partes formadas.
Laminado	Partes largas con secciones transversales constantes simples o complejas, buen acabado superficial, altas capacidades de producción, costos elevados de herramental.
Con hule	Embutido y repujado de formas simples o relativamente complejas, superficie de la hoja protegida mediante membranas de hule, flexibilidad de operación, bajos costos de herramental.
Rechazado	Partes asimétricas pequeñas o grandes, buen acabado superficial, bajos costos de herramental, pero los costos de mano de obra pueden ser elevados, a menos que se automatice la operación.
Estampado	Incluye una amplia variedad de operaciones, como punzonado, troquelado, repujado, doblado, rebordado y acuñado; las formas simples o complejas se forman a altas capacidades de producción; los costos del herramental y del equipo pueden ser altos, pero el costo de la mano de obra es bajo.
Estiramiento	Partes grandes con contornos poco profundos, producción en cantidades bajas, costos elevados de mano de obra, los costos del herramental y del equipo aumentan con el tamaño de la pieza.
Superplástico	Formas complejas, detalles finos y tolerancias dimensionales cerradas, tiempos largos de formado (de ahí que las capacidades de producción sean bajas), las partes no son adecuadas para uso en alta temperatura.

nal, estas grietas se encuentran una con otra y ocurre la separación completa. Las *superficies* rugosas de *fractura* se deben a estas grietas; las *superficies pulidas*, lisas y brillantes en el orificio y en la masa son el resultado del contacto y roce de la orilla cizallada contra las paredes del punzón y de la matriz, respectivamente.

Los principales parámetros del proceso de cizallado son:

- La forma del punzón y de la matriz.
- La velocidad del punzonado.
- La lubricación.
- La **holgura** (*c*) entre el punzón y la matriz.

La holgura es un factor importante para determinar la forma y calidad de la orilla cizallada. Al aumentar la holgura, la zona de deformación (fig. 16.3a) se vuelve más grande y la orilla cizallada más rugosa. La hoja tiende a ser jalada hacia la región de la holgura, y el perímetro, u orillas de la zona cizallada, se torna más rugoso. A menos que dichas orillas sean aceptables tal como se producen, pueden requerirse operaciones secundarias a fin de hacerlas más lisas (lo que incrementa el costo de producción).

La calidad de la orilla se mejoraría aumentando la velocidad del punzón; ésta puede llegar a ser de 10 a 12 m/s (30 a 40 pies/s). Como se muestra en la figura 16.3b, los ejes cizallados pueden sufrir un severo trabajado en frío debido a los grandes esfuerzos de corte involucrados. El endurecimiento por trabajo de las orillas reduce su ductilidad y daña la formabilidad de la hoja durante las operaciones posteriores, como el doblado y el estirado.

La relación del área bruñida contra las zonas rugosas a lo largo de la orilla cizallada (*a*) aumenta al incrementarse la ductilidad de la hoja metálica, y (*b*) disminuye al au-

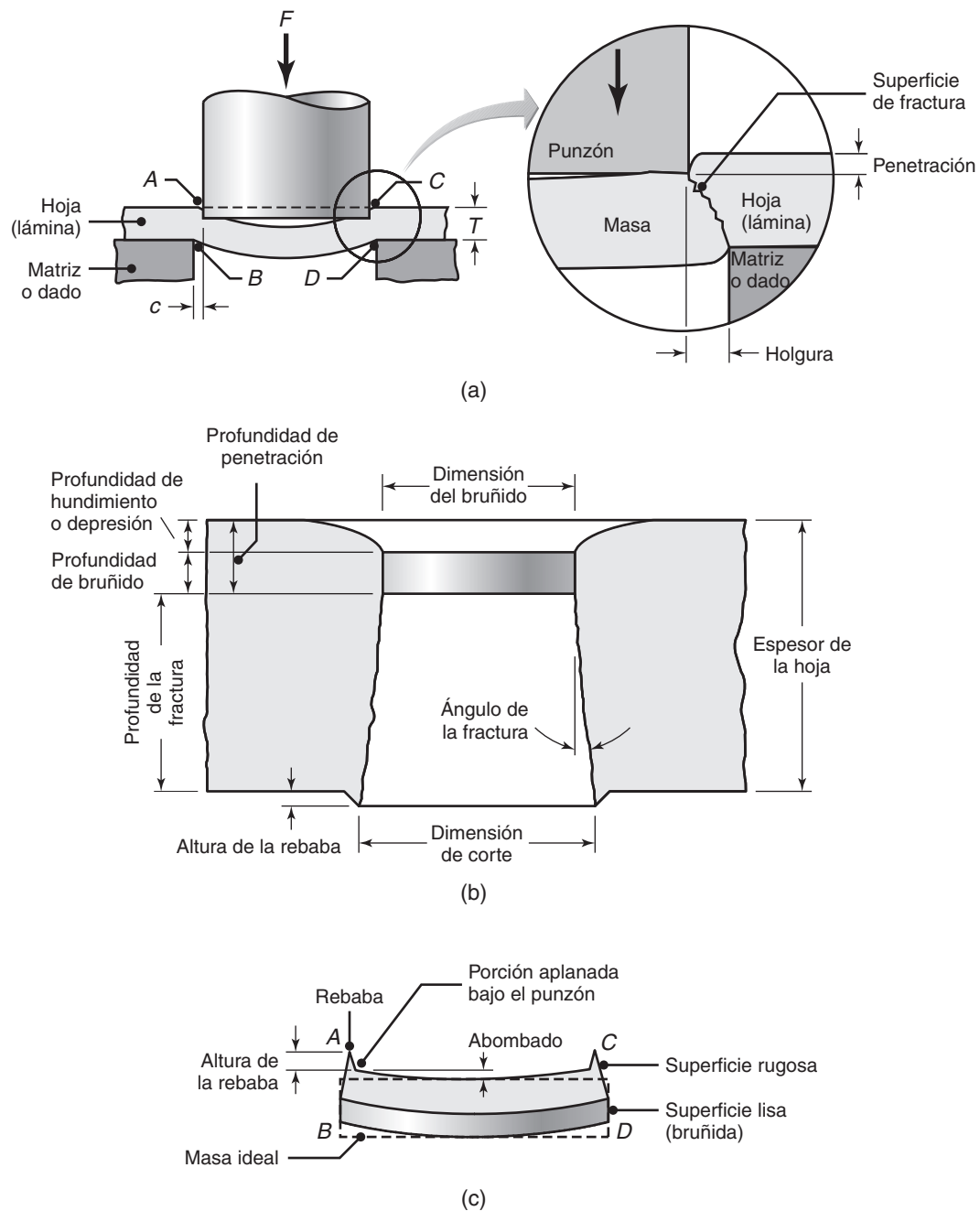


FIGURA 16.2 (a) Esquema del cizallado con un punzón y una matriz, indicando algunas de las variables del proceso. Rasgos característicos de: (b) orificio punzonado; (c) la masa. (Nota: las escalas de (b) y (c) son diferentes).

mentar el espesor y la holgura de la hoja. La extensión de la zona de deformación en la figura 16.3 depende de la velocidad de punzonado. Si ésta se incrementa, el calor generado por la deformación plástica se confina a un área cada vez más pequeña. En consecuencia, la zona cizallada es más angosta y la superficie cizallada más lisa, además de que muestra menos formación de rebabas. Una **rebaba** o filo es una orilla o reborde delgado, como se muestra en las figuras 16.2b y c. Su altura aumenta al incrementarse la

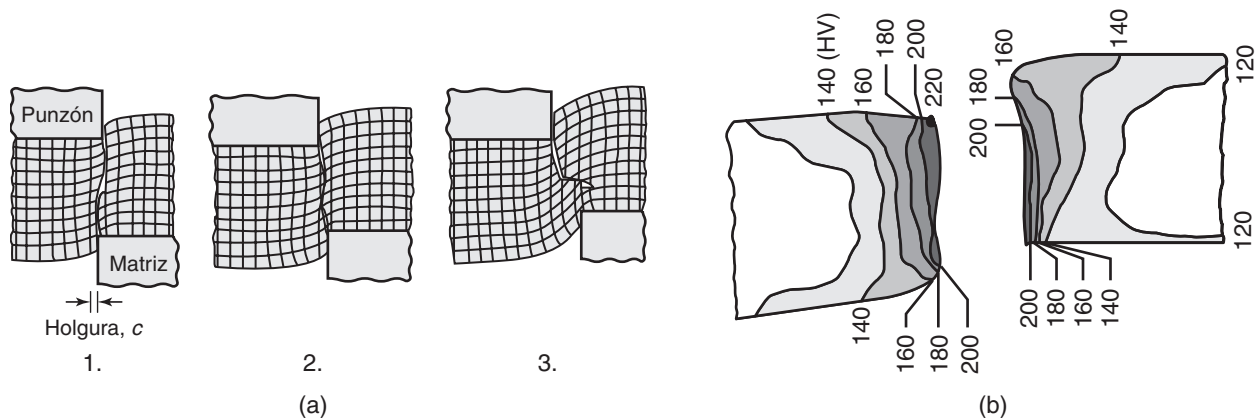


FIGURA 16.3 (a) Efecto de la holgura, c , entre el punzón y la matriz en la zona de deformación cizallada. Conforme aumenta la holgura, el material tiende a jalarsse dentro de la matriz más que a cizallarse. En la práctica, las holguras por lo general varían entre 2% y 10% del espesor de la hoja. (b) Contornos de microdureza (HV) para acero AISI 1020 laminado en caliente de 6.4 mm (0.25 pulgada) de espesor en la región cizallada. Fuente: H. P. Weaver y K. J. Weinmann.

holgura y ductilidad de la hoja metálica. Las orillas gastadas de las herramientas contribuyen en gran medida a la formación de rebabas, cuya altura, forma y tamaño pueden afectar significativamente las operaciones posteriores de formado. En la sección 26.8 se describen varios procesos de **rebabeo**.

Fuerza de punzonado. La fuerza requerida para punzonar es fundamentalmente producto de la resistencia al corte o cortante de la hoja metálica y el área total cizallada a lo largo de la periferia. La *fuerza máxima de punzonado* (F) se puede estimar mediante la ecuación

$$F = 0.7TL(UTS) \quad (16.1)$$

donde T es el espesor de la hoja, L la longitud total cizallada (como el perímetro de un orificio) y UTS la resistencia última o máxima a la tensión del material. Al aumentar la holgura, disminuyen la fuerza de punzonado y el desgaste de punzones y matrices. Los efectos de la forma del punzón y de la matriz sobre las fuerzas de punzonado se describen en la sección 16.2.3.

Sin embargo, la fricción entre el punzón y la pieza de trabajo puede aumentar de manera significativa la fuerza de punzonado. Más aún, aparte de esta última se requiere otra fuerza para retirar el punzón de la hoja durante su carrera de retorno. Esta segunda fuerza, que tiene dirección opuesta a la fuerza de punzonado, es difícil de estimar por los muchos factores involucrados en la operación.

EJEMPLO 16.1 Cálculo de la fuerza de punzonado

Estímese la fuerza requerida para punzonar un orificio de 1 pulgada (25.4 mm) de diámetro a través de una hoja aleada de titanio Ti-6Al-4V, recocida, de 1/8 de pulgada (3.2 mm) de espesor, a la temperatura ambiente.

Solución La fuerza se estima a partir de la ecuación 16.1, donde el UTS para esta aleación se encuentra en la tabla 6.10, es decir, 1000 MPa o 140,000 psi. Entonces:

$$F = 0.7 \left(\frac{1}{8} \right) (\pi)(1)(140,000) = 38,500 \text{ lb} = 19.25 \text{ tons} = 0.17 \text{ MN}$$

16.2.1 Operaciones de cizallado

Las operaciones más comunes de cizallado son el **punzonado**, donde la masa cizallada se desecha (fig. 16.4a) o puede utilizarse con algún otro propósito, y el **troquelado**, donde la masa es la parte a utilizar y el resto es desecho. Las operaciones descritas a continuación y en el resto de este capítulo suelen efectuarse en máquinas de control numérico computarizado, con portaherramientas de cambio rápido. Dichas máquinas son útiles sobre todo para fabricar prototipos de partes producidas con hojas metálicas que requieren varias operaciones para su elaboración.

Corte por matriz. Ésta es una operación de cizallado que consiste en los siguientes procesos básicos (fig. 16.4b):

- **Perforado:** es el punzonado de varios orificios en una hoja.
- **Seccionado:** con él se cizalla la hoja en dos o más piezas.
- **Muescado:** consiste en el retiro de piezas (o diferentes formas) de los orillas.
- **Pestañado o lanceteado:** con él se deja una ceja sin retirar material.

Las partes producidas por estos procesos tienen diferentes usos, en particular al ensamblarse con otros componentes. Las hojas metálicas perforadas con diámetros de orificios que van de 1 mm (0.040 pulgada) a 75 mm (3 pulgadas) se usan como filtros, mallas, guardas para maquinaria, en ventilación, para abatir el ruido y reducir peso en partes fabricadas y estructuras. Se punzonan en plegadoras o manivelas (ver fig. 14.17a) a velocidades tan altas como 30,000 orificios por minuto, utilizando matrices y equipo especial.

Troquelado fino. Mediante el *troquelado fino* se pueden producir orillas muy lisas y a escuadra (fig. 16.5a). En la figura 16.5b se muestra el diseño de una matriz básica. Un aguijón o sujetador con forma de V sujeta firme y mecánicamente la hoja en su lugar y evita el tipo de distorsión del material mostrado en las figuras 16.2b y 16.3. El proceso de troquelado fino, que se desarrolló en la década de 1960, comprende holguras del orden de 1% del espesor de la hoja y puede variar de 0.5 mm a 13 mm (0.02 a 0.5 pulgada) en la mayoría de los casos. Las tolerancias dimensionales son de ± 0.05 mm (0.002 pulgada) y menos de ± 0.025 mm (0.001 pulgada) en el caso de perpendicularidad de la orilla.

Ranurado. Las operaciones de cizallado se pueden efectuar mediante un par de cuchillas circulares, semejantes a las de un abrelatas (fig. 16.6). En el *ranurado*, las cuchillas siguen tanto una línea recta como una trayectoria circular o curva. Normalmente una orilla ranurada tiene una rebaba, que se puede doblar sobre la superficie de la hoja laminándola (aplanándola) entre dos rodillos. Si no se ejecutan en forma apropiada, las operaciones de ranurado pueden provocar diferentes distorsiones de las orillas cizalladas.

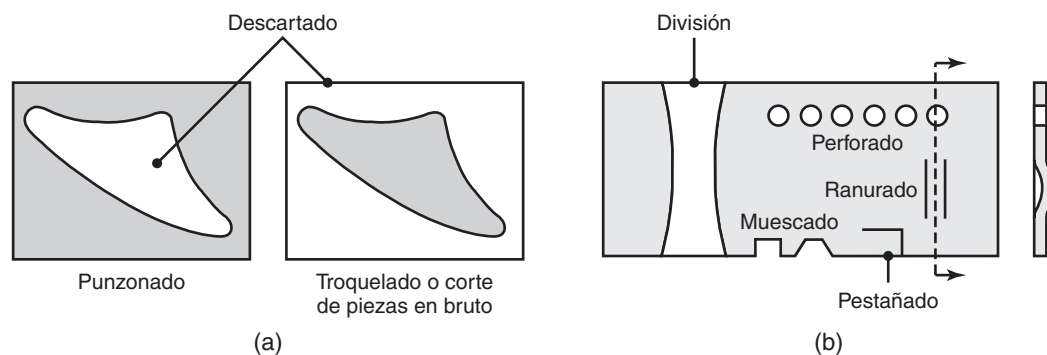


FIGURA 16.4 (a) Punzonado (penetrado) y troquelado. (b) Ejemplos de diferentes operaciones de corte con matrices en hojas metálicas.

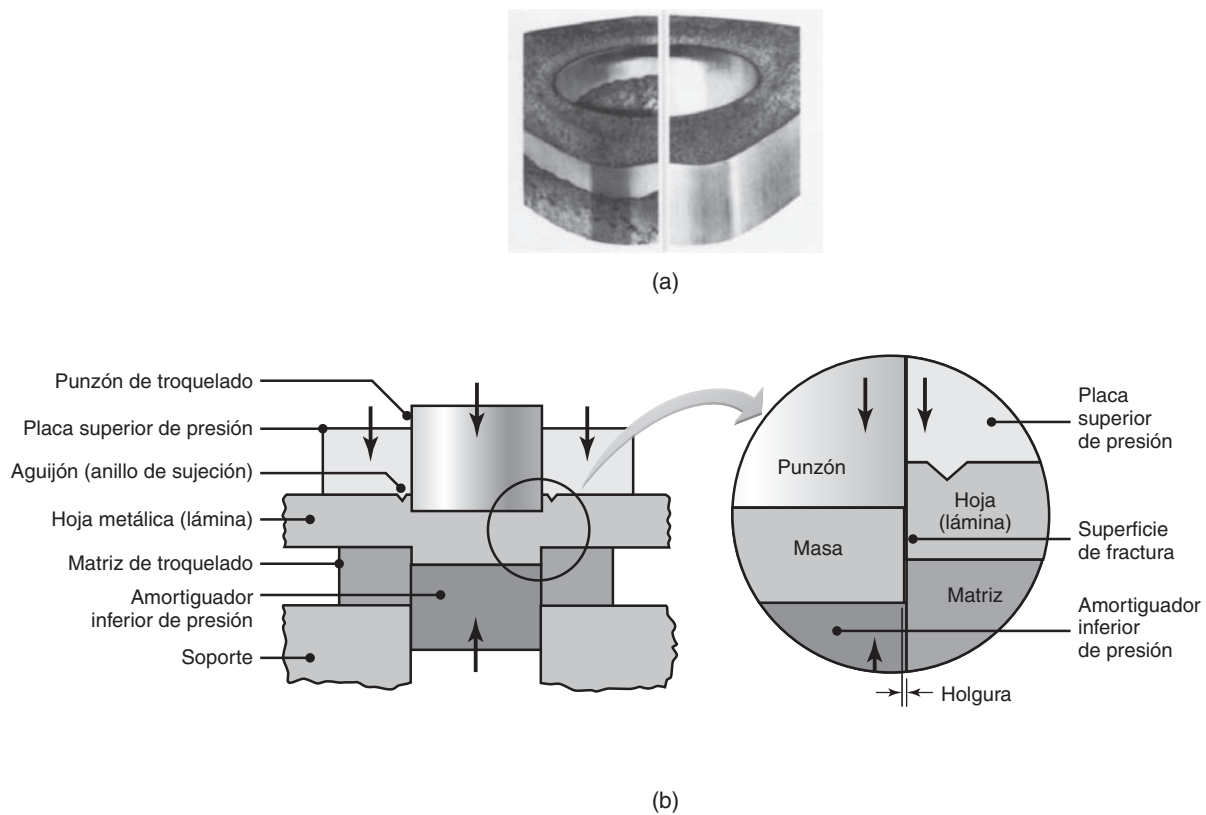


FIGURA 16.5 (a) Comparación de orillas cizalladas producidas mediante técnicas de troquelado convencional (izquierda) y fino (derecha). (b) Esquema de una configuración para troquelado fino. *Fuente:* Cortesía de Feintool U. S. Operations.

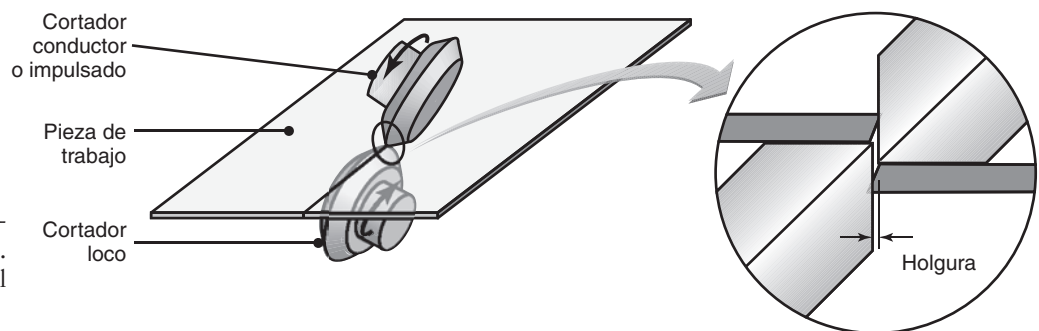


FIGURA 16.6 Ranurado con cuchillas rotativas. Este proceso es similar al de abrir latas.

Reglas de acero (suajes). Los metales blandos (al igual que el papel, la piel y el hule) se pueden troquelar con una *regla de acero (suaje)*. Este tipo de matrices constan de una delgada cinta de acero endurecido doblada con la forma que se va a producir (un concepto similar al de un cortador de galletas), que apoya su orilla sobre una base plana de madera. La matriz se presiona contra la hoja que descansa en la superficie plana y la cizalla a lo largo de la forma de la regla de acero.

Niblado o perforado. En el *niblado*, una máquina llamada *nibladora* mueve con rapidez un punzón recto pequeño arriba y abajo dentro de una matriz. A través de la separación, se alimenta una hoja y se le practican muchos orificios traslapados. Mediante controles manuales o automáticos es posible cortar hojas a lo largo de cualquier trayectoria deseada. Además de su flexibilidad, una ventaja del niblado es que pueden produ-

cirse ranuras y muescas intrincadas, como las que se muestran en la figura 16.4b, utilizando punzones estándar. El proceso es económico para pequeños lotes de producción porque no se requieren matrices especiales.

Desechos del cizallamiento. La cantidad de desecho (*pérdida por recorte*) generada en las operaciones de cizallado puede ser significativa y llegar hasta 30% en estampados grandes (ver tabla 40.3). El desecho puede constituir un porcentaje importante del costo de la manufactura y se reduciría de modo sustancial mediante el arreglo eficiente de las formas en la hoja a cortar (**anidado**, ver fig. 16.51). Se han desarrollado técnicas de diseño asistido por computadora para minimizar el desecho en las operaciones de cizallado.

16.2.2 Láminas en bruto soldadas a la medida

En los procesos de formado de hojas metálicas que se tratarán en este capítulo, por lo general la lámina en bruto es una hoja de una pieza y de un mismo espesor cortada a partir de una hoja larga. Una variación importante de estas condiciones es la *soldadura a tope mediante rayo láser* (ver sección 30.7), de dos o más piezas de hoja metálica con diferentes formas y espesores. Debido a los pequeños espesores involucrados, es importante alinear las hojas en forma apropiada antes de soldarlas. Luego, al ensamble soldado se le da la forma final (ver ejemplo 16.2).

Esta técnica se está volviendo cada vez más importante, sobre todo para la industria automotriz. Debido a que ahora cada parte de una pieza puede tener un espesor, grado, recubrimiento u otra propiedad diferente, las láminas en bruto soldadas a la medida poseen las propiedades requeridas en las distintas ubicaciones de la lámina en bruto. El resultado es:

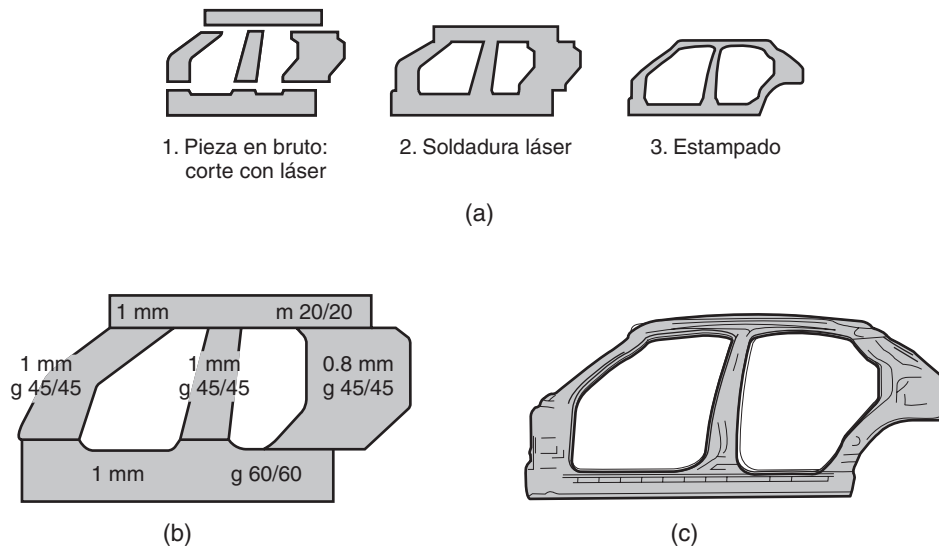
- Una reducción del desecho.
- Eliminación de la necesidad de soldadura por puntos adicional (es decir, durante la manufactura de la carrocería).
- Mejor control de las dimensiones.
- Mejora de la productividad.

EJEMPLO 16.2 Hoja metálica soldada a la medida para aplicaciones automotrices

En la figura 16.7 se muestra un ejemplo del uso de las hojas metálicas soldadas a la medida en las carrocerías automotrices. Obsérvese que primero se cortan (troquelean) cinco láminas en bruto diferentes, lo que comprende el uso de corte mediante rayos láser. Estas láminas se sueldan a tope con el láser y después se estampan para darles la forma final. Cuatro de ellas tienen 1 mm de espesor, y una, 0.8 mm. Así, pueden adaptarse para la aplicación específica, no sólo por lo que se refiere a la forma y el espesor, sino también por el uso de hojas de diferente calidad, con recubrimientos o sin ellos.

Las técnicas de soldadura láser están muy desarrolladas; en consecuencia, las uniones soldadas son muy robustas y confiables. La creciente tendencia a soldar y formar piezas de hojas metálicas permite una flexibilidad significativa en el diseño del producto, rigidez estructural, formabilidad y comportamiento ante el choque de un automóvil. También hace posible el uso de diferentes materiales en un componente, así como ahorros de peso y reducción de costos en materiales, desechos, equipo, ensamble y mano de obra.

Existen mayores aplicaciones para este tipo de producción en las compañías automotrices. En los diversos componentes mostrados en la figura 16.8 se utilizan las ventajas ya descritas. Por ejemplo, obsérvese en la figura 16.8b que la resistencia y rigidez requeridas para el soporte del amortiguador de impacto se obtienen al soldar una pieza redonda sobre la superficie de la hoja grande. El espesor de la hoja en tales componentes es variable (según su ubicación y contribución a dichas características, como rigidez y resistencia) y, por ende, posibilita ahorros significativos de peso sin pérdida de resistencia y rigidez estructural.



Leyenda

g 60/60 (45/45)
m 20/20

Hoja de acero aleado galvanizada en caliente. Cantidad de zinc: 60/60 (45/45) g/m².
Hoja de acero con doble capa de aleación hierro-zinc electrodepositadas. Cantidad de zinc: 20/20 g/m².

FIGURA 16.7 Producción de la pieza lateral exterior de una carrocería automotriz mediante soldado a tope con rayo láser y estampado. *Fuente:* M. Geiger y T. Nakagawa.

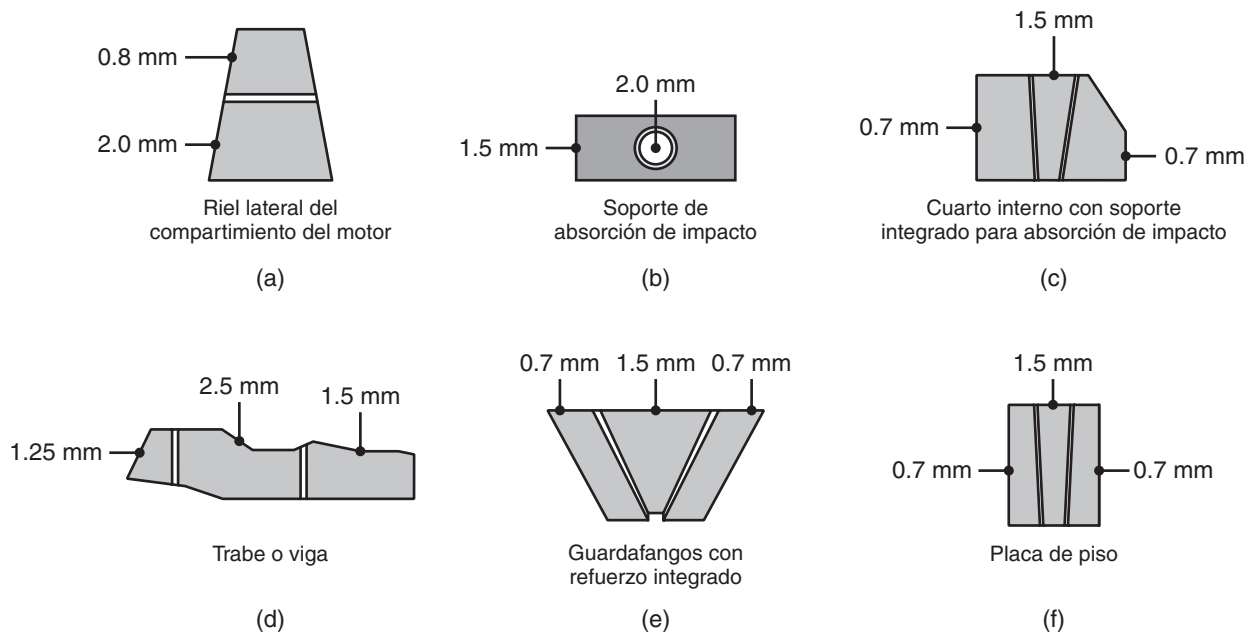


FIGURA 16.8 Ejemplos de componentes de carrocería automotriz soldados a tope con rayo láser y estampados. *Fuente:* M. Geiger y T. Nakagawa.

16.2.3 Características y tipo de las matrices o dados para cizallado

En esta sección se describen las características y los tipos de diversas matrices para cizallado.

Holgura. Debido a que la formabilidad de la pieza cizallada puede ser afectada por la calidad de las orillas cizalladas, es importante controlar la holgura. La holgura apropiada depende de:

- El tipo de material y su tipo de temple.
- El espesor y el tamaño de la lámina en bruto.
- Su proximidad a las orillas de otras orillas cizalladas o a los bordes de la pieza en bruto original.

Por lo general, las holguras varían entre 2% y 8% del espesor de la hoja, aunque pueden ser tan pequeñas como 1% (por ejemplo, en el troquelado fino), o tan grandes como 30%. Cuanto más pequeña sea la holgura, mejor será la calidad de la orilla. Si el borde cizallado es rugoso y no es aceptable, se puede someter a un proceso llamado **rasurado** (fig. 16.9a), donde se recorta el material adicional de la orilla, como se muestra también en la figura 21.3.

Como lineamientos generales: (a) las holguras para los materiales blandos son menores que para los más duros; (b) cuanto más gruesa sea la hoja, más grande será la holgura; y (c) al disminuir la relación de diámetro del orificio a espesor de la hoja, la holgura debe ser mayor. Al usar holguras grandes, hay que poner atención en la rigidez y alineación de las prensas, las matrices y su preparación.

Forma del punzón y de la matriz (dado). En la figura 16.2a se observa que las superficies del punzón y de la matriz son planas. Debido a que se cizalla al mismo tiempo todo el espesor, la fuerza de punzonado aumenta con rapidez durante el cizallamiento. La ubicación de las regiones que se están cizallando puede controlarse en cualquier instante, en particular *biselando* (o generando un chaflán en) las superficies del punzón y de la matriz (fig. 16.10). Esta forma es similar a la de algunos punzones para papel, lo que puede observarse mirando de cerca la punta del mismo. El biselado es particularmente adecuado para cizallar hojas gruesas porque reduce la fuerza al principio de la carrera. También disminuye el nivel de ruido de la operación, ya que ésta es más suave.

En la figura 16.10c se observa que la punta del punzón es simétrica, y en la figura 16.10d que la matriz es simétrica; esto es, no existen fuerzas laterales actuando sobre el punzón para causar distorsión. Por el contrario, el punzón de la figura 16.10b tiene un co-

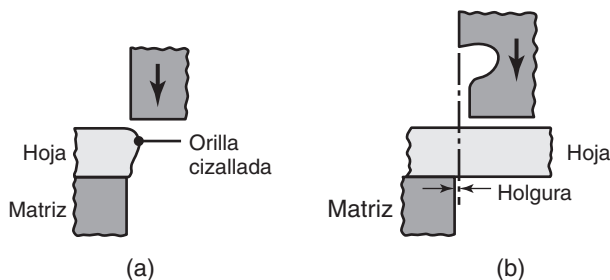


FIGURA 16.9 Esquemas del proceso de rasurado. (a) Rasurado de una orilla cizallada. (b) Cizallado y rasurado combinados en un golpe.

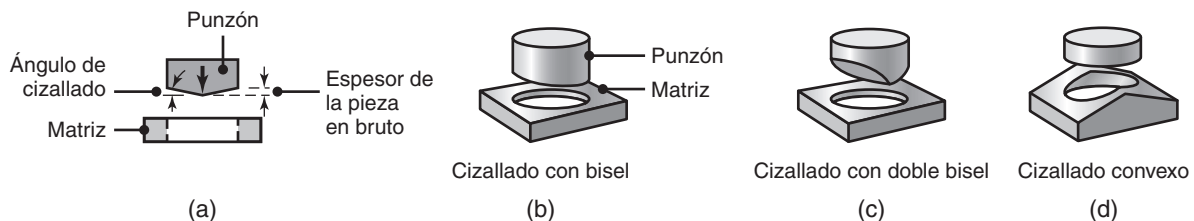


FIGURA 16.10 Ejemplos del uso de los ángulos de cizallado en punzones y matrices.

no simple, por lo que se somete a una fuerza lateral. En consecuencia, las configuraciones del punzón y de la prensa en este último caso deben tener la suficiente rigidez lateral para que no produzcan un orificio mal colocado ni permitan que el punzón golpee la orilla de la matriz inferior (como podría pasar en los puntos *B* o *D* en la fig. 16.2a), provocando daños.

Matrices compuestas. Se pueden realizar varias operaciones en la misma hoja con un solo recorrido de una estación con una *matriz (o dado) compuesta* (fig. 16.11). Por lo común, dichas operaciones combinadas se limitan a formas relativamente simples, ya que (a) el proceso es de alguna manera lento, y (b) el costo de producción de estas matrices se eleva con rapidez en comparación con aquéllas para operaciones individuales de cizallamiento, sobre todo en el caso de matrices complejas.

Matrices progresivas. Las partes cuya elaboración requiere múltiples operaciones se pueden fabricar con grandes capacidades de producción en *matrices progresivas*. La hoja metálica se alimenta como cinta en rollo y se realiza una operación diferente (como punzonado, troquelado y muescado) en la misma estación de la máquina con cada recorrido de una serie de punzones (fig. 16.11c). En la figura 16.11d se muestra una parte fabricada en matrices progresivas: una pieza redonda que soporta la punta metálica de las latas de aerosol.

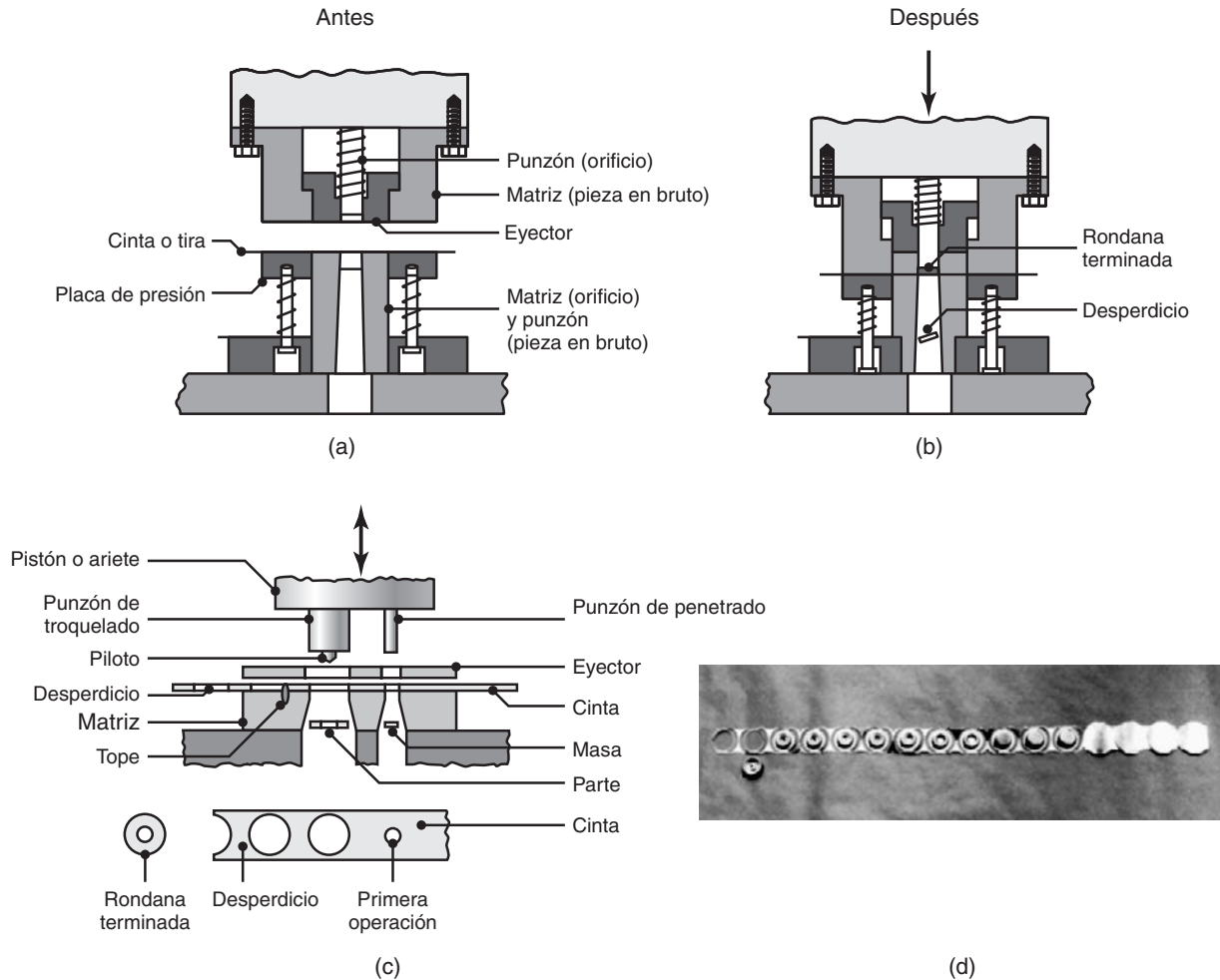


FIGURA 16.11 Esquemas: (a) antes, y (b) después del troquelado de una rondana común en una matriz compuesta. Obsérvese los movimientos de separación de la matriz (para el troquelado) y del punzón (para punzonar el orificio en la rondana). (c) Esquema de la fabricación de una rondana en una matriz progresiva. (d) Formado de la pieza superior de una lata de aerosol en una matriz progresiva. Nótese que la parte se mantiene sujeta a la cinta hasta que se termina la última operación.

Matrices de transferencia. En la configuración de una *matriz de transferencia*, la hoja metálica pasa por diferentes operaciones en distintas estaciones de la máquina, las cuales se arreglan a lo largo de una línea recta o en una trayectoria circular. Después de cada paso, la parte se transfiere a la siguiente estación para operaciones posteriores.

Materiales para herramental y matrices. En general, los materiales para herramientas y matrices de cizallado son aceros para herramental (para grandes capacidades de producción) y carburos (ver tabla 5.7). La lubricación es importante si se pretende reducir el desgaste de la herramienta y de la matriz, además de mejorar la calidad de la orilla.

16.2.4 Métodos diversos para corte de hojas metálicas

Existen diversos métodos para cortar hojas y, particularmente, placas:

- El **corte con rayo láser** es un proceso importante (sección 26.7) que suele utilizarse con equipo controlado por computadora para cortar una gran variedad de formas de manera consistente, en diversos espesores y sin el uso de matrices. El corte con rayo láser también se puede combinar con el punzonado y el cizallado. Estos procesos cubren gamas diferentes y complementarias. Las partes con características distintas se pueden producir mejor mediante uno u otro proceso. Ya se han desarrollado y construido máquinas combinadas que incorporan ambas capacidades (ver también ejemplo 27.1).
- El **corte con chorro de agua a presión** es un proceso de corte efectivo con muchos materiales metálicos y no metálicos (sección 27.8).
- **Corte con sierra cinta:** este método es un proceso de remoción de viruta.
- El **aserrado por fricción** comprende un disco u hoja que se frota contra la lámina o placa a altas velocidades superficiales (sección 24.5).
- El **corte por flama** es otro método común, específico para placas gruesas; se utiliza ampliamente en la construcción de embarcaciones y en componentes estructurales pesados.

16.3 Características y formabilidad de las hojas metálicas

Una vez que se corta una lámina en bruto de una hoja o rollo más grande, se le dan diferentes formas mediante varios procesos que se describirán en el resto de este capítulo. Ahora revisaremos brevemente las características de las hojas metálicas que tienen efectos importantes en estas operaciones de formado, como se indica en la tabla 16.2.

Elongación. Los procesos de formado de hojas metálicas raramente comprenden extensión uniaxial sencilla, como el del ensayo de tensión. Sin embargo, las observaciones de dicho ensayo son útiles y necesarias para entender el comportamiento de los metales en estas operaciones. En la sección 2.2 se vio que un espécimen sometido a tensión primero sufre una **elongación uniforme**, y que cuando la carga excede su resistencia máxima a la tensión, aquél comienza a formar un cuello, por lo que la elongación ya no es uniforme.

En el formado de hojas el material suele estirarse, por lo que es deseable una elongación uniforme elevada para que tenga buena formabilidad. El esfuerzo real al que se inicia la formación del cuello es numéricamente igual al *exponente de endurecimiento por esfuerzo* (n) que se muestra en la ecuación 2.8; entonces, un valor elevado de n indica una elongación grande y uniforme (ver también tabla 2.3). La formación del cuello puede ser *localizada* o *difusa*, dependiendo de la *sensibilidad a la velocidad de deformación* (m) del material; esta relación se da en la ecuación 2.9. Cuanto mayor sea el valor de m , más difuso se volverá el cuello. Un cuello difuso es deseable en las operaciones de formado de las hojas. Además de la elongación uniforme y la formación del cuello, la

TABLA 16.2

Características importantes de los metales en las operaciones de formado de hojas (láminas)	
Característica	Importancia
Anisotropía (normal) Elongación	Determina la capacidad de la hoja (lámina) metálica para estirarse sin formar cuellos y sin romperse; son deseables un exponente de endurecimiento por deformación (n) y un exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación (m) elevados.
Elongación de punto de fluencia	Las depresiones parecidas a flamas (también llamadas bandas de Lüder o deformaciones por estirado) que comúnmente se observan en la superficie de la hoja, se pueden eliminar mediante laminado de revenido, pero debe darse forma a la hoja dentro de cierto tiempo después del laminado.
Anisotropía (planar)	Exhibe comportamiento diferente en diferentes direcciones planares; ocurre en las hojas laminadas en frío debido a la orientación preferida o la fibración mecánica; causa ondulación en el embutido profundo; se puede reducir o eliminar mediante recocido, pero con una resistencia menor.
Anisotropía (normal)	Determina el comportamiento de adelgazamiento de las hojas metálicas durante el estirado, importante en el embutido profundo.
Tamaño de grano	Determina la rugosidad de la superficie en las hojas metálicas estiradas, cuanto más grueso es el grano, más rugosa será la apariencia (cáscara de naranja), también afecta la resistencia del material.
Esfuerzos residuales	Originados comúnmente por la deformación no uniforme durante el formado, provoca una distorsión parcial cuando se corta, puede producir el agrietamiento por esfuerzo-corrosión, se reducen o eliminan mediante el relevado de esfuerzos.
Recuperación elástica	Debido a la restitución elástica de las hojas deformadas plásticamente después de la carga, provoca distorsión de la pieza y pérdida de precisión dimensional, se puede controlar mediante técnicas como el sobredoblado y el apoyo del punzón.
Arrugado	Causado por los esfuerzos de compresión en el plano de la hoja, puede ser objetable, dependiendo de su extensión, puede ser útil para impartir rigidez a las partes al incrementar su módulo de sección, se puede controlar mediante un diseño apropiado del herramental y de la matriz.
Calidad de las orillas cizalladas	Depende del proceso utilizado; las orillas pueden ser rugosas, no a escuadra, y contener grietas, esfuerzos residuales y una capa endurecida por trabajo, que son todos dañinos para la formabilidad de la hoja; la calidad de las orillas se puede mejorar mediante troquelado fino, reduciendo la holgura, rasurando y con mejoras en el diseño del herramental y de la matriz y con lubricación.
Condición superficial de la hoja	Depende de la práctica de laminado de la hoja; es importante en el formado de las hojas y puede causar desgarramiento y una calidad superficial deficiente.

elongación total de la probeta (en términos de la correspondiente a la longitud de galga de 50 mm) también es un factor significativo en la formabilidad de metales en hojas.

Elongación del punto de fluencia. Los aceros al bajo carbono y algunas aleaciones de aluminio-magnesio muestran un comportamiento denominado *elongación del punto de fluencia*, que tiene puntos de fluencia superior e inferior (fig. 16.12a). Este comportamiento produce las **bandas de Lüder** (también llamadas *marcas de esfuerzo por estiramiento* o *gusanos*) en la hoja (fig. 16.12b). Éstas son depresiones alargadas en la superficie de la hoja, como las que se pueden ver en el fondo de las latas que contienen productos domésticos comunes (fig. 16.12c). Tales marcas serían objetables en el producto final porque el abultamiento en la superficie podría degradar la apariencia y causar dificultades en las operaciones posteriores de recubrimiento y pintura.

El método usual para evitar estas marcas consiste en eliminar o reducir la elongación del punto de fluencia disminuyendo el espesor de la hoja de 0.5% a 1.5% mediante el laminado en frío (**laminado de temple** o **superficial**). Sin embargo, debido al envejecimiento por deformación, la elongación del punto de fluencia reaparece después de algunos días a temperatura ambiente, o luego de unas horas a temperaturas más elevadas. Para evitar este fenómeno, que es indeseable, el material debe formarse dentro de cierto límite de tiempo (que depende del tipo de acero).

Anisotropía. Un factor que influye en el formado de hojas metálicas es la *anisotropía (direccionalidad)* de las mismas. Cabe recordar que la anisotropía se adquiere durante el proceso termomecánico de la lámina y que hay dos tipos de ella: la *anisotropía cristalográfica* (orientación preferencial de los granos) y la *fibración mecánica* (alineación de las impurezas, inclusiones y huecos a través del espesor de la hoja). La importancia de este aspecto se analiza en la sección 16.4.

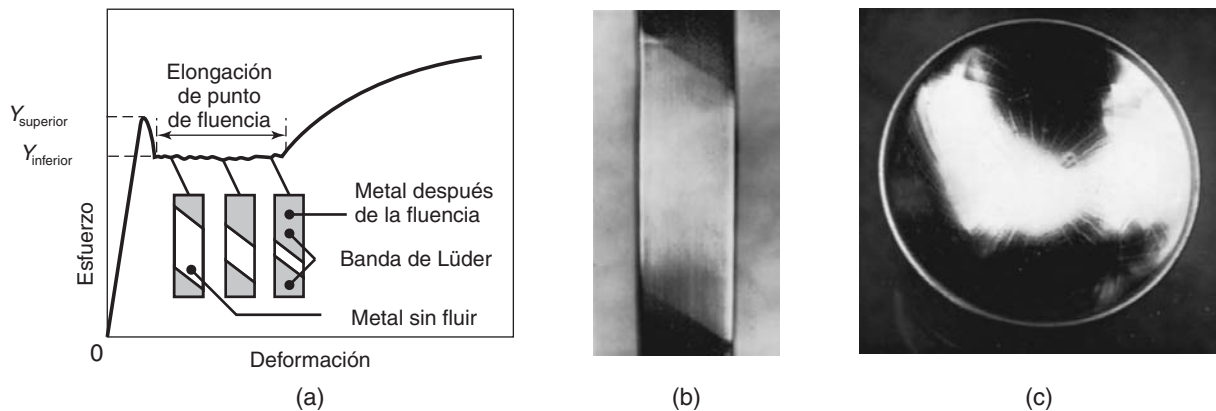


FIGURA 16.12 (a) Elongación de punto de fluencia en un espécimen de hoja (lámina) metálica. (b) Bandas de Lüder en una hoja de acero de bajo carbono. (c) Deformaciones por estirado en el fondo de una lata de acero para productos domésticos. Fuente: (b) Cortesía de Caterpillar Inc.

Tamaño de grano. Como se señaló en la sección 1.4, el tamaño de grano afecta las propiedades mecánicas y la apariencia superficial de la parte formada (*cáscara de naranja*). Cuanto menor sea el tamaño de grano, más fuerte será el metal; y cuanto más grueso sea el grano, más rugosa será la apariencia superficial. Para operaciones de formado de hojas metálicas se prefiere un tamaño de grano 7 de ASTM (tabla 1.1).

Resistencia al mellado de las hojas metálicas. Por lo común, las melladuras se presentan en los automóviles, artículos electrodomésticos y muebles de oficina. Las fuerzas dinámicas de los objetos en movimiento que golpean la hoja metálica causan las melladuras. Por ejemplo, en las partes automotrices características las velocidades de impacto llegan a ser de 45 m/s (150 pies/s). Por ello, el *esfuerzo dinámico de fluencia* (esfuerzo de fluencia a altas velocidades de deformación), más que el esfuerzo estático de fluencia, es el parámetro significativo de la resistencia.

Las fuerzas dinámicas tienden a causar melladuras *localizadas*, mientras que las fuerzas estáticas tienden a *difundir* el área mellada. Este fenómeno puede demostrarse al tratar de mellar una pieza de una hoja metálica plana, primero empujando un martillo con punta de bola contra ella y después golpeándola con el martillo. Obsérvese cuán localizada puede ser la melladura en el último caso. Se ha encontrado que la *resistencia al mellado* de las partes de hojas metálicas (a) aumenta al incrementarse el espesor de la hoja y su esfuerzo de fluencia, y (b) disminuye al aumentar su módulo elástico y la rigidez general de la pieza. En consecuencia, las piezas rígidamente sujetas por sus bordes tienen una baja resistencia al mellado debido a su mayor rigidez.

16.4 Pruebas de formabilidad para hojas metálicas

La **formabilidad de las hojas metálicas** es de gran interés tecnológico y económico. Por lo general se define como la capacidad de la hoja metálica para sufrir el cambio de forma deseado sin fallar, ya sea mediante la formación de un cuello, agrietamiento o desgarramiento. Como se verá en el resto de este capítulo, las hojas metálicas (dependiendo en parte de su geometría) pueden sufrir dos modos básicos de deformación: (1) *estirado* y (2) *embutido*. Existen dos distinciones importantes entre ambos modos, y se utilizan distintos parámetros para determinar la formabilidad en estas diferentes condiciones. A continuación se describirán los métodos que suelen utilizarse para predecir la formabilidad.

Pruebas de copa (acopamiento o ahuecamiento). Las primeras pruebas desarrolladas para predecir la formabilidad fueron las pruebas de copa (fig. 16.13a). En la *prueba Erichsen*, la hoja del espécimen se sujeta entre dos matrices planas, circulares, y se

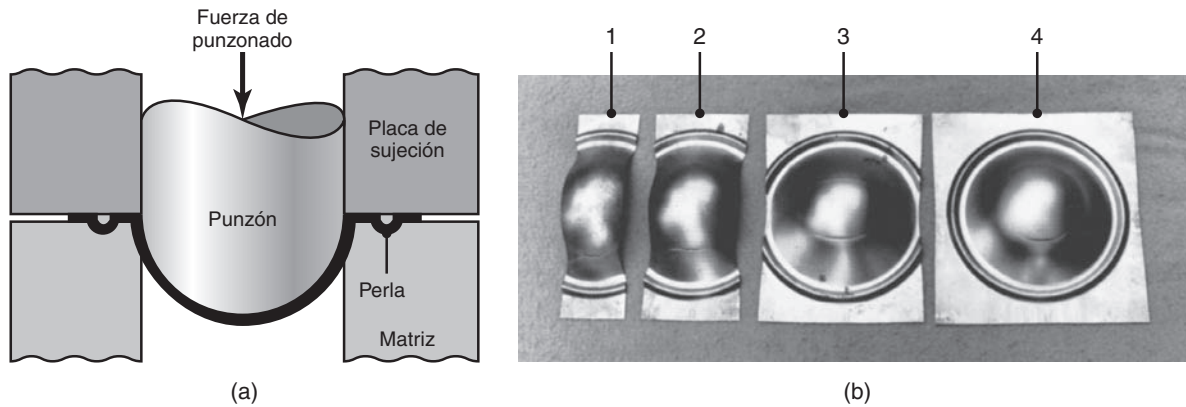


FIGURA 16.13 (a) Prueba de formado de depresión (copa) (prueba Erichsen) para determinar la formabilidad de las hojas metálicas. (b) Resultados de la prueba de abombado en hojas metálicas de diferentes anchos. El espécimen del lado izquierdo se somete, básicamente, a tensión simple; el del extremo derecho se somete a un estiramiento biaxial equilibrado. *Fuente:* Cortesía de Inland Steel Company.

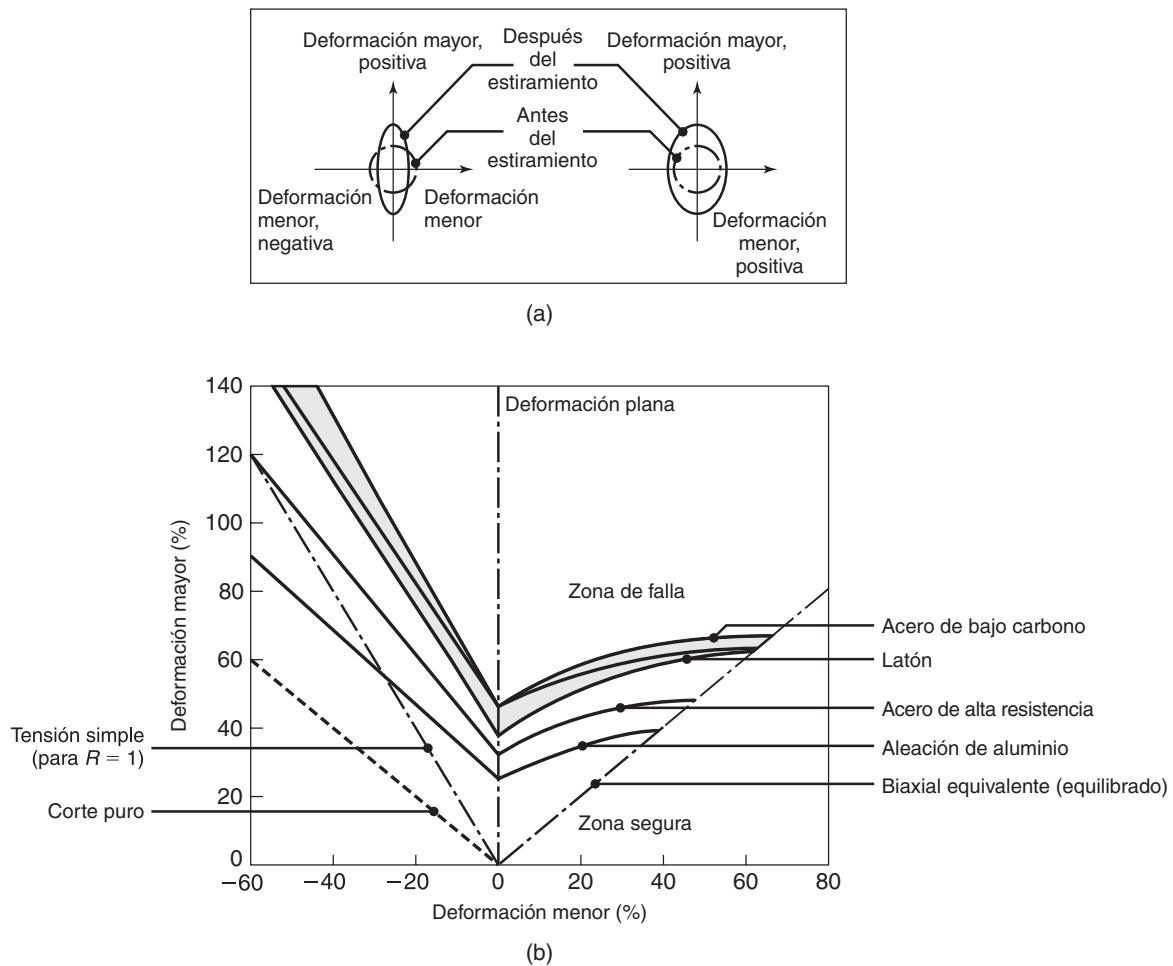


FIGURA 16.14 (a) Deformaciones en patrones deformados de rejillas circulares. (b) Diagramas de límites de formado (FLD) para diferentes hojas metálicas. Aunque la deformación mayor siempre es positiva (estiramiento), la deformación menor puede ser positiva o negativa. R es la anisotropía normal de la hoja, como se describió en la sección 16.4. *Fuente:* S. S. Hecker y A. K. Ghosh.

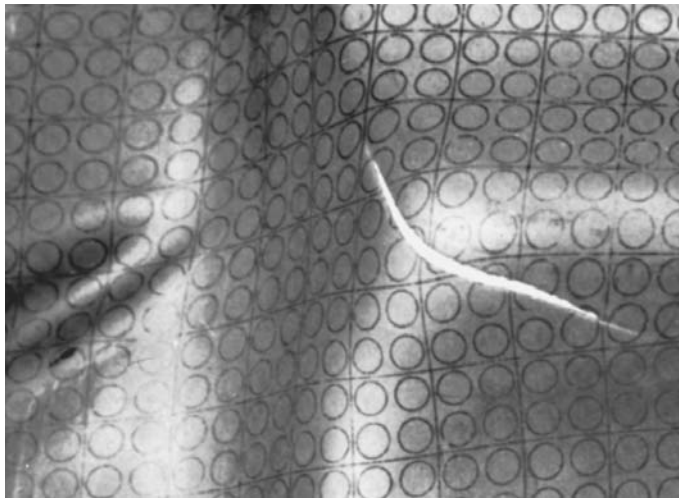


FIGURA 16.15 Deformación de un patrón de rejilla y rasgado de una hoja metálica durante el formado. Los ejes mayor y menor de los círculos se utilizan para determinar las coordenadas en el diagrama de límites de formado de la figura 16.14b. Fuente: S. P. Keeler.

fuerza una bola de acero o un punzón redondo sobre la hoja hasta que comienza a aparecer una grieta en el espécimen estirado. La *profundidad de punzonado* (d) a la que ocurre la falla es una medida de la formabilidad de la hoja. Aunque es fácil realizar esta prueba y otras similares, no se simulan las condiciones exactas de las operaciones de formado real, de ahí que no sean particularmente confiables, sobre todo para partes complejas.

Diagramas de límites de formado. Un avance importante en la prueba de formabilidad de las hojas metálicas es el desarrollo de los *diagramas de límites de formado*, como se muestra en la figura 16.4. Un diagrama de límites de formado (FLD, por sus siglas en inglés) se construye marcando primero la hoja plana con un patrón de rejilla de círculos (ver fig. 16.15), mediante técnicas electroquímicas o de fotograbado. Después se estira la lámina en bruto sobre un punzón (fig. 16.13a) y se observa y mide la deformación de los círculos en las regiones donde ocurrió la falla (*formación de cuellos y rasgado*). Aunque suelen tener un diámetro de 2.5 mm a 5 mm (0.1 a 0.2 pulgada), los círculos deben hacerse tan pequeños como sea práctico para mejorar la precisión de la medición.

Con el propósito de desarrollar un estiramiento desigual para simular las operaciones reales de formado de las hojas, los especímenes planos se cortan con anchos variables (fig. 16.13b) y después se someten a prueba. Obsérvese que un espécimen cuadrado (a la derecha de la figura) produce un *estiramiento biaxial equivalente* (como el que se obtiene al inflar un globo), mientras que un espécimen angosto (a la izquierda de la figura) se aproxima al estado de *estiramiento uniaxial* (es decir, tensión simple). Luego de realizar una serie de ensayos en una lámina metálica en particular y a diferentes anchos, se construye un diagrama de límites de formado en el que se muestran las fronteras entre las regiones *de falla* y las *seguras* (fig. 16.14b).

Para desarrollar un diagrama de límites de formado se obtienen las deformaciones ingenieriles mayor y menor, midiendo la deformación de los círculos originales. En la figura 16.14a se observa que el círculo se ha deformado hasta convertirse en elipse, cuyo *eje mayor* representa la dirección y magnitud mayores del estiramiento. La deformación mayor es la *deformación ingenieril* en esta dirección y siempre es *positiva*, ya que la hoja se está estirando. El *eje menor* de la elipse representa la magnitud del estiramiento o contracción en la dirección *transversal*.

Sin embargo, nótese que la deformación menor puede ser *positiva* o *negativa*. Por ejemplo, si se coloca un círculo en el centro de una probeta para ensayo de tensión y después se alarga uniaxialmente (tensión simple), la probeta se estrecha al estirarse (debido al efecto de Poisson) y, por lo tanto, la deformación menor es negativa. (Este comportamiento se puede demostrar con facilidad estirando una banda de hule y observando los cambios dimensionales que sufre). En cambio, si colocamos un círculo sobre un globo y lo inflamos, las deformaciones mayor y menor son ambas positivas y de magnitud equivalente.

Al comparar las áreas de las superficies del círculo original y del círculo deformado sobre la hoja formada, también puede determinarse si el espesor de la hoja ha cambiado durante la deformación. Como en la deformación plástica el volumen permanece constante, se sabe que si el área del círculo deformado es mayor que la del círculo original, la hoja se ha vuelto más delgada. Este fenómeno se puede demostrar con facilidad inflando un globo y observando que se vuelve más translúcido conforme se estira (porque se está volviendo más delgado).

Los datos así obtenidos en los diferentes puntos de cada una de las muestras que aparecen en la figura 16.13b, se grafican después como se muestra en la figura 16.14b. Las curvas representan los límites entre las *zonas de falla* y las *zonas seguras* para cada tipo de metal, y como se puede observar, cuanto más elevada sea la curva, mejor será la formabilidad de un metal en particular. Como se esperaba, los diferentes materiales y condiciones (como los trabajados en frío o tratados térmicamente) tienen distintos diagramas de límites de formado.

Tómese como ejemplo la aleación de aluminio de la figura 16.14b: si un círculo en un punto específico de la hoja ha sufrido deformaciones mayores y menores de más 20% y menos 10%, respectivamente, no habría desgarramiento ahí. En cambio, si las deformaciones mayores y menores fueran de más 80% y menos 40%, respectivamente, en otra ubicación, existiría un desgarramiento en esa parte particular del espécimen. En la figura 16.15 se muestra un ejemplo de una parte producida con una hoja metálica formada con un patrón de rejilla. Obsérvese la deformación de los patrones circulares alrededor del desgarramiento de la hoja formada.

Es importante hacer notar, en los diagramas de límites de formado, que una deformación por compresión menor de, digamos, 20%, se asocia con una deformación mayor más grande que una deformación menor a tensión (positiva) de la misma magnitud. En otras palabras, es deseable que la deformación menor sea negativa (esto es, que la contracción ocurra en la dirección menor). En el formado de partes complejas pueden diseñarse herramientas especiales, a fin de aprovechar el efecto benéfico de las deformaciones menores negativas en la formabilidad.

El efecto del espesor de las hojas sobre los diagramas de límites de formado se refleja en la elevación de las curvas en la figura 16.14b. Cuanto más gruesa sea la hoja, más elevada será la curva de formabilidad y, por ende, más formable. En las operaciones reales de formado, una pieza en bruto gruesa tal vez no se doble tan fácilmente alrededor de radios pequeños sin agrietarse (como se indica en la sección 16.5 sobre doblado). La fricción y la lubricación en la interfaz entre el punzón y la hoja metálica también afectan los resultados de los ensayos. Con unas interfaces bien lubricadas, las deformaciones en la hoja se distribuyen de manera más uniforme sobre el punzón. De igual forma, como era de esperarse, y dependiendo del material y de su sensibilidad a muescas, rayaduras superficiales, depresiones profundas e imperfecciones, se puede reducir de modo significativo la formabilidad y de ahí llevar a un desgarramiento prematuro y a la falla de la parte.

16.5 | Doblado de hojas, placas y tubos

El *doblado* es una de las operaciones industriales de formado más comunes. Basta con echar un vistazo a la carrocería de un automóvil, un electrodoméstico, un broche para papel o un archivero para apreciar a cuántas partes se les dio forma mediante el doblado. Más aún, el doblado también proporciona rigidez a la pieza al aumentar su momento de inercia. Por ejemplo, nótese cómo los corrugados, los rebordes, los canales y las costuras mejoran la rigidez de las estructuras sin agregar peso. Asimismo, obsérvese la rigidez diametral de una lata metálica con acanalado circunferencial y sin él (ver también *acanalado*).

En la figura 16.16 se muestra la terminología utilizada en el doblado de una hoja (lámina) o placa. Obsérvese que las fibras exteriores del material se encuentran a tensión, mientras que las interiores están a compresión. Debido al efecto de Poisson, la anchura de la parte (*longitud de doblado*, L) se ha vuelto más pequeña en la región exterior y más

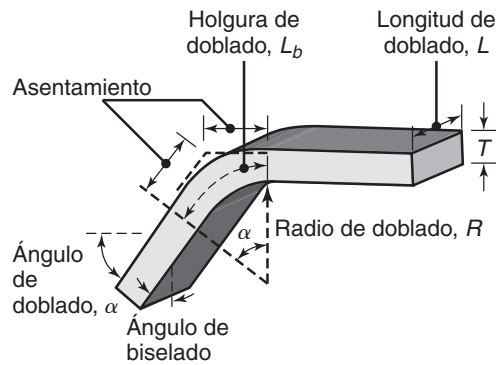


FIGURA 16.16 Terminología de doblado. Obsérvese que el radio de doblado se mide con respecto a la superficie interior de la parte doblada.

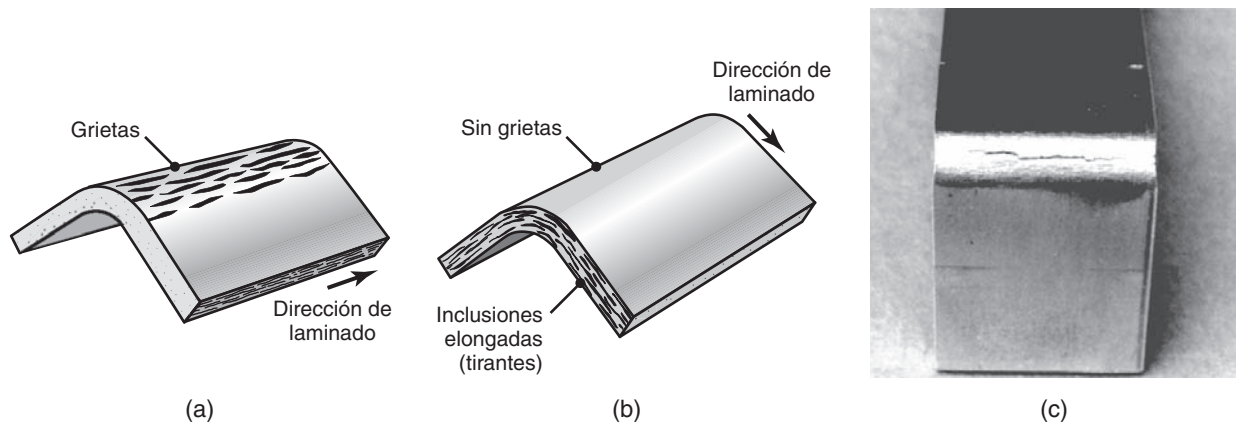


FIGURA 16.17 (a) y (b) Efecto de las inclusiones elongadas (fibrosas) en el agrietamiento, como función de la dirección de doblado con respecto a la dirección original de laminación de la hoja. (c) Grietas en la superficie exterior de una cinta de aluminio doblada en ángulo de 90°. Obsérvese también el estrechamiento de la superficie superior en el área doblada (debido al efecto de Poisson).

grande en la región interior que la anchura original (como se ve en la fig. 16.17c). Este fenómeno puede observarse con facilidad doblando una goma de borrar de hule rectangular para advertir sus cambios de forma.

Como se muestra en la figura 16.16, la **holgura o tolerancia de doblado** (L_b) es la longitud del *eje neutro* en el doblado y se utiliza para determinar la longitud de la lámina en bruto de una pieza que se va a doblar. Sin embargo, la posición del eje neutro depende del radio y el ángulo de doblado (como se describe en los textos de mecánica de materiales). Una fórmula aproximada para la holgura de doblado es la siguiente:

$$L_b = \alpha(R + kT) \quad (16.2)$$

donde α es el ángulo de doblez (en radianes), T el espesor de la hoja, R el radio de doblez y k una constante. En la práctica, los valores de k comúnmente varían de 0.33 (para $R < 2T$) a 0.5 (para $R > 2T$). Obsérvese que para el caso ideal, el eje neutro se encuentra en el centro del espesor de la hoja, $k = 0.5$, y, de ahí,

$$L_b = \alpha \left[R + \left(\frac{T}{2} \right) \right] \quad (16.3)$$

Radio mínimo de doblado. El radio al que aparece una grieta por primera vez en las fibras exteriores de una hoja se conoce como *radio mínimo de doblado*. Se puede de-

mostrar que la deformación ingenieril en las fibras exteriores e interiores de una hoja durante el doblado está dada por la expresión:

$$e = \frac{1}{(2R/T) + 1} \quad (16.4)$$

Entonces, al disminuir R/T (esto es, cuando la relación del radio de doblado se vuelve más pequeña con respecto al espesor), la deformación por tensión de las fibras exteriores aumenta y el material termina por desarrollar grietas (fig. 16.17). Por lo general, el radio de doblado se expresa (de manera recíproca) en términos del espesor como $2T$, $3T$, $4T$ y así sucesivamente (ver tabla 16.3). Por ello, un radio mínimo de doblado de $3T$ indica que el *radio más pequeño* al que se puede doblar la hoja sin agrietarse es de tres veces su espesor.

Existe una relación inversa entre la *capacidad de doblado* y la reducción de tensión del área del material (fig. 16.18). El *radio mínimo de doblado* (R) es aproximadamente:

$$R = T \left(\frac{50}{r} - 1 \right) \quad (16.5)$$

TABLA 16.3

Radio mínimo de doblado para diversos metales a temperatura ambiente

Material	Condición	
	Blando	Duro
Aleaciones de aluminio	0	$6T$
Cobre berilio	0	$4T$
Latón (con bajo plomo)	0	$2T$
Magnesio	$5T$	$13T$
Aceros		
Acero inoxidable austenítico	$0.5T$	$6T$
Bajo carbono, baja aleación y HSLA	$0.5T$	$4T$
Titanio	$0.7T$	$3T$
Aleaciones de titanio	$2.6T$	$4T$

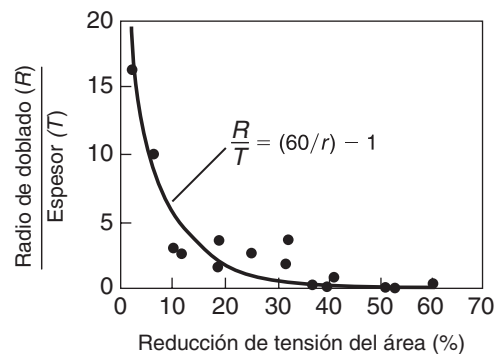


FIGURA 16.18 Relación entre el cociente R/T y la reducción de tensión de área para las hojas (láminas) metálicas. Obsérvese que la hoja metálica con una reducción de tensión de área de 50% puede doblarse sobre sí misma en un proceso similar al doblado de una hoja de papel sin agrietarse. *Fuente:* J. Datsko y C. T. Yang.

donde r es la reducción de tensión del área de la hoja metálica. Por lo tanto, para $r = 50$, el radio mínimo de doblado es cero; esto es, la lámina se puede doblar sobre sí misma (ver *plegado o doblez de bordes*), de manera muy similar a como se dobla una hoja de papel. Para aumentar la capacidad de doblado de los metales, podemos profundizar la reducción de tensión del área del metal calentándolo o doblándolo en un ambiente de alta presión. La capacidad de doblado también depende de las *condiciones de la orilla* de la hoja, pues como las orillas rugosas son puntos de concentración de esfuerzos, la capacidad de doblado disminuye al aumentar la rugosidad de la orilla.

Otro factor significativo en el agrietamiento de la orilla es la cantidad, forma y dureza de las *inclusiones* presentes en la hoja metálica y la cantidad de trabajado en frío que sufren las orillas durante el cizallado. Debido a que son puntiagudas, las inclusiones con forma alargada son más dañinas que las de forma globular (ver también fig. 2.23). La resistencia al agrietamiento de la orilla durante el doblado se puede mejorar mucho retirando las regiones trabajadas en frío mediante rasurado o maquinado de las orillas de la parte (ver fig. 16.9), o recociéndolas a fin de mejorar su ductilidad.

La *anisotropía* de la hoja es otro factor importante en la capacidad de doblado. El laminado en frío produce anisotropía por *orientación preferencial* o por *fibración mecánica* debido a la alineación de cualquiera de las impurezas, las inclusiones y los huecos que pudieran estar presentes, como se muestra en la figura 1.13. Antes de disponer (sobre dicha hoja) las piezas en bruto a doblar (*anidado*, ver fig. 16.51), debe tenerse cuidado de cortarlas en la dirección apropiada de una hoja laminada; sin embargo, esta opción no siempre puede ser posible en la práctica.

Recuperación elástica o restitución. Todos los materiales tienen un módulo finito de elasticidad, por lo que la deformación plástica siempre va seguida de alguna restitución elástica cuando se retira la carga (ver fig. 2.3). En el doblado, a esta restitución se le llama *rebote*, que puede observarse con facilidad si se dobla una pieza de hoja metálica o de alambre y se suelta después. La restitución no sólo se presenta en las hojas y placas planas, sino también en barras sólidas o huecas y en tubos de cualquier sección transversal. Como se hace notar en la figura 16.19, el ángulo final de doblado después de la restitución es menor que el ángulo al cual se dobló la parte, y el radio final de doblado es mayor que antes de que ocurriera el rebote.

La restitución o recuperación se puede calcular en términos de los radios R_i y R_f (fig. 16.19), como:

$$\frac{R_i}{R_f} = 4 \left(\frac{R_i Y}{ET} \right)^3 - 3 \left(\frac{R_i Y}{ET} \right) + 1 \quad (16.6)$$

En esta fórmula se observa que la restitución elástica aumenta (a) al incrementarse la relación R/T y el esfuerzo de fluencia, Y , del material, y (b) al disminuir el módulo elástico, E .

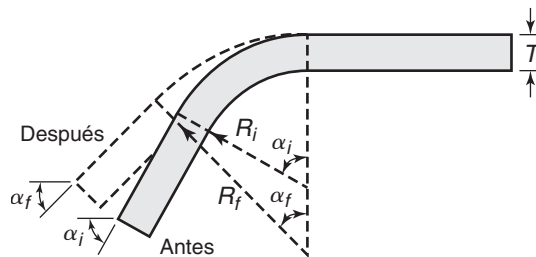


FIGURA 16.19 Recuperación elástica en el doblado. La parte tiende a recuperarse elásticamente después del doblado y el radio de doblado aumenta. En ciertas condiciones, es posible que el ángulo final de doblado sea menor que el ángulo original (recuperación elástica negativa).

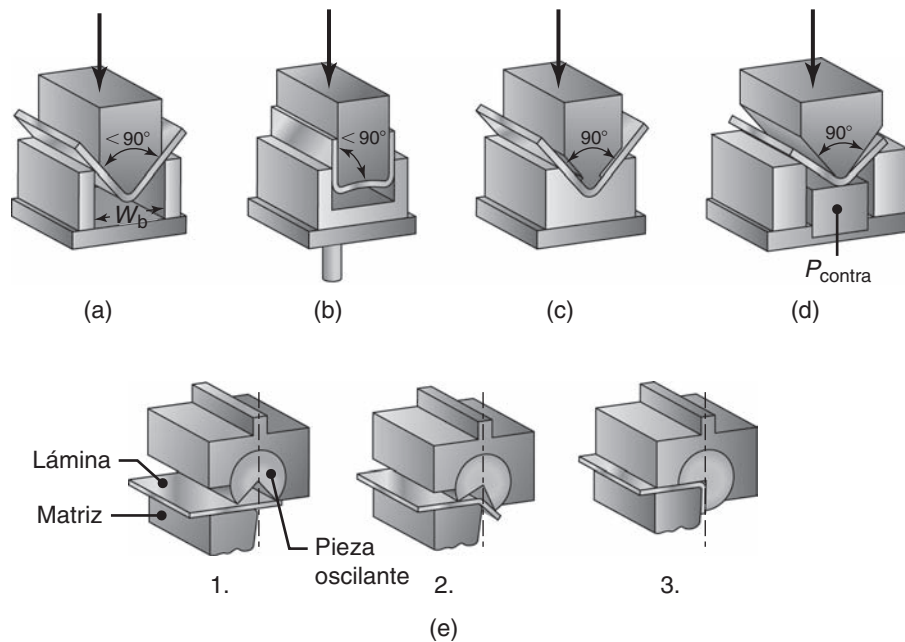


FIGURA 16.20 Métodos para reducir o eliminar la recuperación elástica en las operaciones de doblado.

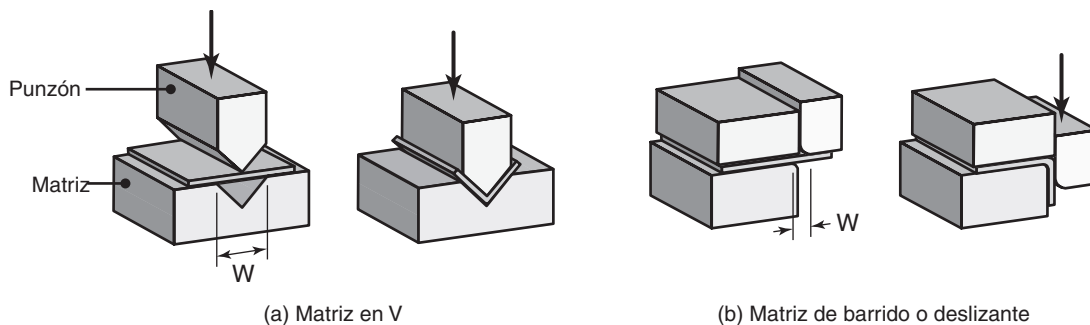


FIGURA 16.21 Operaciones comunes de doblado con matrices donde se muestra la dimensión de abertura de la matriz (W) utilizada para calcular las fuerzas de doblado.

En el doblado con matriz en V (figs. 16.20 y 16.21) incluso es posible que el material muestre *una restitución negativa*. Esta condición es causada por la naturaleza de la deformación, justo cuando el punzón termina la operación de doblado al final de la carrera. La restitución negativa no ocurre en el *doblado al aire* que se muestra en la figura 16.22a (llamado también *doblado libre*), debido a la falta de restricciones que impone la matriz en V sobre el área de doblado.

Compensación de la recuperación o restitución elástica. Por lo común, la recuperación o restitución en las operaciones de formado se compensa *sobredoblando* la parte (fig. 16.20a y b). Es posible que se necesiten varios intentos para obtener los resultados deseados. Otro método consiste en *acuar* el área doblada someténdola a esfuerzos de compresión muy localizados entre la punta del punzón y la superficie de la matriz (fig. 16.20c y d), una técnica conocida como *fondear* el punzón. Otro método es el *doblado con estiramiento*, en el que la parte se somete a tensión mientras se dobla (ver también *conformado por estirado*, sección 16.6).

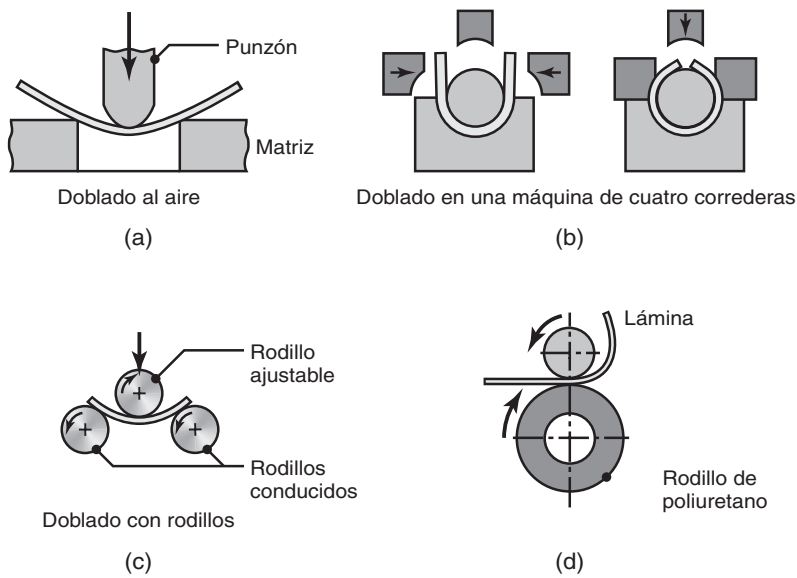


FIGURA 16.22 Ejemplos de diversas operaciones de doblado.

Fuerza de doblado. Se puede estimar la fuerza de doblado para hojas (láminas) y placas suponiendo que el proceso es el doblado simple de una viga rectangular, como se describe en los textos de mecánica de sólidos. Entonces, la fuerza de doblado es una función de la resistencia del material, la longitud (L) de doblado, el espesor (T) de la hoja y la abertura de la matriz o dado (W), como se muestra en la figura 16.21. Excluyendo la fricción, la *fuerza máxima de doblado* (P) es:

$$P = \frac{kYLT^2}{W} \quad (16.7)$$

donde el factor k varía de alrededor de 0.3 para una matriz deslizante a 0.7 para una matriz en U y a 1.3 para una matriz en V, y Y es el esfuerzo de fluencia del material.

Para una matriz en V, con frecuencia se modifica la ecuación 16.7 de la siguiente manera:

$$P = \frac{(UTS)LT^2}{W} \quad (16.8)$$

donde UTS es la resistencia máxima del material. Esta ecuación se aplica bien a situaciones en las que el radio de la punta del punzón y el espesor de la hoja son relativamente pequeños comparados con la abertura de la matriz (W).

La fuerza de doblado también es función del avance del punzón en el ciclo de doblado. Aumenta de cero a un máximo y puede incluso disminuir cuando se termina el doblado. La fuerza se incrementa después de manera abrupta conforme el punzón alcanza el fondo de su carrera y la parte toca el fondo de la matriz. Sin embargo, en el doblado al aire (fig. 16.22a) la fuerza no vuelve a aumentar luego de que comienza a disminuir, ya que no encuentra resistencia en su movimiento libre hacia abajo.

16.6 Operaciones diversas de doblado y otras relacionadas

Formado en prensas plegadoras, de cortina o excéntricas. Las hojas o placas metálicas se pueden doblar fácilmente con simples soportes mediante una *prensa plegadora*. Las hojas o cintas angostas de hasta 7 m (20 pies), o incluso más largas, por lo general se doblan en una prensa de este tipo (fig. 16.23). La máquina utiliza matrices largas

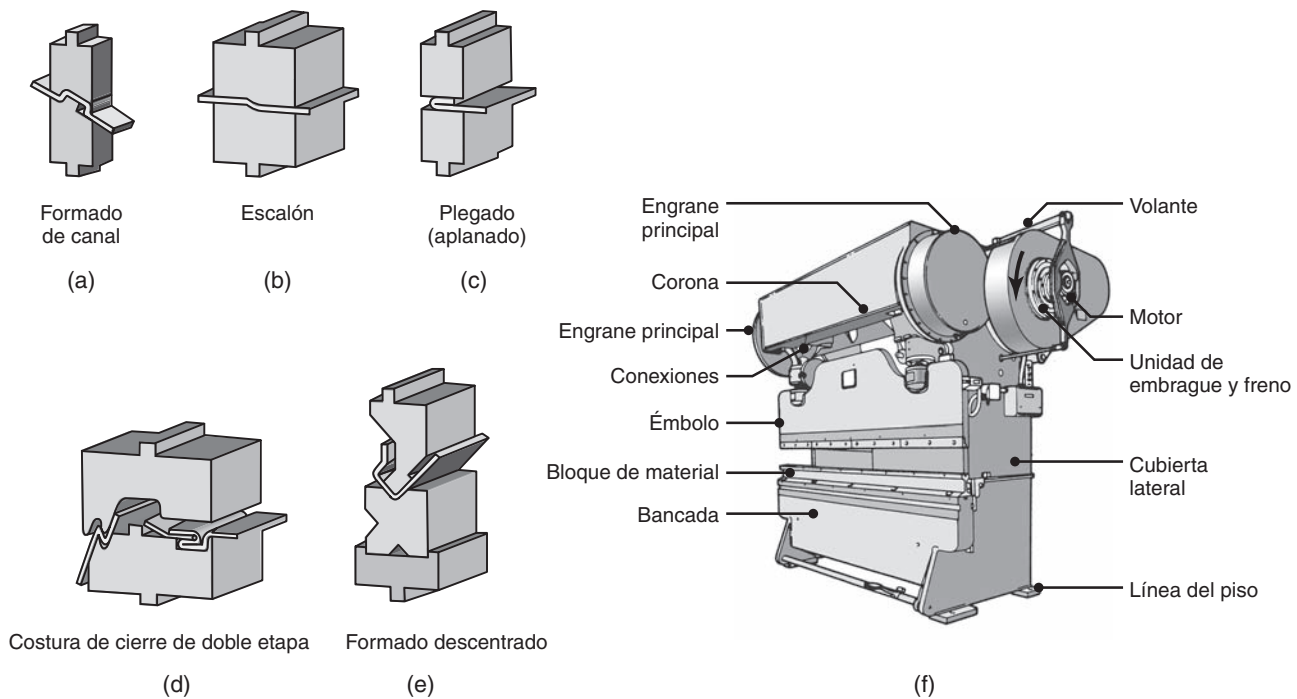


FIGURA 16.23 (a) a (e) Esquemas de diversas operaciones de doblado en una prensa de cortina. (f) Esquema de una prensa de cortina. Fuente: Cortesía de Verson Allsteel Company.

en prensas mecánicas o hidráulicas, y es particularmente adecuada para pequeños lotes de producción. Como se ve en la figura 16.23, el herramental es simple, los movimientos sólo son hacia arriba y hacia abajo y se adaptan con facilidad a una amplia variedad de formas. Además, el proceso se puede automatizar sin problemas para altos lotes de producción de bajo costo. Los *materiales para matrices* que se trabajan en prensas plegadoras pueden variar desde madera dura (para materiales de baja resistencia y pequeños lotes de producción) hasta carburos para hojas de materiales fuertes y abrasivos, y también se eligen a fin de mejorar la vida de la matriz. Sin embargo, para la mayoría de las aplicaciones, suelen utilizarse matrices de acero al carbono o de hierro gris.

Doblado en máquinas de cuatro correderas. El doblado de piezas relativamente cortas se puede efectuar en una máquina como la mostrada en la figura 16.22b, en la cual los movimientos laterales de las matrices se controlan y sincronizan con el movimiento vertical a fin de dar la forma deseada a la parte. Este proceso es útil para fabricar tubería y conduits con costura, bujes, sujetadores y diversos componentes de maquinaria.

Doblado con rodillo. En este proceso (fig. 16.22c), las placas se doblan mediante un juego de rodillos. Se pueden obtener diversas curvaturas al ajustar la distancia entre los tres rodillos. El proceso es flexible y se utiliza ampliamente con el propósito de doblar placas para aplicaciones como calderas, recipientes cilíndricos a presión y diversos miembros estructurales curvos. En la figura 16.22d se muestra el doblado de una cinta con un rodillo deformador hecho de poliuretano, que se adapta al cambio de forma conforme el rodillo duro superior presiona sobre la cinta.

Acanalado. En el *acanalado*, la periferia de la hoja metálica se dobla dentro de la cavidad de una matriz (fig. 16.24). El canal proporciona rigidez a la parte al aumentar el momento de inercia de esa sección. Igualmente, los canales mejoran la apariencia de la parte y eliminan las orillas afiladas expuestas, que pueden ser peligrosas.

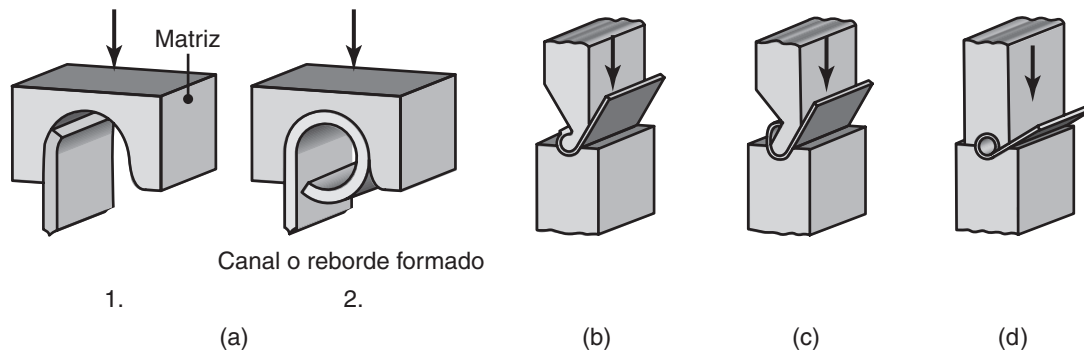


FIGURA 16.24 *a)* Formado de canales con una matriz simple. *(b)* Acanalado inicial. *(d)* Canal formado con dos matrices en una prensa de cortina.

Rebordeado. Este es un proceso de doblado de las orillas de las hojas metálicas, por lo común a 90° . En el **rebordeado por contracción** (fig. 16.25a), el borde se somete a esfuerzos circunferenciales de compresión, los cuales, si son excesivos, pueden hacer que la periferia del reborde se arrugue. La tendencia a la formación de pliegues aumenta al disminuir el radio de curvatura del reborde. En el **rebordeado por estiramiento**, la periferia del reborde se somete a esfuerzos de tensión que, si son excesivos, pueden ocasionar agrietamiento a lo largo de la periferia.

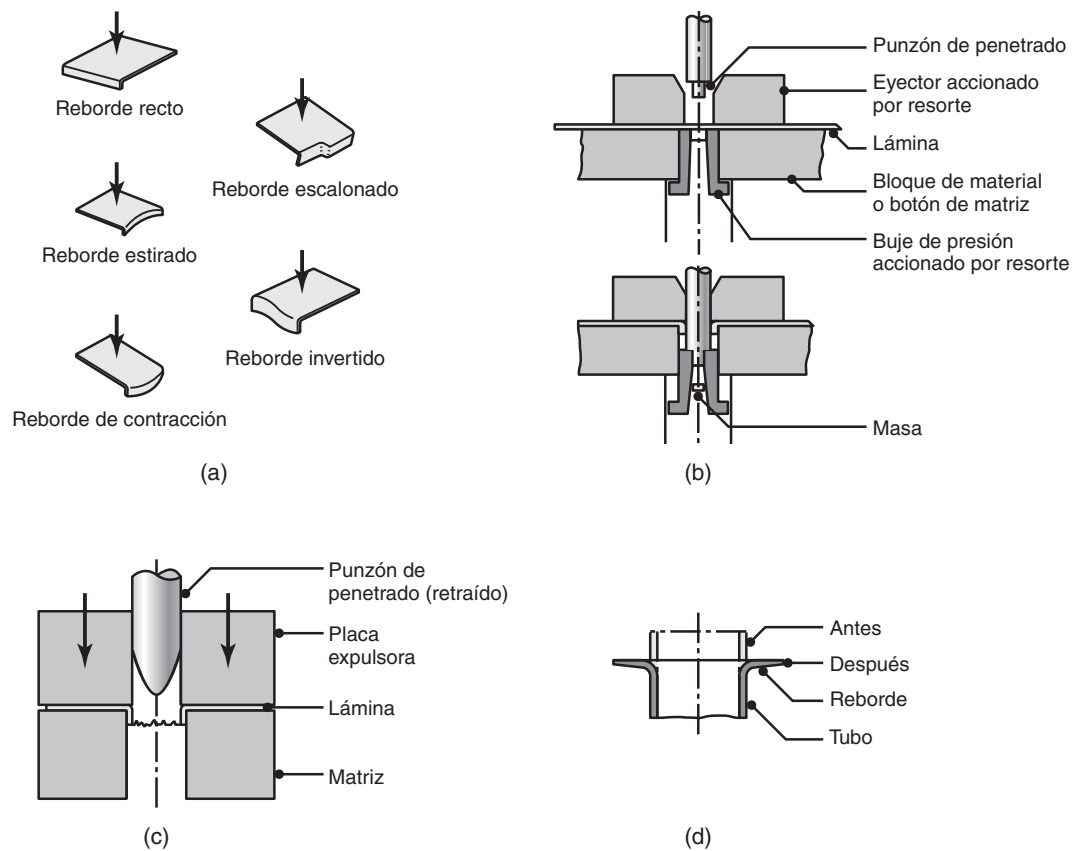


FIGURA 16.25 Diferentes operaciones de rebordeado. *(a)* Rebordes en una lámina plana. *(b)* Producción de orificios rebordeados. *(c)* Penetrado de hoja metálica para formar un reborde. En esta operación no tiene que haberse preformado un orificio antes de que descienda el punzón. Sin embargo, obsérvese las orillas rugosas a lo largo de la circunferencia del reborde. *(d)* Rebordeado de un tubo. Nótese el adelgazamiento de la orilla del reborde.

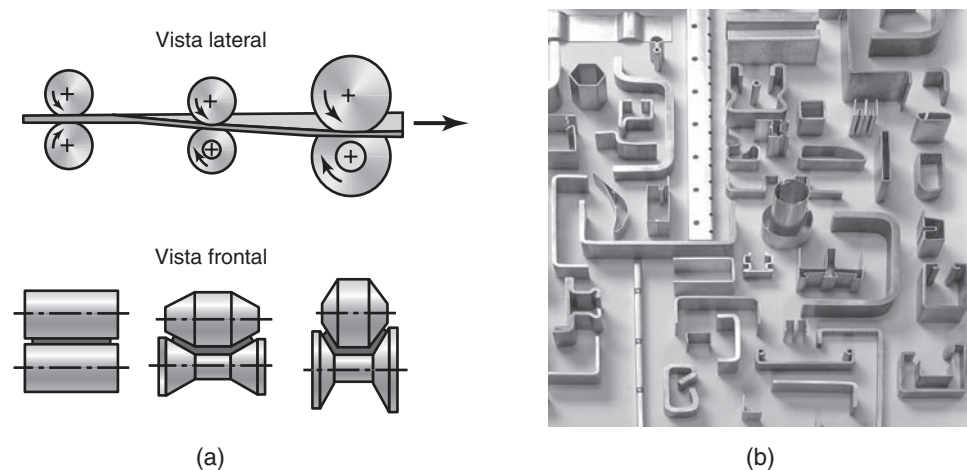


FIGURA 16.26 (a) Esquema del proceso de formado con rodillos. (b) Ejemplos de secciones transversales formadas con rodillos. Fuente: (b) Cortesía de Sharon Custom Metal Forming Inc.

Formado por rodillos. Este proceso, al que también se llama *formado por rodillos de contorno* o *formado por laminado en frío*, se utiliza para formar hojas metálicas de longitud continua y grandes lotes de producción. Conforme pasa a través de un conjunto de rodillos, la cinta metálica se dobla en etapas consecutivas (fig. 16.26). Después la cinta formada se cizalla en longitudes específicas y se apila de manera continua.

Los productos que suelen formarse por rodillos son los tableros, marcos para puertas y pinturas, canales, canalones, laterales, y tubos y tubería con costuras de cierre (ver sección 32.5). La longitud de la parte sólo se limita por la cantidad de material que alimenta a los rodillos desde el rollo de material. El espesor de la hoja por lo regular varía de casi 0.125 mm a 20 mm (0.005 a 0.75 pulgadas). En general, las velocidades de formado son menores a 1.5 m/s (300 pies/min), aunque pueden ser mucho mayores para aplicaciones especiales.

El diseño y la secuencia de los rodillos (que por lo común se accionan por medios mecánicos) requieren gran experiencia. Además, deben considerarse las tolerancias dimensionales y la recuperación o restitución elástica, así como el desgarramiento y pandeo de la cinta. Es común que los rodillos se fabriquen con acero al carbono o hierro gris y se recubran con cromo, a fin de dar un mejor acabado superficial al producto formado y mejorar la resistencia al desgaste de los rodillos. Se pueden utilizar lubricantes para reducir el desgaste de los rodillos, mejorar el acabado superficial y enfriar los rodillos y la hoja que se está formando.

Doblado y formado de tubos. El doblado y conformado de tubos y otras secciones huecas requiere herramental especial debido a la tendencia al pandeo y al plegado, como se observa al tratar de doblar un tubo de cobre o incluso un popote de plástico para bebidas. El método más antiguo para doblar un tubo o una tubería consiste en rellenar su interior con partículas sueltas (comúnmente, arena) y después doblarlo sobre un soporte adecuado. La función del relleno es evitar que el tubo se pandee hacia dentro; una vez doblado, se sacude y se le saca la arena. Los tubos también se pueden rellenar con diversos mandriles flexibles internos (fig. 16.27), con el mismo propósito que la arena. Debido a su menor tendencia al pandeo, un tubo relativamente grueso que se vaya a formar con un radio grande de doblado puede doblarse con seguridad sin el uso de rellenos o de insertos (ver también *hidroformado de tubos*, sección 16.8).

El formado de tubos y de formas tubulares, como los tubos de escape o de alimentación de combustible y los múltiples de escape, también se puede efectuar mediante la *presión interna de un fluido* (reemplazando el inserto de poliuretano), sellando los extremos por medios mecánicos. En este proceso (*hidroformado de tubos*), la parte se expan-

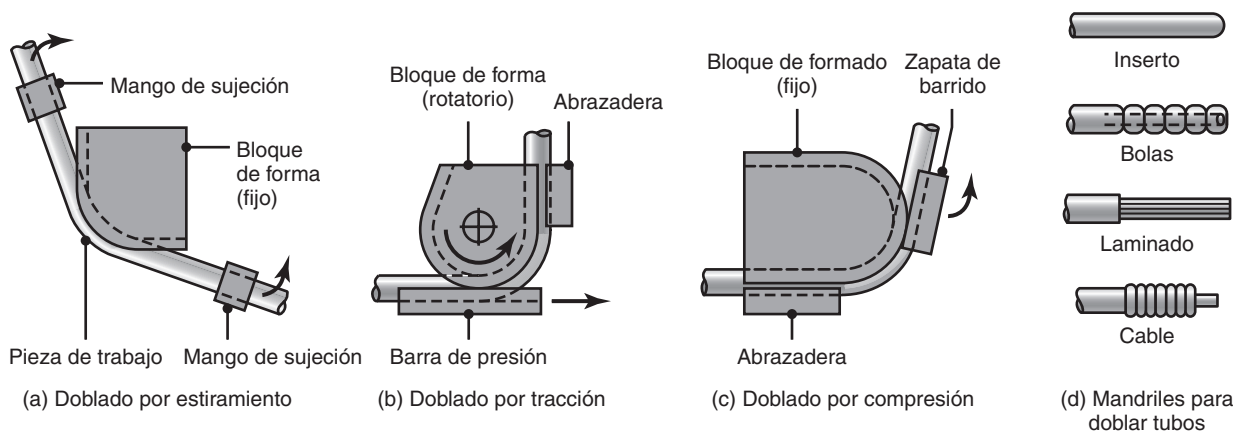


FIGURA 16.27 Métodos para doblar tubos. Con frecuencia se requieren mandriles internos o rellenar los tubos con materiales granulados, como arena, para evitar el colapso de los tubos durante el doblado. También se pueden doblar mediante una técnica que consiste en un resorte rígido de tensión helicoidal, en el que se inserta el tubo. La holgura entre el DE del tubo y el DI del resorte es pequeña, por lo que el tubo no se puede torcer y el doblado es uniforme.

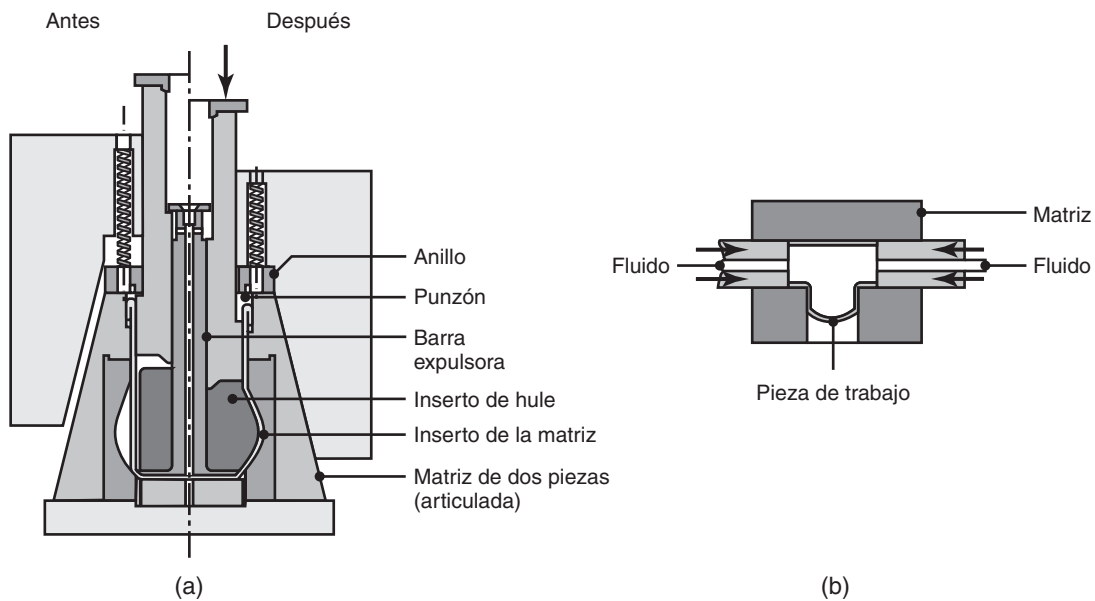


FIGURA 16.28 (a) Abombado de una parte tubular con un inserto flexible. Las jarras para agua se pueden fabricar mediante este método. (b) Producción de accesorios para plomería mediante la expansión de piezas tubulares sometidas a presión interna. Después se punzona hacia fuera el fondo de la pieza para producir una "T". Fuente: J. A. Schey.

de en una matriz hembra dividida, a presiones del orden de 600 MPa (90,000 psi). Después se abre la matriz para retirar la parte formada (fig. 16.28b).

Formado de orificios rebordeados, penetrado y abocardado. En el *formado de orificios rebordeados* (fig. 16.25b), primero se punzona un orificio y después se expande como un reborde. Los rebordes también pueden producirse mediante penetrado con un punzón de forma (fig. 16.25c). Los extremos de tubo se pueden rebordar además por medio de un proceso similar (fig. 16.25d). Cuando el ángulo de doblado es me-

nor a 90° (como en los accesorios con extremos cónicos), al proceso se le llama *abocardado*. En estas operaciones son importantes las condiciones de las orillas (ver fig. 16.3). Si se estira el material, se producen altos esfuerzos a la tensión a lo largo de la periferia (esfuerzos circunferenciales de tensión) que pueden provocar agrietamiento y desgarramiento del reborde.

Al aumentar la relación del diámetro del reborde con respecto al diámetro del orificio, las deformaciones se incrementan proporcionalmente. Dependiendo de la rugosidad de la orilla, existirá una tendencia al agrietamiento a lo largo de la periferia exterior del reborde. Para reducir esta posibilidad y mejorar su acabado superficial, las orillas cizalladas o punzonadas se pueden rasurar con una herramienta afilada (ver fig. 16.9).

Plegado y costura. En el proceso de *plegado* (también llamado *doblez de bordes o aplanamiento*), la orilla de la hoja se dobla sobre sí misma (fig. 16.23c). El plegado aumenta la rigidez de la parte, mejora su apariencia y elimina las orillas afiladas. La costura comprende la unión de dos orillas de hojas metálicas mediante el plegado (fig. 16.23d). Las costuras dobles se efectúan mediante un proceso similar utilizando rodillos con formas especiales para uniones herméticas al agua y al aire, como se necesitan en los contenedores de alimentos y bebidas.

Abombado. Este proceso implica la colocación de una parte tubular, cónica o curvilínea dentro de una matriz hembra dividida, expandiéndola después, por lo común con un inserto de poliuretano (fig. 16.28a). Luego se retrae el punzón, se regresa el inserto a su forma original (por medio de recuperación elástica total) y se retira la parte formada abriendo la matriz dividida. Productos típicos fabricados de esta manera son las jarras para café y agua, barriles de cerveza y canales en los tambores de aceite. Para partes con formas complejas, el inserto (en lugar de ser cilíndrico) puede tener otra forma a fin de aplicar mayores presiones en regiones críticas de la parte. Las ventajas de utilizar insertos de poliuretano es que son muy resistentes a la abrasión, al desgaste y a los lubricantes, además de que no dañan el acabado superficial de la parte que se está formando.

Dados o matrices segmentadas. Estas matrices consisten en segmentos individuales que se colocan dentro de la parte a formar y se expanden de manera mecánica, por lo general en la dirección radial. Después se retraen para retirar la parte formada. Las matrices segmentadas son relativamente económicas y se pueden utilizar para grandes lotes de producción.

EJEMPLO 16.3 Manufactura de fuelles

Los fuelles se manufacturan mediante un proceso de abombado, como se muestra en la figura 16.29. Una vez que el tubo se abomba en diferentes puntos equidistantes, se comprime axialmente para colapsar de manera uniforme las regiones abombadas, formando así el fuelle. El material del tubo debe ser capaz de soportar las grandes deformaciones implícitas en el proceso de colapsado sin desarrollar grietas.

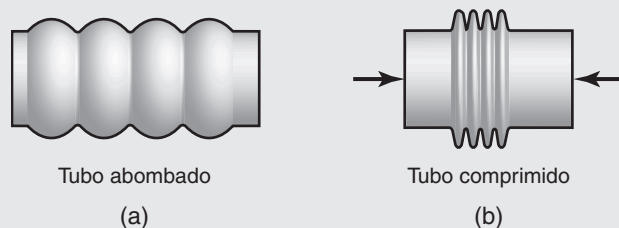


FIGURA 16.29 Pasos en la manufactura de fuelles.

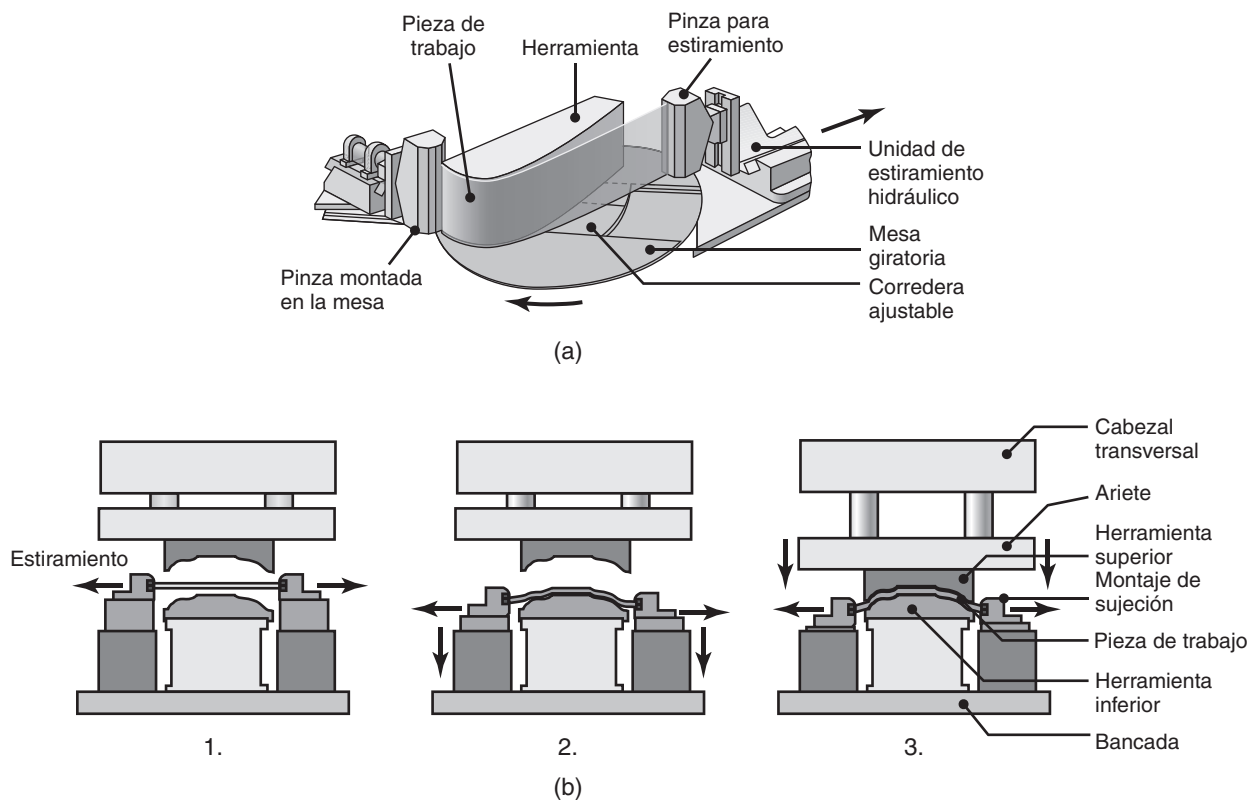


FIGURA 16.30 Esquema de un proceso de formado por estiramiento. Las cubiertas de aluminio para aeronaves se pueden fabricar mediante este método. *Fuente:* Cortesía de Ciryl Bath Co.

Conformado por estiramiento. En el *conformado por estiramiento*, la hoja metálica se sujeta por sus extremos y después se estira sobre una matriz macho (*bloque o punzón formador*). Ésta se mueve hacia arriba, hacia abajo o lateralmente, lo que depende del diseño particular de la máquina (fig. 16.30). El conformado por estiramiento se utiliza en la fabricación de tableros para cubiertas de alas de aviones, fuselajes y cascos para embarcaciones. Por ejemplo, las cubiertas de aluminio para los aviones Boeing 767 y 757 se fabrican mediante conformado por estiramiento, con una fuerza de tensión de 9 MN (2 millones de libras). Las hojas rectangulares son de 12 m $\times$ 2.5 m $\times$ 6.4 mm (40 pies $\times$ 8.3 pies $\times$ 0.25 pulgadas). Aunque este proceso suele utilizarse para la producción de bajos volúmenes, es versátil y económico, en particular para la industria aeroespacial.

En la mayoría de las operaciones, la pieza en bruto es una hoja rectangular sujeta en sus extremos más angostos y estirada a lo largo, permitiendo así que el material se contraiga a lo ancho. El control de la cantidad de estiramiento es importante para evitar el desgarre. La conformación por estirado no puede producir partes con contornos afilados o con esquinas reentrantes (depresiones sobre la superficie de la matriz). Se pueden utilizar diversos equipos accesorios junto con el conformado por estiramiento, incluyendo formado adicional con matrices macho y hembra mientras la parte se encuentra bajo tensión. Es común que las matrices para conformado por estiramiento se fabriquen con aleaciones de zinc, acero, plásticos o madera. La mayoría de las aplicaciones requiere muy poca, o ninguna, lubricación.

16.7 | Embutido profundo

Muchas partes fabricadas con hojas metálicas son cilíndricas o tienen forma de caja, como recipientes y sartenes, todo tipo de contenedores para alimentos y bebidas (fig.

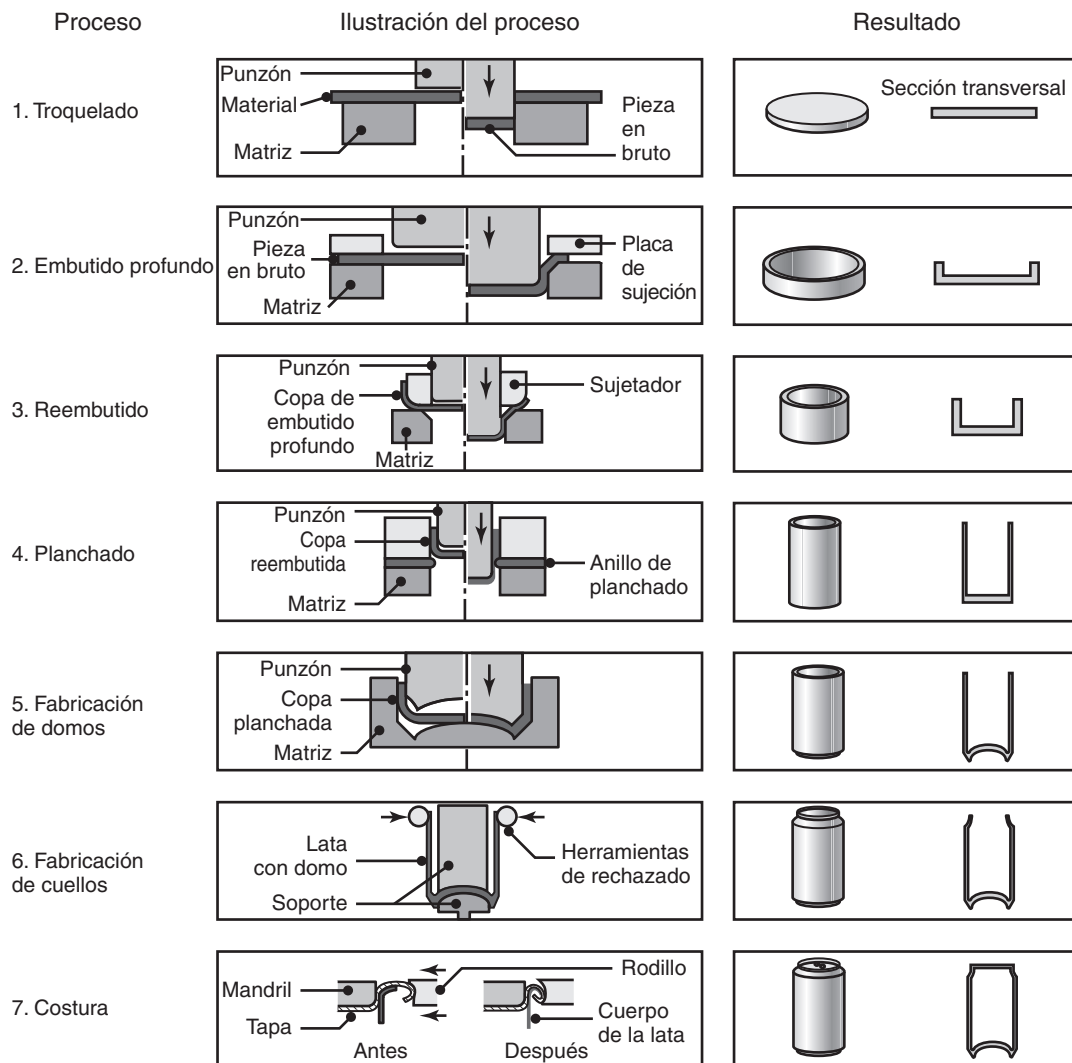


FIGURA 16.31 Procesos de formado metálico comprendidos en la manufactura de una lata de aluminio de dos piezas para bebidas.

16.31), fregaderos de acero inoxidable para cocinas, recipientes y tanques de combustible. Por lo común, dichas partes se fabrican mediante un proceso en el que un punzón impulsa una lámina metálica bruta dentro de la cavidad de una matriz (fig. 16.32a). Aunque al proceso generalmente se le llama *embutido profundo* por su capacidad para producir partes profundas, también se utiliza para fabricar partes poco profundas o que tienen una profundidad moderada.

En el proceso básico de embutido profundo, se coloca una pieza en bruto de hoja metálica redonda sobre la abertura de una matriz circular y se mantiene en su lugar con un **placa de sujeción** o *anillo de sujeción* (fig. 16.32b). El punzón baja y empuja la lámina dentro de la cavidad de la matriz, formando una copa o depresión. Las variables importantes en el embutido profundo son las propiedades de la hoja metálica, la relación del diámetro de la pieza en bruto (D_o); el diámetro del punzón (D_p); la holgura (c) entre el punzón y la matriz; el radio del punzón (R_p); la relación de la esquina de la matriz o radio de transición (R_d); la fuerza de la placa de sujeción; y la fricción y la lubricación entre todas las superficies de contacto.

Durante la operación de embutido profundo, el movimiento de la pieza en bruto dentro de la cavidad de la matriz induce esfuerzos circunferenciales de compresión en el re-

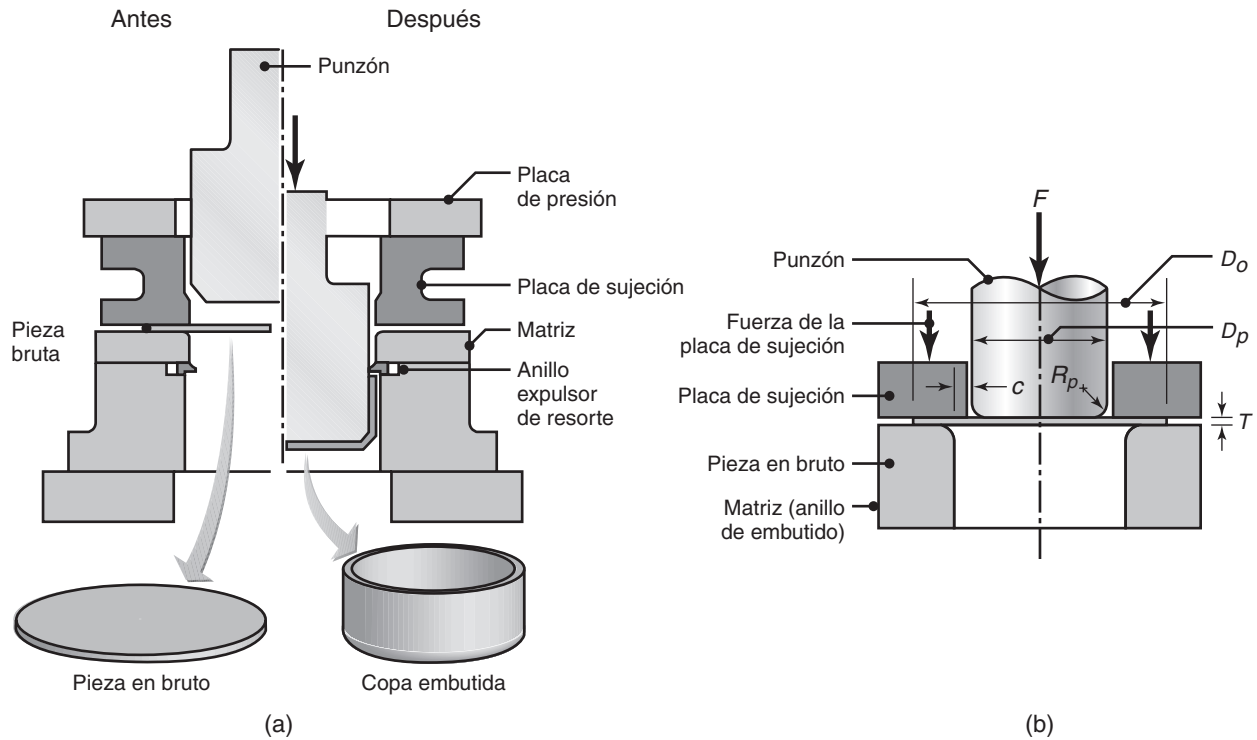


FIGURA 16.32 (a) Esquema del proceso de embutido profundo en una pieza en bruta de lámina metálica circular. El anillo expulsor facilita la expulsión de la copa formada del punzón. (b) Variables de proceso en el embutido profundo. Salvo por la fuerza de punzonado (F), todos los parámetros indicados en la figura son variables independientes.

borde o ceja, que tienden a hacer que éste se *pliegue* durante el embutido. Este fenómeno se puede visualizar simplemente intentando forzar una pieza circular de papel dentro de una cavidad redonda, como un vaso para beber. Las arrugas pueden reducirse o eliminarse si la placa de sujeción se mantiene bajo el efecto de cierta fuerza. Para mejorar el desempeño, se puede controlar la magnitud de dicha fuerza en función del recorrido del punzón.

Debido a las múltiples variables involucradas, es difícil calcular directamente la *fuerza de punzonado* (F). Sin embargo, como se ha demostrado, la *fuerza máxima de punzonado* ($F_{\text{máx}}$) se puede estimar mediante la fórmula:

$$F_{\text{máx}} = \pi D_p T (UTS) [(D_o/D_p) - 0.7] \quad (16.9)$$

donde la nomenclatura es la misma que en la figura 16.32b. Es evidente que la fuerza aumenta al incrementarse el diámetro, el espesor, la resistencia y la relación (D_o/D_p) de la pieza en bruta. La pared de la copa se somete principalmente a un esfuerzo longitudinal (vertical) de tensión por la fuerza del punzonado. La elongación debida a este esfuerzo hace que la pared de la copa se vuelva más delgada, y si es excesiva, puede ocasionar que la copa se *desgarre*.

16.7.1 Capacidad de embutido profundo

En una operación de embutido profundo, la falla suele ocurrir debido al *adelgazamiento* de la pared de la copa bajo los altos esfuerzos longitudinales de tensión. Si seguimos el movimiento del material conforme éste fluye dentro de la cavidad de la matriz, se puede ver que la hoja metálica (a) debe ser capaz de soportar una reducción de la anchura por la reducción del diámetro, y (b) también debe resistir el adelgazamiento por los esfuerzos longitudinales de tensión en la pared de la copa. En general, la capacidad de embutido profundo se expresa mediante la **relación límite de embutido** (LDR, por sus siglas en inglés), como:

$$\text{LDR} = \frac{\text{Diámetro máximo de la pieza bruta}}{\text{Diámetro del punzón}} = \frac{D_o}{D_p} \quad (16.10)$$

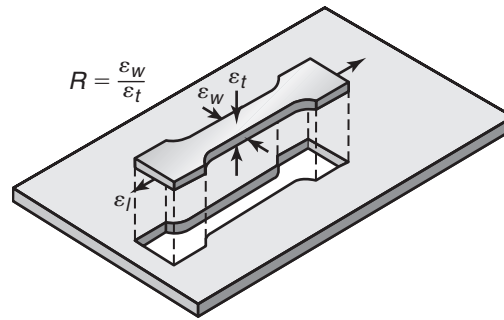


FIGURA 16.33 Deformaciones en una probeta para ensayo de tensión retirada de una lámina metálica. Estas deformaciones se utilizan para determinar la anisotropía normal y planar de la hoja metálica.

Se ha encontrado que si una hoja metálica se puede embutir profundamente con éxito para producir una parte redonda con forma de copa, es función de la **anisotropía normal** (R) de la hoja metálica (también llamada *anisotropía plástica*). La anisotropía normal se define en términos de las deformaciones reales que sufre el espécimen bajo tensión (fig. 16.33):

$$R = \frac{\text{Deformación del ancho}}{\text{Deformación del espesor}} = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad (16.11)$$

Si se desea determinar la magnitud de R , primero se prepara una probeta para ensayo de tensión y se somete a una elongación de 15% a 20%. Las deformaciones reales que sufre la hoja se calculan como se vio en la sección 2.2. Debido a que las hojas laminadas en frío por lo general tienen anisotropía en su dirección *planar*, el valor R de un espécimen cortado de una hoja laminada depende de su orientación con respecto a la dirección de laminación de la hoja. Para esto, se calcula un valor promedio (R_{prom}) a partir de la ecuación:

$$R_{\text{prom}} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (16.12)$$

donde los subíndices son los ángulos con respecto a la dirección de laminado de la hoja. En la tabla 16.4 se dan algunos valores comunes de R_{prom} .

En la figura 16.34 se muestra la relación determinada de manera experimental entre R_{prom} y la relación límite de embutido. Se ha establecido que ninguna otra propiedad mecánica de la hoja metálica muestra alguna relación consistente con la LDR como lo hace R_{prom} . Entonces, si se utilizan los resultados de un simple ensayo de tensión y se ob-

TABLA 16.4

Intervalos característicos de anisotropía normal promedio, R_{prom} para diferentes hojas (láminas) metálicas

Aleaciones de zinc	0.4–0.6
Acero laminado en caliente	0.8–1.0
Acero efervescente, laminado en frío	1.0–1.4
Acero calmado en aluminio, laminado en frío	1.4–1.8
Aleaciones de aluminio	0.6–0.8
Cobre y latón	0.6–0.9
Aleaciones de titanio (α)	3.0–5.0
Aceros inoxidables	0.9–1.2
Aceros de baja aleación, de alta resistencia	0.9–1.2

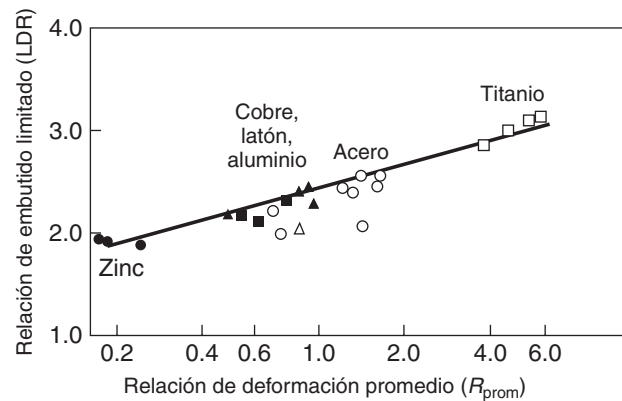


FIGURA 16.34 Relación entre la anisotropía normal promedio y la relación límite de embutido para diferentes metales. Fuente: M. Atkinson.

tiene la anisotropía normal de la hoja metálica, puede determinarse la relación límite de embutido.

Borde ondulado. En el embutido, las orillas de las copas pueden ondularse, fenómeno al que se llama *borde ondulado u orejas* (fig. 16.35). Los bordes ondulados son objetables en las copas embutidas porque tienen que recortarse, ya que no cumplen algún propósito útil e interfieren en el procesamiento posterior de la copa, lo que produce desechos. La **anisotropía planar** de la hoja causa el borde ondulado, y el número de ondulaciones producidas u orejas puede ser dos, cuatro u ocho, dependiendo de la historia de procesamiento y la microestructura de la hoja. Si ésta es más fuerte en la dirección de laminación que en la dirección transversal y la resistencia varía de manera uniforme con respecto a la orientación, entonces se formarán dos ondulaciones. Si la hoja tiene resistencia elevada en diferentes orientaciones, entonces se formarán más ondulaciones.

La anisotropía planar de la hoja se denota mediante ΔR . Ésta se define en términos de valores R direccionales a partir de la ecuación:

$$\Delta R = \frac{R_0 - 2R_{45} + R_{90}}{2} \quad (16.13)$$

Cuando $\Delta R = 0$, no se forman ondulaciones. La altura de las ondulaciones aumenta cuando se incrementa ΔR .

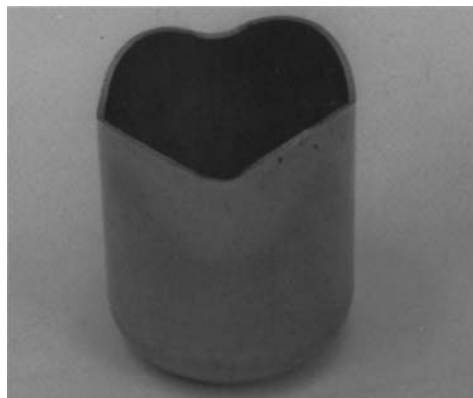


FIGURA 16.35 Ondulación en una copa embutida de acero originada por la anisotropía planar de la hoja (lámina) metálica.

Es evidente que la capacidad de embutido profundo se refuerza mediante un valor alto de R_{prom} y un valor bajo de ΔR . Sin embargo, las hojas metálicas con R_{prom} elevado también suelen tener valores elevados de ΔR . Se han desarrollado continuamente texturas de hojas metálicas para mejorar la capacidad de embutido por el control del tipo de elementos de aleación en el material, así como por diferentes parámetros de procesamiento durante la laminación de la hoja.

16.7.2 Prácticas de embutido profundo

Se han establecido algunas guías para lograr una práctica exitosa del embutido profundo. Por lo general, la presión de la placa de sujeción se elige entre 0.7% y 1% de la suma de la resistencia a la fluencia y la resistencia máxima a la tensión de la hoja metálica. Una fuerza demasiado elevada de la placa de sujeción aumenta la fuerza de punzonado y hace que se desgarre la pared de la copa. En cambio, si la fuerza de la placa de sujeción es muy baja, puede arrugarse.

Las holguras son usualmente de 7% a 14% mayores que el espesor de la hoja; si son demasiado pequeñas, el punzón puede perforar o cizallar la pieza en bruto. Los radios de las esquinas del punzón y de la matriz también son parámetros importantes. Si son muy pequeños, pueden provocar la fractura de las esquinas; si son muy grandes, la copa se puede arrugar, fenómeno al que se llama *fruncido*.

Con frecuencia se necesitan **perlas de embutido** (fig. 16.36) para controlar el flujo de la pieza en bruto dentro de la cavidad de la matriz. Las perlas restringen el libre flujo de la hoja metálica, doblándola y desdoblándola durante el ciclo de embutido; de ahí que aumenten la fuerza requerida para jalar la hoja dentro de la cavidad del molde. Para demostrar este fenómeno basta con colocar una cinta de papel o una hoja de aluminio entre los dedos en un arreglo similar al mostrado en la figura 13.36a. Obsérvese que ahora se necesita cierta fuerza para jalar la cinta entre los dedos. Las perlas de embutido también ayudan a reducir las fuerzas requeridas en la placa de sujeción, pues la hoja con perlas tiene mayor rigidez (debido a su mayor momento de inercia) y, de ahí, una menor tendencia al arrugado. Los diámetros de las perlas de embutido pueden variar de 13 mm a 20 mm (0.50 a 0.75 pulgada), siendo aplicable este último a los estampados grandes, como las piezas automotrices.

Las perlas de embutido también son útiles para embutir partes con *forma de caja* y *asimétricas*, ya que pueden presentar dificultades significativas en la práctica (fig. 16.36b).

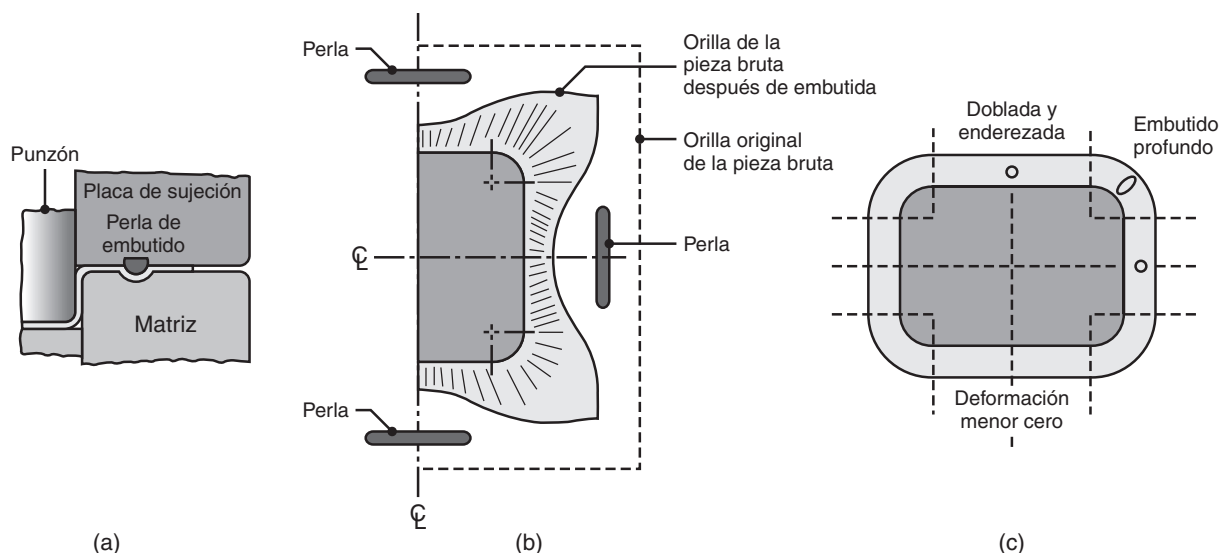


FIGURA 16.36 (a) Esquema de una perla de embutido. (b) Flujo del metal durante el embutido de una parte con forma de caja cuando se utilizan perlas para controlar el movimiento del material. (c) Deformación de las rejillas circulares en el reborde en el embutido profundo.

y c). Obsérvese en la figura 16.36c, por ejemplo, que diferentes regiones de la parte sufren diferentes tipos de deformación durante el embutido. (Recuérdese también el principio fundamental de que el material fluye hacia la menor resistencia).

Para evitar el desgarre de la hoja metálica durante el formado, con frecuencia es necesario incorporar los siguientes factores:

- El diseño y la ubicación apropiada de las perlas de embutido.
- Radios grandes de la matriz.
- Lubricación efectiva.
- Tamaño y forma apropiados de la pieza en bruto.
- El corte de todas las esquinas de las piezas en bruto cuadradas o rectangulares a 45° para reducir los esfuerzos de tensión desarrollados durante el embutido.
- El uso de piezas en bruto sin defectos internos o externos.

Planchado. En la figura 16.32 se observa que si la holgura entre el punzón y la matriz es suficientemente grande, la copa embutida tendrá paredes más gruesas en la orilla que en la base. La razón es que la orilla de la copa consiste en material del diámetro exterior de la pieza en bruto, de ahí que el diámetro se haya reducido más (y se haya vuelto más grueso) que el material que constituye el resto de la pared de la copa. En consecuencia, la copa desarrollará un espesor no uniforme de pared. El espesor de la pared de la copa se puede controlar mediante un proceso llamado *planchado*, en el que una copa embutida se empuja a través de uno o más anillos planchadores (ver fig. 16.31). La holgura entre los anillos de planchado y el punzón es menor que el espesor de pared de la copa, por lo que después del planchado ésta tiene un espesor de pared constante (e igual a la holgura, excepto por alguna pequeña recuperación elástica). Por ejemplo, las latas de aluminio para bebidas suelen pasar por entre dos y tres operaciones de planchado en una carrera, en la que la copa embutida se oprime a través de un juego de anillos planchadores.

Reembutado. Los contenedores o recipientes cuyo embutido es difícil de realizar en una sola operación, generalmente pasan por un reembutado (ver fig. 16.31). Debido a la constancia volumétrica del metal, la copa o depresión se vuelve más larga conforme se reembute a diámetros menores. En el *reembutado inverso*, la copa se coloca bocabajo sobre la matriz y después se somete a embutido en la dirección opuesta a su configuración original.

Embutido sin placa de sujeción. El embutido profundo se puede efectuar de manera satisfactoria sin una placa de sujeción, en la inteligencia de que la hoja metálica es lo suficientemente gruesa para evitar pliegues. Un intervalo característico de diámetros es:

$$D_o - D_p < 5T \quad (16.14)$$

donde T es el espesor de la hoja. Para esta operación, las matrices se contornean especialmente.

Repujado o realzado. Ésta es una operación que consiste en embutidos poco profundos o moderados, realizados con matrices coincidentes, macho y hembra, poco profundas (fig. 16.37). El repujado se utiliza sobre todo para rigidizar piezas de hojas metálicas pla-

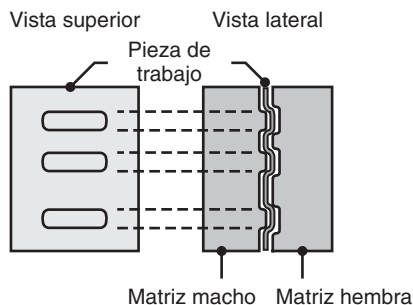


FIGURA 16.37 Operación de repujado con dos matrices. Por medio de este proceso se pueden fabricar letras, números y diseños en partes producidas con láminas metálicas.

nas y con propósitos de decoración, numeración y leyendas, como en las tapas de aluminio de las latas para bebidas.

Herramental y equipo para embutido. Los materiales más comunes para las herramientas y matrices empleados para el embutido profundo son los aceros herramienta y los hierros fundidos e incluyen matrices producidas de hierro dúctil hechos por el proceso de espuma perdida. Otros materiales tales como los carburos y los plásticos también pueden ser usados por dicho proceso (ver tabla 5.7). Los métodos para la manufactura de las matrices son descritos con detalle en la sección 14.7. Debido a la forma generalmente asimétrica de los componentes del punzón y de la matriz (como los utilizados para fabricar latas y contenedores cilíndricos), pueden manufacturarse en equipos como los de maquinado de alta velocidad en tornos controlados por computadora.

Por lo común, el equipo para el embutido profundo es una *prensa hidráulica de doble acción* o una *prensa mecánica*; se favorece generalmente a esta última por su mayor velocidad de operación. En la primera, el punzón y la placa de sujeción se controlan de manera independiente. Las velocidades del punzón suelen variar entre 0.1 y 0.3 m/s (20 y 60 pies/min).

EJEMPLO 16.4 Manufactura de latas para alimentos y bebidas

La manufactura de latas es una industria competitiva a nivel mundial, con casi 100 mil millones de latas para bebidas y 30 mil millones para alimentos producidas cada año, sólo en Estados Unidos. Estos contenedores son fuertes y ligeros (comúnmente tienen un peso inferior a 0.5 onza) y se encuentran bajo una presión interna de 90 psi, de manera confiable y sin fuga del contenido. Existen requisitos estrictos para el acabado superficial de la lata, ya que se prefieren las que tienen decorados relucientes y brillantes sobre los contenedores de apariencia opaca. Considerando todas estas características, las latas metálicas son muy económicas. Sus fabricantes cobran unos 40 dólares por 1000 latas, o 4 centavos de dólar por cada una. Por lo tanto, el costo de las latas vacías en un paquete de seis es de 24 centavos de dólar, lo que también indica la importancia del reciclado de las latas.

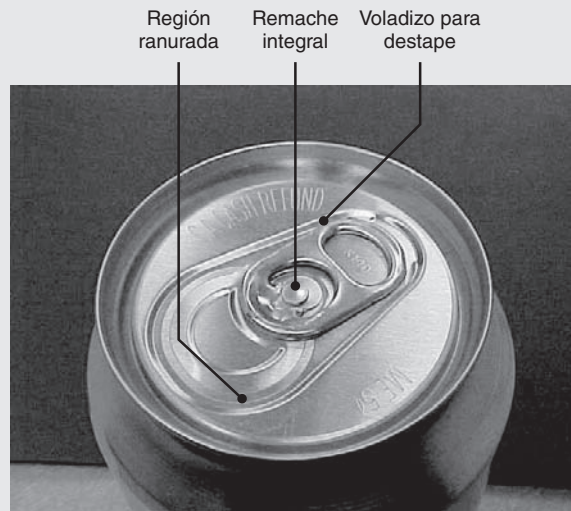
Las latas para alimentos y bebidas se pueden producir de muchas maneras; las más comunes son las de dos y tres piezas. Las latas de dos piezas consisten en el cuerpo y la tapa (fig. 16.38a). El cuerpo se fabrica de una pieza, que se ha embutido y planchado, de ahí la práctica vigente en la industria de referirse a este estilo como latas D&I (embutidas y planchadas, por sus siglas en inglés). Las latas de tres piezas se producen sujetando una tapa y un fondo a un cuerpo cilíndrico de hoja metálica.

Los cuerpos embutidos y planchados se producen a partir de numerosas aleaciones, pero las más comunes son el aluminio 3004-H19 (ver sección 6.2) y el acero



FIGURA 16.38 (a) Latas de aluminio para bebidas. Obsérvese el excelente acabado superficial.

(a)



(b)

FIGURA 16.38 (Continuación) (b) Detalle de la tapa de la lata mostrando el remache integral y las orillas ranuradas de la tapa.

A623 ASTM, con recubrimiento electrolítico de estaño. Las tapas de aluminio se utilizan para las latas tanto de acero como de aluminio y se producen de aluminio 5182-H19 o 5182-H48. La tapa tiene un conjunto demandante de requisitos de diseño, como se aprecia al revisar la figura 16.38b. No sólo debe cortarse con facilidad (ranuras curvas alrededor de la pestaña), sino que incluye un remache que se coloca en la tapa para mantener la pestaña en su lugar. La principal característica de la aleación de aluminio 5182 es que posee suficiente formabilidad para permitir el formado del remache integral sin agrietarse y tiene la capacidad de cortarse. Básicamente, las tapas se estampan a partir de una hoja de aluminio 5182, son desprendibles y se coloca un sello de plástico alrededor de su periferia. Esta capa de polímero sella el contenido después de que se cose la tapa al cuerpo de la lata, como se describe a continuación.

En la figura 16.31 se muestra el método tradicional para manufacturar los cuerpos de las latas. El proceso se inicia con piezas en bruto de 5.5 pulgadas de diámetro producidas a partir de material en hojas laminadas. Estas piezas en bruto: (a) se embuten profundamente a un diámetro de casi 3.5 pulgadas, (b) se reembuten al diámetro final de 2.6 pulgadas, (c) se planchan mediante dos o tres anillos planchadores en un paso, y (d) se les forma el domo del fondo. Las operaciones de embutido profundo y de planchado se realizan en un tipo especial de prensa que comúnmente produce latas a velocidades de más de 400 recorridos por minuto. Después de estas operaciones se efectúan muchos procesos adicionales.

El cuello del cuerpo de la lata se realiza mediante rechazado (sección 16.9), o mediante la formación de cuello por un dado o matriz (una operación de formado similar a la mostrada en la fig. 15.19a, en la que una parte tubular de pared delgada se oprime dentro de la matriz), y después se forma la orilla por rechazado. La razón del cuello en la parte superior de la lata es que el aluminio 5182 utilizado para la tapa es relativamente costoso. Entonces, al formar el cono en la parte superior de la lata, se requiere un volumen menor de material, reduciendo así el costo. De igual manera, cabe hacer notar que con frecuencia el costo de una lata se calcula hasta en millonésimas de dólar, de ahí que esta competitiva industria explote cualquier característica de diseño que reduzca su costo.

Fuente: Cortesía de J. E. Wang, Texas A&M University.

16.8 Formado con hule

En los procesos descritos en las secciones precedentes se ha observado que las matrices suelen fabricarse con materiales sólidos, como aceros y carburos. Sin embargo, en el *formado con hule* (también conocido como *proceso Guerin*), una de las matrices o dados de un juego se elabora con material flexible, por lo común una membrana de poliuretano. Los poliuretanos se utilizan ampliamente debido a estas cualidades:

- Resistencia a la abrasión.
- Resistencia al corte o desgarramiento por rebabas u otras orillas afiladas en la hoja metálica.
- Larga resistencia a la fatiga.

En el doblado y repujado (realzado) de las hojas metálicas mediante este proceso, la matriz hembra se reemplaza con una placa de hule (fig. 16.39). Obsérvese que la su-

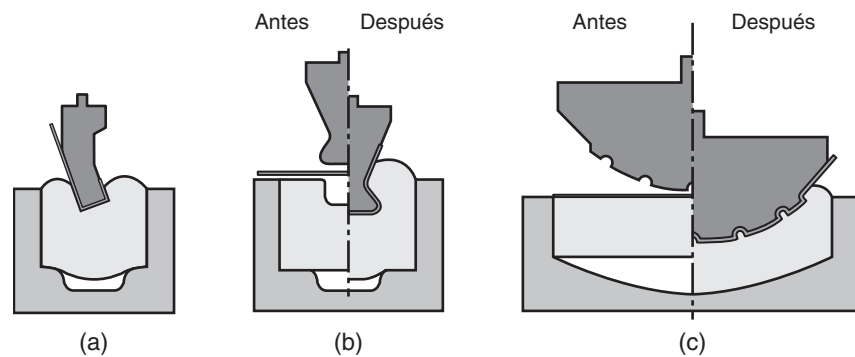


FIGURA 16.39 Ejemplos de doblado y repujado de hojas metálicas con un punzón metálico y con un soporte flexible que sirve como matriz hembra. *Fuente:* Cortesía de Polyurethane Products Corporation.

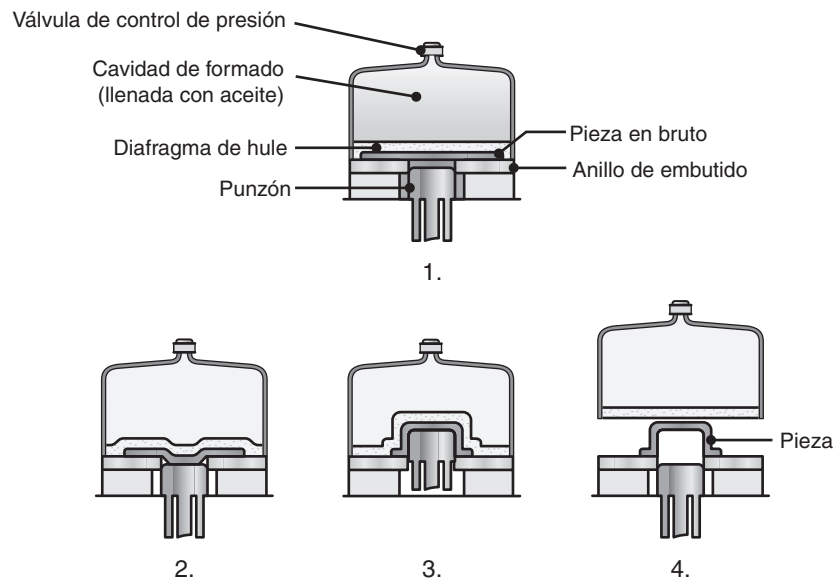


FIGURA 16.40 Proceso de hidroformado (o formado con fluidos). Obsérvese que en contraste con el proceso ordinario de embutido profundo, la presión en el domo fuerza las paredes de la copa contra el punzón. La copa viaja con el punzón; de esta manera, se mejora la capacidad de embutido profundo.

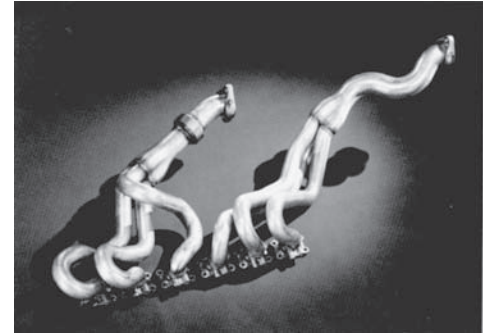
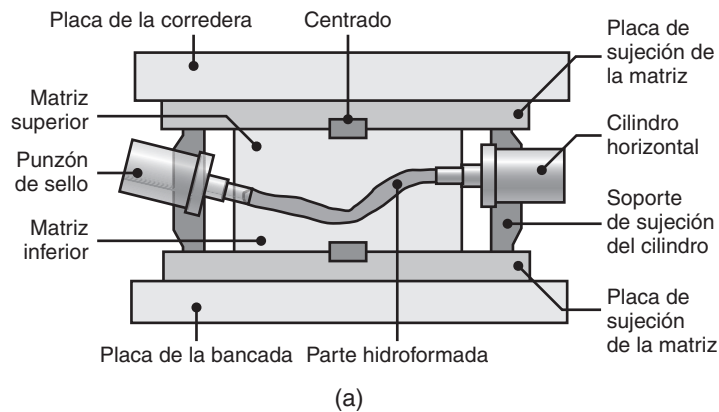


FIGURA 16.41 (a) Esquema del proceso de hidroformado de tubos. (b) Ejemplo de partes hidroformadas en tubos. Mediante el hidroformado en tubos se producen múltiples de escapes automovilísticos y componentes estructurales, estructuras de bicicletas, y accesorios hidráulicos y neumáticos. Fuente: Cortesía de Schuler GmbH.

perficie exterior de la hoja se protege del daño o de las rayaduras, ya que no entra en contacto con una superficie metálica dura durante el formado. Las presiones características en el formado con hule son del orden de 10 MPa (1500 psi).

En el **hidroformado**, o *proceso de formado fluido* (fig. 16.40), la presión sobre la membrana de hule se controla a lo largo del ciclo de formado con una presión máxima de hasta 100 MPa (15,000 psi). Este procedimiento permite un control muy estrecho de la parte durante el formado y evita los pliegues y el desgarramiento. Se obtienen embutidos más profundos que en el embutido profundo convencional, ya que la presión alrededor de la membrana de hule fuerza la copa contra el punzón. El resultado es que aumenta la fricción en la interfaz punzón-copa, que después reduce los esfuerzos de tensión longitudinal en la copa y, de esta forma, retrasa la fractura.

El control de las condiciones de la fricción en el formado con hule, así como en otras operaciones de formado de hojas, puede ser un factor crítico para fabricar partes de manera satisfactoria. También es importante el uso de lubricantes apropiados y sus métodos de aplicación. En el *hidroformado de tubos* (fig. 16.41), el tubo metálico se forma en una matriz y se presuriza internamente mediante un fluido. Este proceso, que ahora se aplica más, puede formar tubos simples y diversas formas huecas intrincadas (fig. 16.41b). Las partes fabricadas por medio de este proceso incluyen los componentes de los escapes de automóvil y los componentes estructurales tubulares.

Si se seleccionan apropiadamente, los procesos de formado con hule y de hidroformado tienen las siguientes ventajas: (a) capacidad de obtener formas complejas, (b) formación de partes con hojas laminadas de diversos materiales y recubrimientos, (c) flexibilidad y facilidad de operación, (d) evitación del daño a las superficies de la hoja, (e) bajo desgaste de la matriz o dado, y (f) bajo costo de herramental.

16.9 | Rechazado

El *rechazado* es un proceso que comprende el formado de partes asimétricas sobre un mandril mediante el uso de diversas herramientas y rodillos, proceso que es semejante al de formar arcilla en un torno de alfarero.

Rechazado convencional. En el *rechazado convencional*, una pieza en bruto circular fabricada con una hoja metálica plana o preformada se coloca y se mantiene contra un mandril y se gira, mientras que una herramienta rígida deforma y da forma al material sobre el mandril (fig. 16.42a). La herramienta puede accionarse manualmente o (para mayores capacidades de producción) mediante mecanismos controlados por computadora.

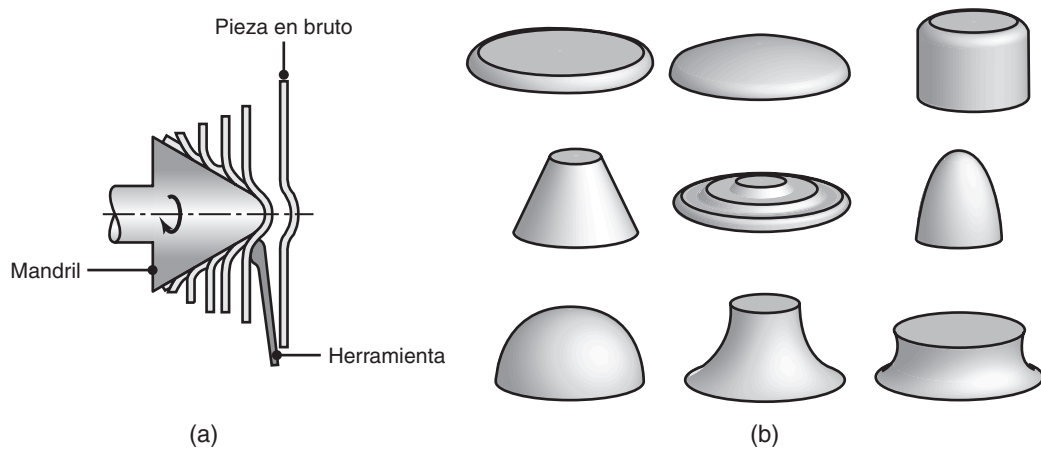


FIGURA 16.42 (a) Esquema del proceso convencional de rechazado. (b) Tipos de partes rechazadas convencionalmente. Todas las partes son asimétricas.

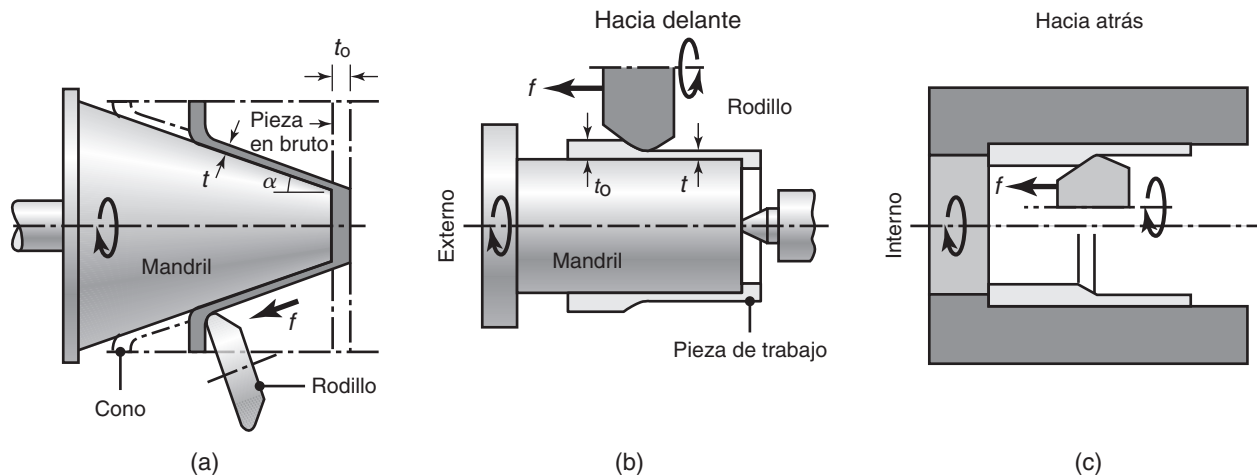


FIGURA 16.43 (a) Esquema del proceso de rechazado cortante para fabricar partes cónicas. Al mandril se le puede dar forma para rechazar partes curvilíneas. (b) y (c) Esquemas del proceso de rechazado de tubos.

Por lo general, el proceso comprende una secuencia de pases y requiere habilidad considerable. El rechazado convencional es particularmente adecuado para formas cónicas y curvilíneas (fig. 16.42b), que de otra manera sería difícil o antieconómico producir. Los diámetros de la parte pueden llegar hasta 6 m (20 pies). Aunque la mayoría de las operaciones de rechazado se realizan a temperatura ambiente, las partes gruesas y los metales con altas resistencias o baja ductilidad exigen rechazado a temperaturas elevadas.

Rechazado cortante. También conocido como *rechazado de potencia* o *motorizado*, *torneado con flujo*, *hidrorrechazado*, y *forjado giratorio* o *de rotación*, esta operación produce formas cónicas asimétricas o curvilíneas reduciendo el espesor de la hoja y manteniendo su diámetro máximo (de la pieza en bruto) (fig. 16.43a). Se puede utilizar un solo rodillo de formado, pero son preferibles dos para equilibrar las fuerzas que actúan sobre el mandril. Las partes características producidas son cubiertas para motores de cohetes y conos de nariz para misiles. Mediante el rechazado cortante se pueden formar partes hasta de 3 m (10 pies) de diámetro. En esta operación se desperdicia poco material y se puede terminar en relativamente poco tiempo, algunas veces en unos cuantos segundos.

Es posible rechazar diversas formas con herramental bastante simple, que por lo regular está fabricado con acero para herramientas.

En general, la *capacidad de rechazo* de un metal se define como la máxima reducción de espesor a la que se puede someter una pieza en el proceso de rechazo sin que ésta se fracture. Se ha encontrado que la capacidad de rechazo está relacionada con la reducción de área del material en el ensayo de tensión, al igual que su capacidad de doblado (ver fig. 16.18). Por lo tanto, si un metal tiene una reducción de área de 50% o mayor, su espesor se puede reducir hasta 80% en un solo pase de rechazo. Para metales con baja ductilidad, la operación se efectúa a temperaturas elevadas, calentando la pieza en bruto en un horno y transfiriéndola rápidamente al mandril.

Rechazo de tubos. En el *rechazo de tubos* se reduce, o se le da forma, al espesor de piezas en bruto cilíndricas, rechazándolas sobre un mandril redondo, sólido, mediante rodillos (fig. 16.43). La reducción del espesor de pared produce un tubo más largo. Esta operación se puede realizar externa o internamente, por lo que se utilizarían diversos perfiles externos e internos a partir de piezas cilíndricas en bruto con espesor de pared constante. Las partes se pueden rechazar *en avance* o *en reversa*; esta nomenclatura es similar a la de la extrusión directa e indirecta, como se describe en la sección 15.2. La máxima reducción de espesor por pase en el rechazo de tubos está relacionada con la reducción por tensión del área del material, como en el rechazo cortante. El rechazo de tubo se puede utilizar en la fabricación de partes para motores de cohetes, de misiles y de propulsión, recipientes a presión y componentes automovilísticos, como ruedas para automóviles y camiones.

16.10 | Formado superplástico

En la sección 2.2.7 se describió el comportamiento superplástico de ciertos metales y aleaciones, donde se pueden obtener elongaciones por tensión de 2000% dentro de ciertos intervalos de temperatura. Ejemplos comunes de tales materiales son las aleaciones de zinc-aluminio y de titanio, que tienen granos muy finos, por lo común menos de 10 a 15 μm (ver tabla 1.1). A las aleaciones superplásticas se les pueden dar formas complejas mediante *formado superplástico*, un proceso que emplea técnicas comunes de trabajo de los metales, así como técnicas de procesamiento con polímeros (como termoformado, formado por vacío y moldeo por soplado, que se describirá en el capítulo 19). El comportamiento del material en el formado superplástico es similar al de la burbuja de una goma de mascar o de un vidrio caliente, que cuando son soplados se expanden muchas veces su diámetro original antes de estallar.

Las aleaciones superplásticas, en particular Zn-22Al y Ti-6Al-4V, también se pueden formar mediante procesos de deformación volumétrica, entre ellos el forjado en matriz cerrada (o dado cerrado), acuñado, punzonado de cavidades y extrusión. Los materiales para matrices más utilizados en el formado superplástico son los aceros de baja aleación, aceros fundidos para herramientas, cerámicas, grafito y blanco de París. La selección depende de la temperatura de formado y de la resistencia de la aleación superplástica.

La muy alta ductilidad y relativamente baja resistencia de las aleaciones superplásticas ofrecen las siguientes ventajas:

- Se pueden dar formas complejas a partir de una sola pieza, con detalles finos, tolerancias cerradas y eliminación de operaciones secundarias.
- Se pueden obtener ahorros de peso y material debido a la buena formabilidad de los materiales.
- Se desarrollan pocos, o ninguno, esfuerzos residuales en las partes formadas.
- Debido a la baja resistencia del material a las temperaturas de formado, los herramientas se pueden fabricar con materiales que tengan una resistencia menor que la de los materiales en otros procesos de trabajo de los metales, de ahí que los costos de herramental sean menores.

Por otro lado, el formado superplástico tiene las siguientes limitaciones:

- El material no debe ser superplástico a las temperaturas de servicio, ya que en caso contrario la parte sufrirá cambios de forma.
- Debido a la alta sensibilidad a la velocidad de deformación de los materiales superplásticos, deben formarse a velocidades de deformación muy bajas, comúnmente entre 10^{-4} y 10^{-2} /s. Los tiempos de formado varían desde unos cuantos segundos hasta varias horas, por lo que los tiempos de ciclo son mucho más largos que los de los procesos convencionales de formado. En consecuencia, el formado superplástico es un proceso de formado por lotes.

Unión por difusión/formado superplástico. Fabricar estructuras complejas con hojas metálicas combinando la *unión por difusión* y el *formado superplástico* (SPF/DB, por sus siglas en inglés) es un proceso importante, sobre todo en la industria aeroespacial. En la figura 16.44 se muestran estructuras características producidas por este método, en las cuales las hojas planas se unen por difusión y después se les da forma (ver sección 31.7). En este proceso, primero se unen por difusión puntos seleccionados de las hojas, mientras que el resto permanece sin unir, utilizando una capa de material (*aislante*) para evitar la unión. Luego la estructura se dilata dentro de un molde, por lo común usando gas neutro presurizado (argón), tomando así la forma del molde. Estas estructuras tienen relaciones elevadas de rigidez a peso, ya que son delgadas, y por diseño poseen módulos elevados de sección. Esta importante característica hace muy atractivo este proceso en las aplicaciones en aeronaves y en la industria aeroespacial.

El proceso SPF/DB mejora la productividad al eliminar los sujetadores mecánicos y produce partes con buena precisión dimensional y bajos esfuerzos residuales. La tecnología está muy avanzada en el caso de las estructuras de titanio para aplicaciones aeroespaciales. Además de las diversas aleaciones de aluminio que se están desarrollando mediante esta técnica, otros metales para formado superplástico incluyen diversas aleaciones de níquel.

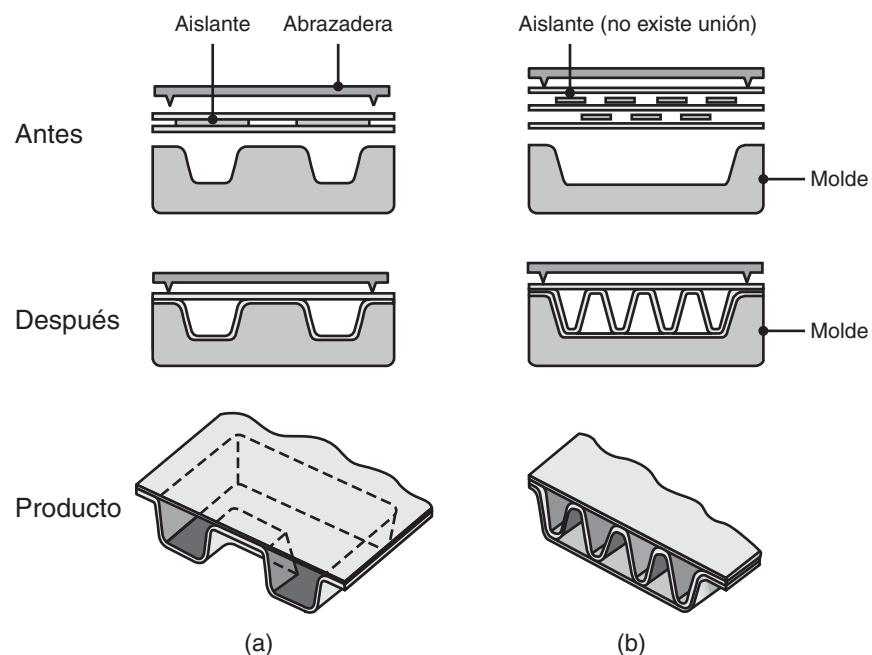


FIGURA 16.44 Tipos de estructuras fabricadas mediante unión por difusión y formado superplástico de hojas metálicas. Dichas estructuras tienen una relación elevada de rigidez a peso. *Fuente:* Cortesía de Rockwell International Corp.

EJEMPLO 16.5 Aplicaciones del formado superplástico/unión por difusión

La mayoría de las aplicaciones de SPF/DB comprenden partes de titanio para aeronaves militares, como el Tornado y el Mirage 2000. Los componentes fabricados incluyen mamparas del fuselaje, aleta delantera del borde de ataque del ala, ductos del intercambiador de calor y ductos de salida del enfriador. El fuselado de la tobera del avión de combate F-15 también se fabrica mediante este proceso. En aplicaciones civiles el Airbus A340 tiene los tableros de los sanitarios, drenajes y los paneles de mantenimiento (hecho de Ti-6Al-4V) manufacturado con este proceso.

En general, el proceso de formado superplástico se realiza a casi 900 °C (1650 °F) para las aleaciones de titanio y alrededor de 500 °C (930 °F) para las aleaciones de aluminio; las temperaturas para la unión por difusión son similares. Sin embargo, la presencia de una capa de óxido en las hojas de aluminio es un problema importante que degrada la resistencia de la unión en la unión por difusión. Para ilustrar los tiempos del ciclo, hojas de aleación de níquel 718 de 2 mm (0.080 pulgada) de espesor se deformaron superplásticamente en una aplicación, en matrices de cerámica a 950 °C (1740 °F), utilizando gas argón a una presión de 2 MPa (300 psi). El tiempo del ciclo fue de cuatro horas.

16.11 | Procesos especializados de formado

Aunque no se utilizan tan comúnmente como los procesos tratados hasta aquí, en esta sección se describen otros procesos de formado de hojas que se usan para aplicaciones especializadas.

Formado por explosión. Por lo general, los explosivos se utilizan para demoler edificios, construir carreteras y en muchos otros propósitos destructivos. Sin embargo, si se controla su cantidad y forma, se pueden emplear como fuente de energía para el formado de láminas metálicas. Usados por primera vez a principios de 1900, en el *formado por explosión*, la lámina se sujeta sobre una matriz y el ensamble completo se baja dentro de un tanque lleno con agua (fig. 16.45a). Después se evacua el aire dentro de la cavidad de la matriz, se coloca una carga explosiva a cierta altura y se detona la carga.

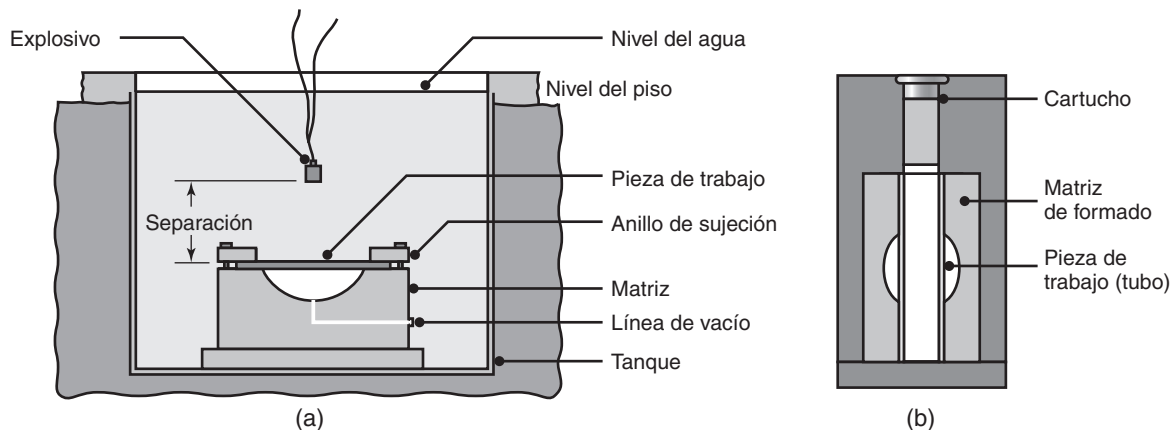


FIGURA 16.45 (a) Esquema del proceso de formado por explosión. (b) Ilustración del método confinado de abombado de tubos por explosión.

El explosivo genera una onda de choque con una presión suficiente para dar forma a las láminas metálicas. La *presión pico* (p) generada en el agua está dada por la expresión:

$$p = K \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^a \quad (16.15)$$

donde p se encuentra en psi, K es una constante que depende del tipo de explosivo, como 21,600 para el TNT (trinitrotolueno), W es el peso del explosivo en libras, R la distancia del explosivo a la superficie de la lámina metálica (llamada *separación*) en pies, y a una constante, por lo general considerada como 1.15.

Mediante el formado con explosivos se puede producir una variedad de formas, considerando que el material es dúctil a las altas velocidades de deformación características de este proceso (ver tabla 2.4). Éste es versátil y virtualmente no existen límites para el tamaño de la lámina o placa. Resulta particularmente adecuado para pequeños lotes de producción de partes grandes, como las utilizadas en aplicaciones aeroespaciales. Por medio de este método se ha dado forma a placas de acero de 25 mm (1 pulgada) de espesor y 3.6 m (12 pies) de diámetro, y se han abombado tubos con espesores de pared de hasta 25 mm (1 pulgada). El método de formado por explosión también se puede utilizar en mucho menor escala, como se muestra en la figura 16.45b. En este caso, se usa un *cartucho* (explosivo dentro de un contenedor) como fuente de energía. El proceso puede ser útil en el abombado y la dilatación de tubos de pared delgada para aplicaciones especiales.

Las propiedades mecánicas de las partes producidas mediante el formado por explosión son básicamente similares a las de otras fabricadas por métodos convencionales de formado. Dependiendo del número de partes a producir, las matrices pueden ser de aleaciones de aluminio, acero, hierro dúctil, aleaciones de zinc, concreto reforzado, madera, plásticos o materiales compósitos.

Formado por pulso magnético. En el *formado por pulso magnético*, o *formado electromagnético*, la energía almacenada en un banco de capacitores se descarga con rapidez a través de una bobina magnética. En un ejemplo característico, se coloca una bobina con forma de anillo sobre una pieza tubular. Después, el tubo se colapsa mediante fuerzas magnéticas sobre una pieza sólida, convirtiendo así el ensamble en una pieza integral (fig. 16.46).

La mecánica de este proceso se basa en el hecho de que un campo magnético producido por la bobina (fig. 16.46a) cruza el tubo metálico (que es un conductor eléctrico) y genera *corrientes de Eddy* en el tubo. A su vez, estas corrientes producen su campo

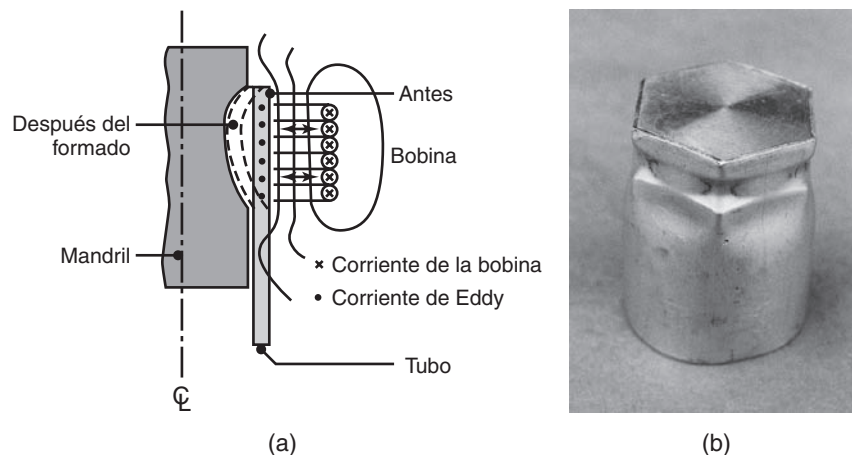


FIGURA 16.46 (a) Esquema del proceso de formado por pulso magnético utilizado para formar un tubo sobre un inserto. (b) Tubo de aluminio colapsado sobre un inserto hexagonal mediante el proceso de formado por pulso magnético.

magnético. Las fuerzas producidas por los dos campos magnéticos se oponen una a otra. La fuerza de repulsión generada entre la bobina y el tubo colapsa entonces el tubo sobre la pieza interior. Cuanto mayor sea la conductividad eléctrica de la pieza de trabajo, mayores serán las fuerzas magnéticas. No es necesario que el material de la pieza de trabajo tenga propiedades magnéticas.

El formado por pulso magnético se utiliza para colapsar tubos de pared delgada sobre barras, cables e insertos; en el sellado por plegado por compresión de recipientes para filtros de aceite de uso automovilístico; en operaciones de abombado y abocardado; y para recalcar accesorios en los extremos de los tubos de torque para el avión Boeing 777. También se pueden fabricar bobinas magnéticas planas para operaciones como repujado y embutido poco profundo de láminas metálicas.

Formado por martillado. El formado por martillado se utiliza para producir curvaturas en hojas metálicas delgadas mediante *granallado* (ver sección 34.2) sobre una superficie de la hoja. En consecuencia, dicha superficie se somete a esfuerzos de compresión que tienden a dilatar la capa superficial. Debido a que el material debajo de la superficie granallada se mantiene rígido, la dilatación de la superficie provoca que la lámina desarrolle una curvatura. El proceso también induce esfuerzos residuales de compresión en la superficie, lo que mejora la resistencia a la fatiga de la lámina.

El granallado se realiza con perdigón de hierro fundido o de acero lanzado desde una rueda giratoria o mediante una corriente de aire a través de una boquilla. El formado por martillado se utiliza en la industria aeronáutica para generar curvaturas lisas y complejas en las cubiertas de las alas de los aviones. Para formar tableros de alas de 25 m (80 pies) de largo se ha utilizado granalla de acero fundido de unos 2.5 mm (0.1 pulgada) de diámetro, viajando a una velocidad de 60 m/s (200 pies/s). Para secciones gruesas, puede utilizarse granalla hasta de 6 mm (1/4 pulgada) de diámetro. El proceso de formado por martillado también se emplea para enderezar partes torcidas o dobladas, incluyendo anillos no circulares para hacerlos redondos.

Formado por rayo láser. Este proceso comprende la aplicación de rayos láser como fuente de calor en regiones específicas de la lámina metálica. Los abruptos gradientes térmicos que se desarrollan a través del espesor de la hoja producen esfuerzos térmicos suficientemente elevados para ocasionar la deformación plástica localizada de la lámina. Mediante este método, por ejemplo, se puede doblar en forma permanente una lámina sin utilizar matrices. En el **formado asistido por rayo láser**, el láser actúa como fuente localizada de calor, reduciendo así la resistencia de la hoja metálica en puntos específicos, mejorando la formabilidad y aumentando la flexibilidad del proceso. Las aplicaciones incluyen enderezado, doblado, repujado y formado de componentes complejos, tubulares o planos.

Microformado. Éste es un desarrollo más reciente y describe una familia de procesos que se utilizan para producir partes y componentes metálicos muy pequeños. Los ejemplos de *productos miniaturizados* incluyen un reloj pulsera con una cámara digital integrada y un componente de almacenamiento para computadora de un gigabyte. Entre los componentes que suelen fabricarse mediante microformado están los pequeños ejes para micromotores, resortes, tornillos y una variedad de partes cabeceadas en frío, extruidas, dobladas, repujadas, acuñadas, punzonadas o procesadas por embutido profundo. Las dimensiones comunes son submilimétricas y su peso normal se mide en miligramos.

Formado electrohidráulico. También llamado de *chispa submarina* o *formado por descarga eléctrica*, la fuente de energía de este proceso de formado es una chispa entre electrodos que se encuentran conectados con un alambre corto y delgado. La rápida descarga de energía de un banco de capacitores a través del alambre genera una onda de choque similar a la creada por explosivos. Los niveles de energía son menores que en el formado por explosión, siendo comunes unos cuantos kJ. La presión desarrollada en el agua que sirve de medio es suficientemente alta para formar la parte. El formado electrohidráulico es un proceso por lotes y se puede utilizar para fabricar diversas partes pequeñas.

Mezclas de gases. En este proceso, la fuente de energía es una mezcla de gases dentro de un contenedor cerrado, que se enciende. La presión generada es suficientemente alta para formar partes con hojas o láminas metálicas. Aunque no se utiliza en la práctica, el principio de este proceso es similar al usado para generar presión en un motor de combustión interna.

Gases licuados. Los gases licuados (como el nitrógeno líquido) también se han utilizado para desarrollar presiones suficientemente elevadas para dar forma a láminas metálicas. Si se le permite alcanzar la temperatura ambiente dentro de un contenedor cerrado, el nitrógeno licuado se convierte en gaseoso y se expande, desarrollando la presión necesaria. Aunque no se emplea en la práctica, el proceso es capaz de formar partes relativamente poco profundas.

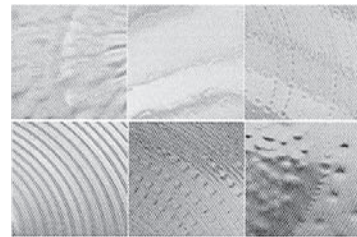
ESTUDIO DE CASO 16.1 | Manufactura de platillos musicales

Los platillos (fig. 16.47a) son un instrumento fundamental de percusión para todo tipo de música. Los modernos juegos de platillos y tambores cubren una amplia variedad de sonidos, desde los bajos, oscuros y cálidos, hasta los brillantes, agudos y cortantes. Algunos platillos suenan melódicos, mientras que otros generan un sonido de mala calidad. Existe una amplia variedad de tamaños, formas, pesos, martillados y acabados superficiales (fig. 16.47b) para obtener el desempeño deseado.

Los platillos se producen a partir de metales, como el bronce B20 (80% de Cu-20% de Sn, con un poco de plata), bronce B8 (92% de Cu-8% de Sn), aleación níquel-plata y latón, utilizando diversos métodos de procesamiento. En la figura 16.48 se muestra la secuencia de manufactura para producir platillos de bronce B20. Primero se funde el metal en lingotes con forma de hongo y después se enfría a temperatura ambiente. Luego se lamina sucesivamente (hasta 14 veces) con enfriamiento por agua con cada pase por el molino de laminación. Se tiene cuidado especial para laminar el bronce a diferentes ángulos en cada pase a fin de minimizar la anisotropía, proporcionar la orientación preferencial del grano y desarrollar una forma redonda, equilibrada. Posteriormente, las piezas en bruto laminadas se recalientan y se forman por estiramiento (se presionan) para darles la forma de copa o campana que determina el sonido armónico del platillo. Después, los platillos se perforan en el centro, o se punzonan, para crear orificios de soporte y se recortan en una cizalla rotatoria a los diámetros finales aproximados. Esta operación va seguida de otro paso de formado por estiramiento para obtener la forma característica de “plato turco” que controla el tono.



(a)



(b)

FIGURA 16.47 (a) Selección de platillos comunes. (b) Vista detallada de diferentes texturas superficiales y acabados de platillos. Fuente: Cortesía de W. Blanchard, Sabian Ltd.

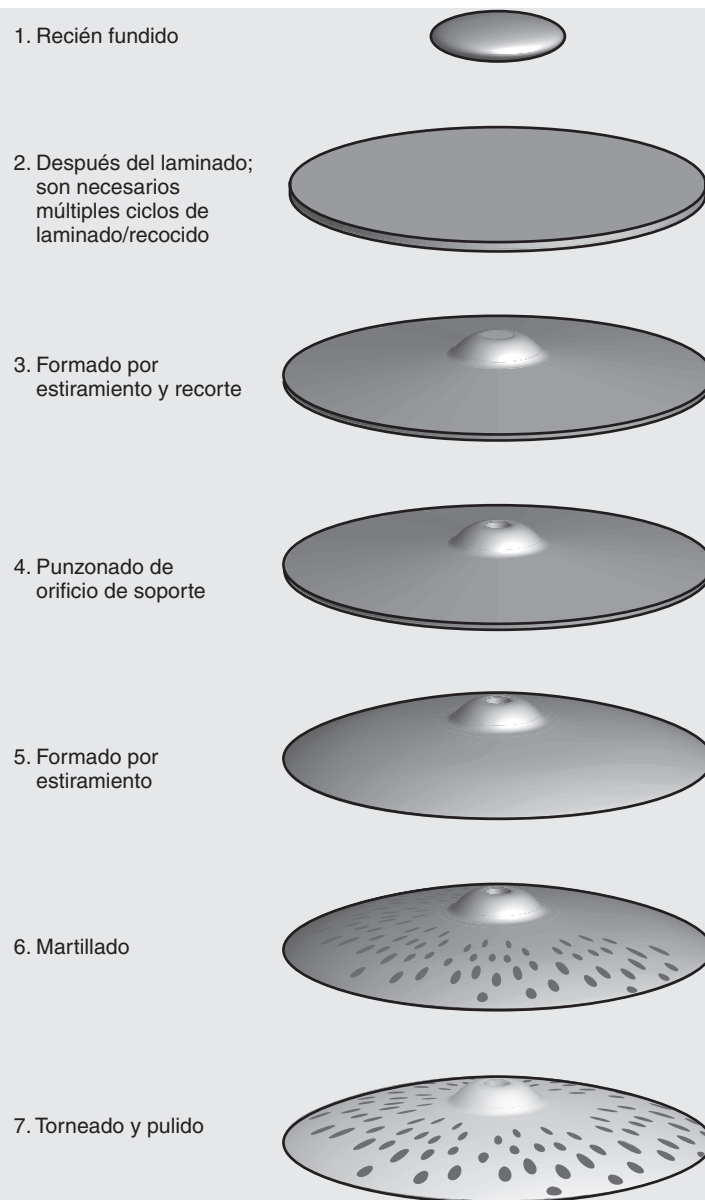
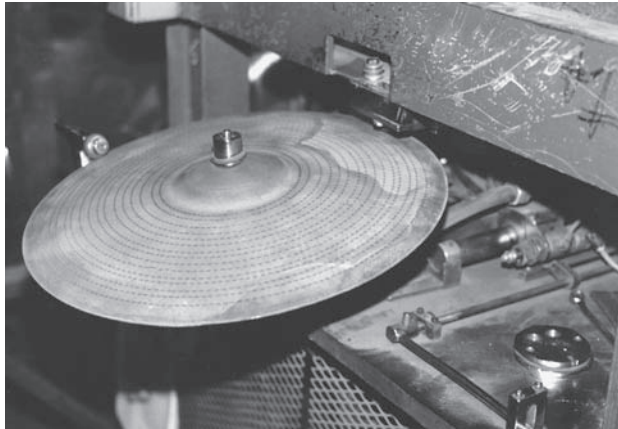


FIGURA 16.48 Secuencia de manufactura para la producción de platillos. *Fuente:* Cortesía de W. Blanchard, Sabian Ltd.

Los platillos también se martillan para proporcionar un carácter distintivo a cada instrumento. El martillado se puede hacer a mano (ver fig. 16.49b) o en máquinas automáticas de formado por martillado (fig. 16.49a). El martillado a mano implica colocar la pieza en bruto de bronce sobre un yunque de acero, donde los platillos se golpean manualmente con martillos. El formado por martillado automático se efectúa en maquinaria sin plantillas, pues a los platillos ya se les ha dado forma, pero el patrón es controlable y uniforme. El tamaño y patrón de las operaciones de martillado depende de la respuesta deseada, como el tono, sonido, respuesta y timbre del platillo.

Se realizan varias operaciones de acabado sobre los platillos. Esto simplemente puede comprender la limpieza e impresión de la información para identificación, ya que algunos músicos prefieren la apariencia natural de la superficie y el sonido del bronce formado, laminado en caliente. Es más común que los platillos se giren en un



(a)



(b)

FIGURA 16.49 Martillado de platillos. (a) Martillado automatizado en una máquina de granallado; (b) martillado manual de platillos. *Fuente:* Cortesía de W. Blanchard, Sabian Ltd.

torno (sin fluido para maquinado) para retirar la superficie de óxido y reducir el espesor del platillo, con el propósito de crear el peso y sonido deseados. Por último, el acabado superficial se vuelve lustroso y, en algunos casos, desarrolla una microestructura superficial favorable. Algunos platillos se pulen para obtener un “acabado” lustroso “brillante”. En muchos casos, las depresiones superficiales provocadas por el martillado persisten después del acabado, lo que también constituye una característica estética apreciada por los músicos. En la figura 16.47b se muestran diversos acabados superficiales asociados con los platillos modernos.

Fuente: Cortesía de W. Blanchard, Sabian Ltd.

16.12 Manufactura de estructuras metálicas tipo panel

Una *estructura tipo panel* consta básicamente de un núcleo de panel u otras formas corrugadas, unido a dos delgadas capas exteriores (fig. 16.50). El ejemplo más común de dicha estructura es un cartón corrugado, que tiene una alta relación rigidez a peso y se utiliza como empaque para embarque de bienes de consumo e industriales. Debido a su bajo peso y alta resistencia a las fuerzas de doblado, las estructuras metálicas tipo panel se utilizan en componentes aeronáuticos y aeroespaciales, edificios y equipo de transporte. En esta sección se describen los métodos de manufactura de metales tipo panel, ya que comprenden operaciones que se clasifican mejor como procesos de formado de hojas metálicas. Sin embargo, debe hacerse notar que las estructuras tipo panel también pueden fabricarse con materiales no metálicos, como el cartón, los polímeros y una variedad de materiales compósitos.

Lo más común es que las estructuras tipo panel se produzcan con aluminio de la serie 3000. Sin embargo, también se fabrican con titanio, aceros inoxidables y aleaciones

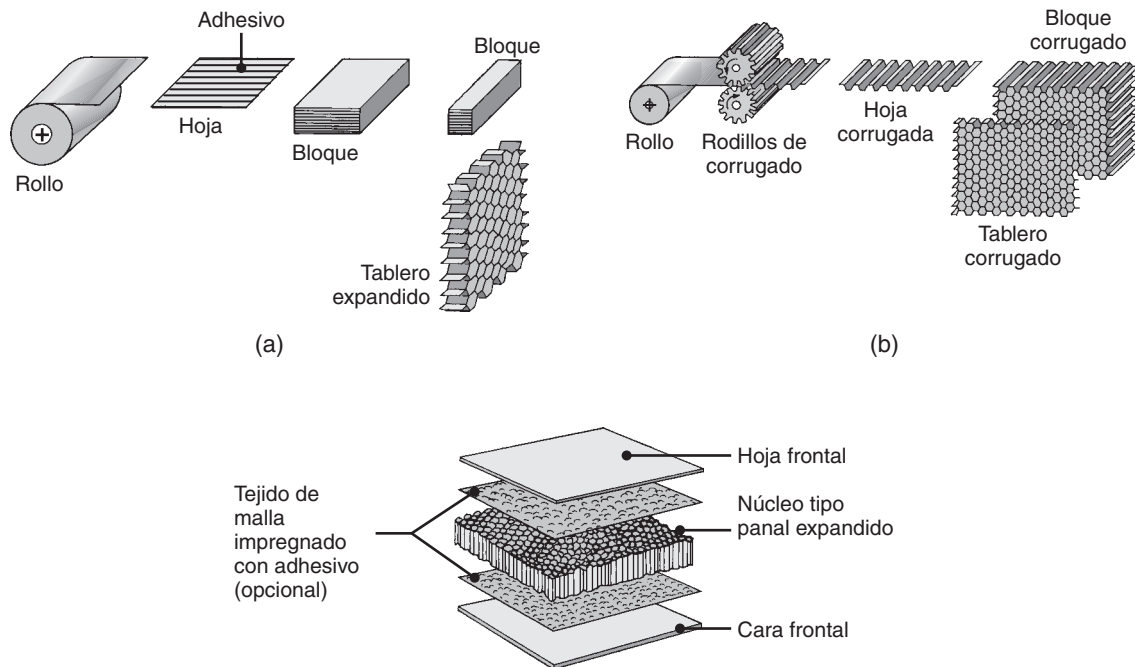


FIGURA 16.50 Métodos de manufactura de estructuras tipo panel: (a) proceso de expansión; (b) proceso de corrugado; (c) ensamble de una estructura tipo panel en un laminado.

de níquel para aplicaciones especiales y resistencia a la corrosión. Los desarrollos más recientes incluyen la fabricación de estructuras tipo panel mediante plásticos reforzados, como aramidas-epóxicos.

Existen dos métodos básicos para manufacturar materiales tipo panel. En el **proceso de expansión**, que es el más común (fig. 16.50a), primero se cortan las hojas de un rollo y se aplica un *adhesivo* (ver sección 32.4) a intervalos (líneas nodales) sobre su superficie. Después las hojas se apilan y se curan en un horno, desarrollando uniones fuertes en las juntas adhesivas. Por último el bloque se corta en secciones con las dimensiones deseadas y se estira para producir una estructura tipo panel.

El **proceso de corrugado** (fig. 16.50b) es similar al proceso utilizado para fabricar cartón corrugado. La lámina metálica primero pasa a través de un par de rodillos especialmente diseñados, convirtiéndose en una hoja corrugada; después se corta a las longitudes deseadas. Se aplica adhesivo a las líneas nodales y las hojas corrugadas se ensamblan en un bloque que después se cura. Debido a que las hojas ya tienen forma, no existe un proceso de expansión. Finalmente, el material tipo panel se coloca en una estructura emparedada (tipo *sándwich*) (fig. 16.50c) mediante caras de lámina que se unen con adhesivos (o con *soldadura fuerte*, ver sección 32.2) en las superficies superior e inferior.

16.13 Consideraciones de diseño en el formado de hojas metálicas

Al igual que sucede con la mayoría de los procesos descritos a lo largo de este libro, a través del tiempo han evolucionado algunas guías y prácticas de diseño. La mejor forma de obtener alta calidad y ahorros en costo es por medio de un diseño cuidadoso donde se utilicen las mejores prácticas establecidas de diseño, herramientas computacionales y técnicas de manufactura. Las siguientes guías son aplicables a las operaciones de formado de hojas metálicas, en donde se identifican los aspectos más significativos del diseño.

Diseño de la pieza en bruto. El material de desecho es la preocupación fundamental en las operaciones de troquelado (ver también la tabla 40.6). Las partes diseñadas de manera deficiente no se *anidan* apropiadamente y puede existir un desecho considerable entre operaciones sucesivas de troquelado (fig. 16.51). La aplicación del diseño ejerce algunas restricciones sobre la forma de las piezas en bruto, pero siempre que sea posible, dichas piezas deben diseñarse para reducir el desecho al mínimo.

Doblado. En las operaciones de doblado, las principales preocupaciones son la fractura del material, el arrugado o plegado y la incapacidad para formar el doblez. Como se

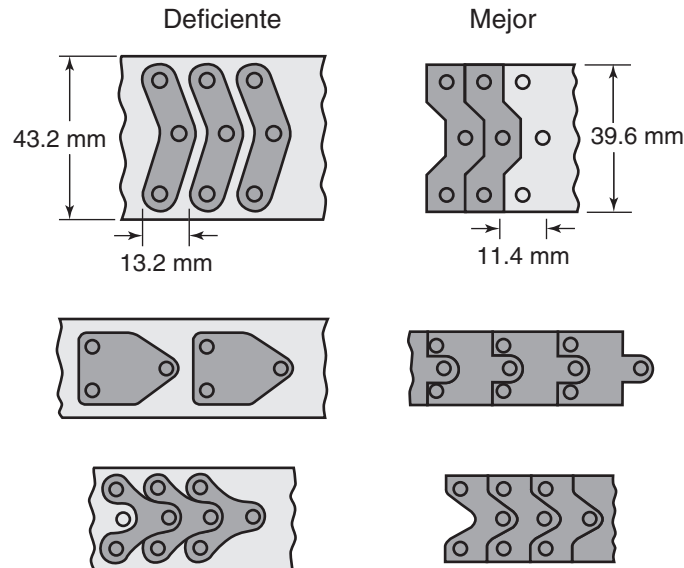


FIGURA 16.51 Anidado eficiente de partes para una utilización óptima del material en el troquelado. *Fuente:* Cortesía de Society of Manufacturing Engineers.

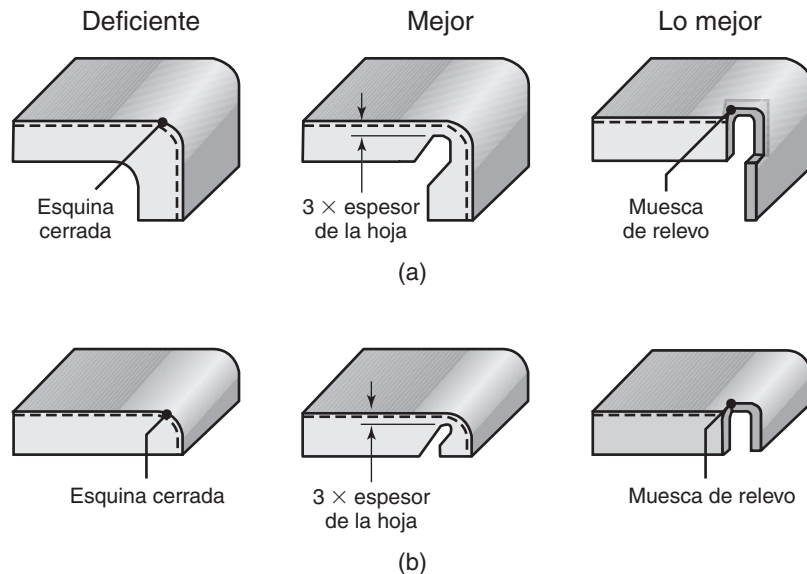


FIGURA 16.52 Control de desgarrado y pandeo de un reborde en un doblado en ángulo recto. *Fuente:* Cortesía de Society of Manufacturing Engineers.

muestra en la figura 16.52, una parte fabricada con una hoja metálica con un reborde que se va a doblar forzará al reborde a sufrir compresión, lo que puede ocasionar pandeo (ver también *rebordeado*, sección 16.6). Este problema se puede controlar con una muesca de alivio cortada para limitar los esfuerzos del doblado, o se puede hacer alguna otra modificación del diseño, como se muestra en la figura, para evitar el desgarre (fig. 16.53).

Como el radio de doblado es un área con esfuerzos elevados, deben eliminarse todas las concentraciones de esfuerzos del punto del radio de doblado. Un ejemplo son las partes con orificios cerca de los dobleces. Es conveniente alejar el orificio del área del doblez, pero cuando esto no es posible, se puede utilizar una ranura de media luna o una oreja (fig. 16.54a). De manera similar, al doblar rebordes deben evitarse las pestañas y muescas, ya que estas concentraciones de esfuerzos reducen mucho la formabilidad. Si son necesarias las pestañas, deben utilizarse radios grandes para reducir la concentración de esfuerzos (fig. 16.54b).

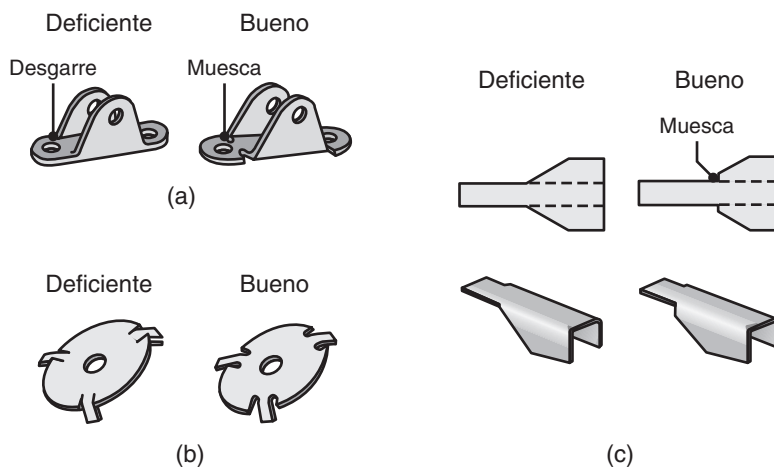


FIGURA 16.53 Aplicación de muescas para evitar el desgarre y el arrugado en las operaciones de doblado en ángulo recto. *Fuente:* Cortesía de Society of Manufacturing Engineers.

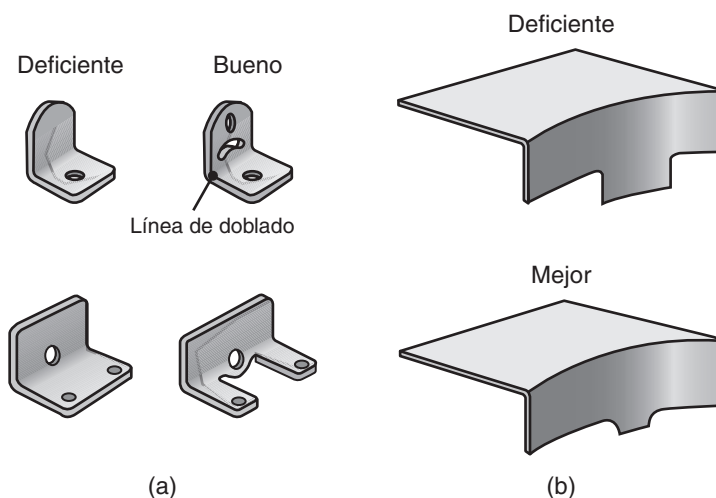


FIGURA 16.54 Concentraciones de esfuerzos cerca de dobleces. (a) Uso de una media luna o una oreja cerca de un doblez. (b) Reducción de la severidad de una ceja en un reborde. *Fuente:* Cortesía de Society of Manufacturing Engineers.

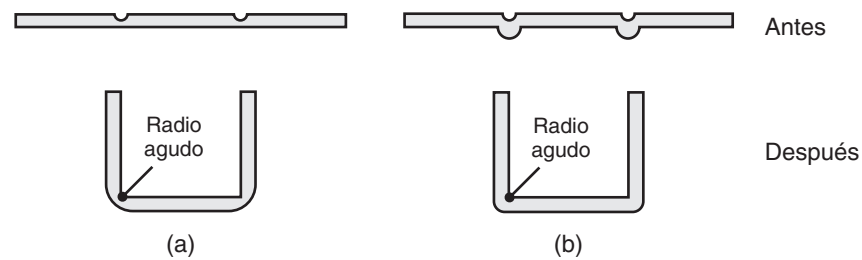


FIGURA 16.55 Aplicación de (a) ranurado, o (b) repujado para obtener un radio agudo interno en el doblado. A menos que se diseñen apropiadamente, estas características pueden provocar fractura. *Fuente:* Cortesía de Society of Manufacturing Engineers.

Cuando se van a utilizar doblado y producción de muescas, es importante orientar las muescas en forma apropiada con respecto a la dirección de los granos. Como se muestra en la figura 16.17, idealmente los dobleces deben ser perpendiculares a la dirección de laminación (u oblicuos, si eso no fuera posible) para evitar el agrietamiento. Se pueden obtener radios agudos de doblado mediante estriado o repujado (fig. 16.55), pero debe reconocerse que esto puede provocar fracturas. En la holgura de un doblez no deben existir rebabas, ya que son frágiles (debido al endurecimiento por deformación) y se puede fracturar, llevando a una concentración de esfuerzos que propagaría la grieta dentro del resto de la lámina.

Operaciones de estampado y de matrices progresivas. En las matrices progresivas (ver sección 16.2.3), el costo del herramental y el número de estaciones se determina mediante el número de rasgos característicos y su espaciado en una parte. Por lo tanto, es conveniente reducir al mínimo el número de rasgos para minimizar los costos de herramental. Los rasgos con poco espaciado pueden proporcionar una holgura insuficiente para los punzones y pueden requerirse dos punzones. También es problemático formar cortes estrechos y protuberancias con un simple punzón y una matriz.

Embutido profundo. Después de una operación de embutido profundo, invariablemente una copa tratará de recuperar su forma original. Por esta razón, puede ser difícil formar diseños que utilicen una pared vertical en una copa de embutido profundo. Resulta más fácil producir ángulos de alivio de al menos 3° en cada pared. Es difícil producir copas con radios internos agudos, y con frecuencia las copas profundas requieren operaciones adicionales de planchado.

16.14 | Prensas de formado de hojas metálicas

Para la mayoría de las operaciones de prensado, el equipo básico consiste en prensas mecánicas, hidráulicas, neumáticas y neumáticas-hidráulicas con una amplia variedad de diseños, características, capacidades y controles computarizados. En la figura 16.56 se muestran diseños comunes para los marcos o bastidores de las prensas (ver también figs. 14.17 y 16.23f). El diseño apropiado, así como la rigidez y construcción de dichos equipos, son fundamentales para una operación eficiente del sistema y para lograr una elevada capacidad de producción, un buen control dimensional y una alta calidad del producto.

La estructura tradicional del **marco en C** (fig. 16.56a) se ha utilizado ampliamente para facilitar el acceso de la herramienta y de la pieza de trabajo, pero no es tan rígida como el **tipo de caja de columnas o soportes** (fig. 16.56e), o la estructura de **marco de doble columna** (fig. 16.56f). Además, el acceso se ha vuelto menos importante debido a los avances en la automatización y en el uso de robots industriales y controles computarizados.

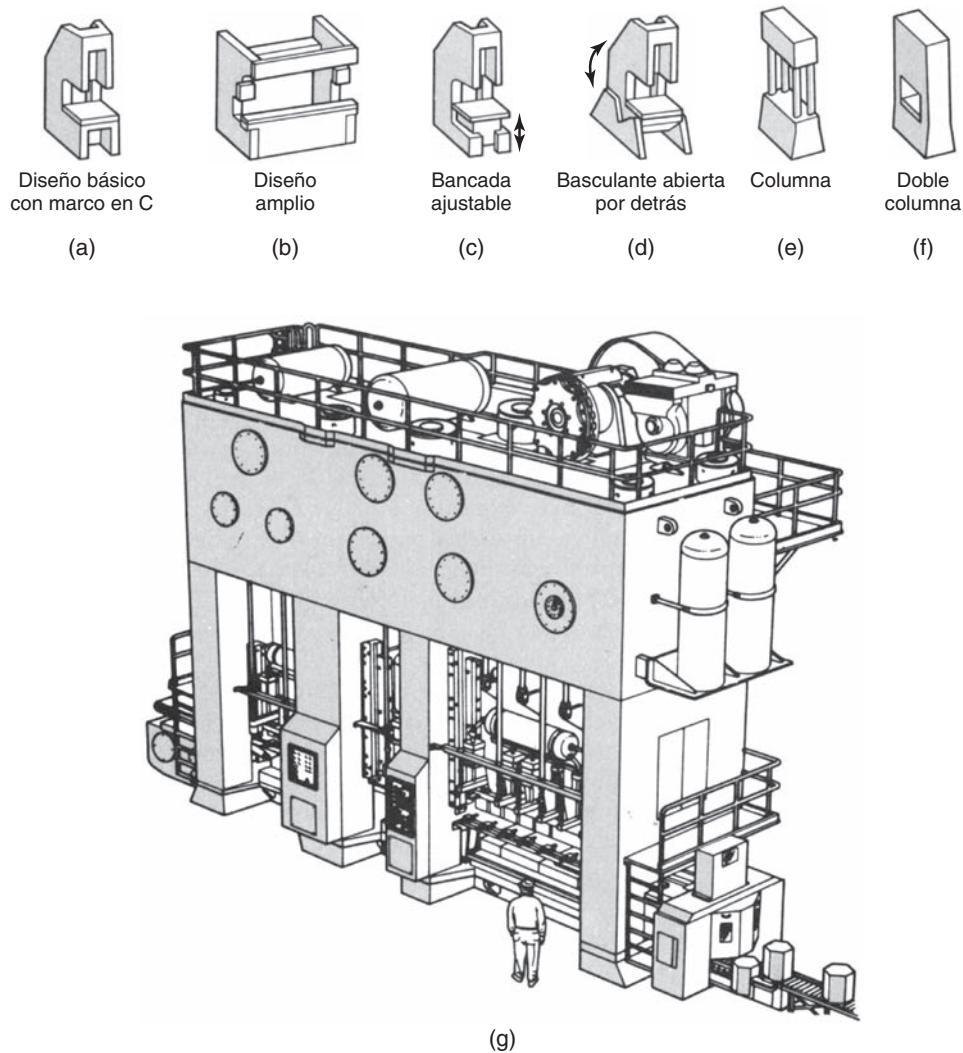


FIGURA 16.56 (a) a (f) Esquemas de tipos de bastidores de prensas para las operaciones de formado de láminas. Cada tipo tiene sus propias características de rigidez, capacidad y acceso. (g) Prensa grande de estampado. Fuente: (a) a (f) *Engineer's Handbook*, VEB Fachbuchverlag, 1965. (g) Verson Allsteel Company.

La *selección de la prensa* para las operaciones de formado de hojas metálicas depende de varios factores:

1. El tipo de operación de formado, el tamaño y la forma de las matrices y el herramienta requerido.
2. El tamaño y la forma de las piezas de trabajo.
3. La longitud de la carrera de la corredera (correderas), el número de recorridos por minuto, la velocidad de operación y la *altura de cierre* (la distancia desde la parte superior de la bancada al fondo de la corredera con la carrera hacia abajo).
4. Número de correderas. Las prensas de simple acción tienen una corredera alternativa. Las prensas de doble acción tienen dos correderas, alternativas en la misma dirección. Se utilizan comúnmente para embutido profundo, una corredera para el punzón y la otra para la placa de sujeción. Las prensas de triple acción tienen tres correderas; se utilizan en general para invertir el reembutido o embutido en reversa y para otras operaciones complicadas de formado.

5. La fuerza máxima requerida (capacidad de la prensa y capacidad de tonelaje).
6. Tipo de controles mecánicos, hidráulicos y de computadora.
7. Características para el cambio de matrices. Debido a que el tiempo requerido para cambiar matrices en las prensas puede ser significativo (hasta de varias horas), lo que afecta la productividad, se han desarrollado sistemas de cambio rápido de matrices. Cuando se sigue un sistema denominado *intercambio de matriz de un solo minuto* (SMED, por sus siglas en inglés), las configuraciones de las matrices se pueden cambiar en menos de 10 minutos mediante sistemas hidráulicos o neumáticos controlados por computadora.
8. Características de seguridad.

Ya que una prensa es una inversión importante de capital, debe investigarse su uso presente y futuro para una amplia variedad de partes y aplicaciones. La versatilidad y el uso múltiple son factores importantes en la selección de una prensa, en particular para modificaciones al producto y para fabricar nuevos productos, a fin de responder a los mercados globales siempre cambiantes.

16.15 Economía de las operaciones de formado de hojas metálicas

El formado de hojas metálicas implica consideraciones económicas similares a las de los otros procesos descritos. Las operaciones de formado de láminas son muy versátiles y se pueden utilizar varios procesos diferentes para producir la misma parte. Los costos correspondientes (ver también capítulo 40) dependen de las operaciones en particular (como los costos de las matrices y el equipo, así como de la mano de obra). Para partes pequeñas y sencillas de hoja metálica, los costos y los tiempos de entrega de las matrices son más bien bajos. En cambio, para operaciones en gran escala (como el formado por estiramiento de tableros para aeronaves y cascos para embarcaciones) estos costos son muy altos. Además, debido a que el número requerido de dichas partes es más bien bajo, el costo por pieza puede ser muy elevado (ver fig. 14.18).

En otras operaciones de formado de láminas se realizan consideraciones similares. El embutido profundo requiere matrices y herramientas costosas, pero se producen grandes cantidades de partes con la misma configuración, como contenedores, latas y productos similares. Estos costos para otros procesos como el punzonado, troquelado, doblado y rechazado varían considerablemente, dependiendo del tamaño y espesor de la parte.

Los costos del equipo varían ampliamente y dependen en gran medida de la complejidad de la operación de formado, las características de carga y descarga de la parte, el tamaño y la forma de la pieza y el nivel de automatización y control computarizado requerido. La automatización, a su vez, afecta de modo directo la cantidad de mano de obra necesaria y el nivel de habilidad. A mayor automatización, menor nivel de habilidad requerido. Además, por lo general, muchas partes producidas con láminas metálicas exigen algunas operaciones de acabado; una de las más comunes es el rebabeo de las orillas de la pieza, que por lo general es intensiva en mano de obra, aunque se han logrado algunos avances en el rebabeo automático (que en lo particular requiere equipo controlado por computadora, por lo que puede ser costoso).

Como un ejemplo de la versatilidad de las operaciones de formado con hojas metálicas y de los costos involucrados, nótese que una parte con forma de copa se puede formar mediante embutido profundo, rechazado, formado con hule o con explosivos. También se puede formar mediante extrusión por impacto, fundición, o fabricándola a partir de diferentes piezas. La parte mostrada en la figura 16.57 puede producirse por medio de embutido profundo o rechazado convencional, pero los costos de las matrices para ambos procesos son significativamente diferentes.

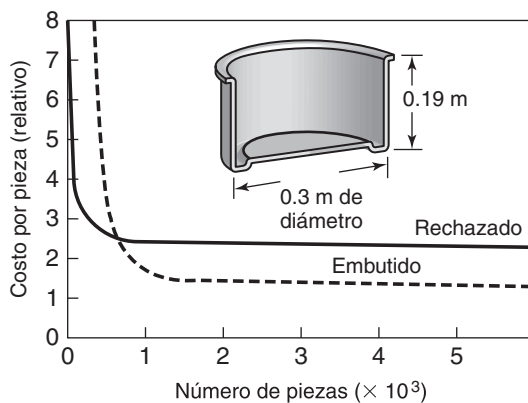


FIGURA 16.57 Comparación de costos para manufacturar un contenedor redondo de lámina metálica, ya sea por rechazado convencional o mediante embutido profundo. Obsérvese que para cantidades pequeñas el rechazado es más económico.

Las matrices para embutido profundo pueden tener muchos componentes y cuestan mucho más que los simples mandriles y herramientas empleadas en el rechazado. En consecuencia, el costo por parte de la matriz en el embutido puede ser elevado si sólo se necesitan algunas piezas. En cambio, esta parte se puede formar mediante embutido profundo en un tiempo mucho menor que mediante rechazado, incluso si esta última operación se encuentra automatizada y controlada por computadora. Además, por lo general, el rechazado requiere mano de obra más calificada. Considerando estos factores, es evidente que el punto de equilibrio se encuentra alrededor de las 700 partes, y el embutido profundo es más económico para cantidades mayores a ésta. En el capítulo 40 se dan mayores detalles sobre la economía de la manufactura.

RESUMEN

- Los procesos de formado de hojas metálicas (láminas) se encuentran entre las operaciones más versátiles. Por lo general, se utilizan en piezas de trabajo que tienen relaciones elevadas de superficie de área a espesor. A diferencia de los procesos de deformación volumétrica, como el forjado y la extrusión, a menudo se evita reducir el espesor del material en el formado de hojas (para evitar la estrangulación y el desgarramiento).
- Los parámetros importantes de los materiales son la calidad de la orilla cizallada de la hoja metálica antes del formado, la capacidad de la hoja para estirarse de manera uniforme, la resistencia del material al adelgazamiento, su anisotropía normal y planar, su tamaño de grano y su punto de elongación de fluencia (para los aceros al bajo carbono).
- Las fuerzas y la energía requeridas en los procesos de formado de hojas metálicas se transmiten a la pieza de trabajo mediante herramientas y matrices sólidas, miembros flexibles de hule o poliuretano, o por medios eléctricos, químicos, magnéticos y gaseosos.
- Debido a que se utilizan materiales relativamente delgados, la restitución elástica, el pandeo y el plegado constituyen problemas significativos en el formado de hojas. La recuperación elástica es una función del esfuerzo de fluencia, el módulo elástico y la relación del radio de doblado con respecto al espesor. Estos problemas se pueden reducir o eliminar mediante un diseño apropiado de las herramientas y las matrices, minimizando la longitud sin soporte de la hoja durante el procesamiento, y controlando el espesor de la hoja alimentada y sus propiedades mecánicas.
- Entre los desarrollos importantes se encuentra el formado superplástico de hojas unidas por difusión. El proceso es capaz de producir estructuras complejas de hojas metálicas, sobre todo para aplicaciones aeroespaciales (que exigen relaciones rigidez a peso particularmente elevadas).
- Se han desarrollado varios métodos de prueba para predecir la formabilidad de las hojas metálicas. En las operaciones de doblado, la reducción del área de la hoja en

tensión, da una clara indicación de su capacidad de doblado (radio mínimo de doblado); esto también se aplica al parámetro de capacidad de rechazado de los metales (máxima reducción de espesor por pase).

- Los diagramas de límites de formado son muy útiles para operaciones de estampado general, ya que establecen relaciones cuantitativas entre las deformaciones mayor y menor que limitan el formado con seguridad. Para operaciones de embutido profundo, el parámetro importante es la anisotropía normal o plástica de la hoja (la relación de la deformación del ancho a la deformación de espesor en una prueba de tensión).

TÉRMINOS CLAVE

Abombado	Formado por estiramiento	Punzonado
Acanalado	Formado por explosión	Radio mínimo de doblado
Anidado	Formado por martillado	Ranurado
Anisotropía normal	Formado por pulso magnético	Rasurado
Anisotropía planar	Formado por rayo láser	Rebaba
Anisotropía plástica	Formado por rodillos	Rebabeo
Arrugado	Formado superplástico	Rebordeado
Bandas de Lüder	Holgura	Rechazado
Borde ondulado	Matrices compuestas	Recuperación elástica o restitución (rebote)
Capacidad de doblado	Matrices de transferencia	Reembutido
Cizallado	Matrices progresivas	Regla de acero (suaje)
Diagrama de límites de formado	Microformado	Relación límite de embutido
Doblado	Niblado	Repujado
Embutido	Perla de embutido	Resistencia al mellado
Embutido profundo	Piezas en bruto	Superficie bruñida
Estructuras tipo panal	Placa de soporte	Tolerancia de doblado
Formabilidad (capacidad de formado)	Planchado	Troquelado
Formado con hule	Plegado	Troquelado fino
Formado de orificios rebordeados	Prensa plegadora	
Formado electrohidráulico	Proceso de hidroformado	

BIBLIOGRAFÍA

- ASM Handbook, Vol. 14: *Forming and Forging*, ASM International, 1988.
- Benson, S., *Press Brake Technology*, Society of Manufacturing Engineers, 1997.
- Bitzer, T., *Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing*, Chapman & Hall, 1997.
- Blazynski, T. Z., *Plasticity and Modern Metal-forming Technology*, Elsevier, 1989.
- Boljanovic, V., *Sheet Metal Forming Process and Die Design*, Industrial Press, 2004.
- Fundamentals of Tool Design*, 4a. ed., Society of Manufacturing Engineers, 1998.
- Gillanders, J., *Pipe and Tube Bending Manual*, FMA International, 1994.
- Hosford, W. F. y Caddell, R. M., *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*, 2a. ed., Prentice Hall, 1993.
- Iliescu, C., *Cold-Pressing Technology*, Elsevier, 1990.
- Morgan, E., *Tinplate and Modern Canmaking Technology*, Pergamon, 1985.
- Pearce, R., *Sheet Metal Forming*, Chapman & Hall, 1997.
- Progressive Dies*, Society of Manufacturing Engineers, 1994.
- Smith, D., *Die Design Handbook*, 3a. ed., Society of Manufacturing Engineers, 1990.
- _____, *Fundamentals of Pressworking*, Society of Manufacturing Engineers, 1994.
- Suchy, I., *Handbook of Die Design*, McGraw-Hill, 1997.
- Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, 4a. ed., Vol. 2: *Forming*, Society of Manufacturing Engineers, 1984.