

Fundamentos de manufactura moderna

Tercera edición

**Mc
Graw
Hill**

Mikell P. Groover

Director Higher Education: Miguel Ángel Toledo Castellanos
Director editorial: Ricardo A. del Bosque Alayón
Editor sponsor: Pablo E. Roig Vázquez
Editora de desarrollo: Lorena Campa Rojas
Supervisor de producción: Zeferino García García

Traducción: Carlos Roberto Cordero Pedraza
Javier Enríquez Brito
Jesús Elmer Murrieta Murrieta

Diseño de portada: Círculodiseño

FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA

Tercera edición

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



**McGraw-Hill
Interamericana**

DERECHOS RESERVADOS © 2007 respecto a la tercera edición en español por
McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

A Subsidiary of The McGraw-Hill Companies, Inc.

Edificio Punta Santa Fe
Prolongación Paseo de la Reforma 1015, Torre A
Piso 17, Colonia Desarrollo Santa Fe,
Delegación Álvaro Obregón
C.P. 01376, México, D. F.
Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana, Reg. Núm. 736

ISBN-13: 978-970-10-6240-1

ISBN-10: 970-10-6240-X

Traducido de la tercera edición en inglés de la obra *FUNDAMENTALS OF MODERN MANUFACTURING. Materials, Processes and Systems*. Copyright © 2007 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

ISBN-10: 0-471-74485-9

ISBN-13: 978-0-471-74485-6

1234567890

0986543217

Impreso en México

Printed in Mexico

Parte V

Formado de metal y trabajo de láminas metálicas

18

FUNDAMENTOS DEL FORMADO DE METALES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

- 18.1 Panorama del formado de metales
- 18.2 Comportamiento del material en el formado de metales
- 18.3 Efecto de la temperatura en el formado de metales
- 18.4 Efecto sobre la velocidad de deformación
- 18.5 Fricción y lubricación en el formado de metales

El **formado de metales** incluye varios procesos de manufactura en los cuales se usa la deformación plástica para cambiar la forma de las piezas metálicas. La deformación es el resultado del uso de una herramienta que generalmente es un **troquel** para formar metales, el cual aplica esfuerzos que exceden la resistencia a la fluencia del metal. Por tanto, el metal se deforma para tomar la forma que determina la forma del troquel. El formado de metales domina el tipo de operaciones de formado que se identifican en el capítulo 1 como **procesos de deformación** (figura 1.4).

En general, se aplica el esfuerzo de compresión para deformar plásticamente el metal. Sin embargo, algunos procesos de formado estiran el metal, mientras que otros lo doblan y otros más lo cortan. Para formar exitosamente un metal, éste debe poseer ciertas propiedades. Las propiedades convenientes para el formado son por lo general una baja resistencia a la fluencia y alta ductilidad. Estas propiedades las afecta la temperatura. La ductilidad se incrementa y la resistencia a la fluencia se reduce cuando aumenta la temperatura de trabajo. El efecto de la temperatura da lugar a la distinción entre trabajo en frío, trabajo en caliente por debajo de la temperatura de recrystalización y trabajo en caliente. La velocidad de formación y la fricción son factores adicionales que afectan el desempeño del formado de metales. En este capítulo se examinarán dichos aspectos, pero primero se da una visión general de los procesos de formado de metales.

18.1 PANORAMA DEL FORMADO DE METALES

Los procesos del formado se pueden clasificar en: 1) procesos de deformación volumétrica y 2) procesos de trabajo de láminas metálicas. Estas dos categorías se cubren en detalle en los capítulos 19 y 20, respectivamente. Cada categoría incluye diferentes tipos de operaciones de formado, como se indica en la figura 18.1.

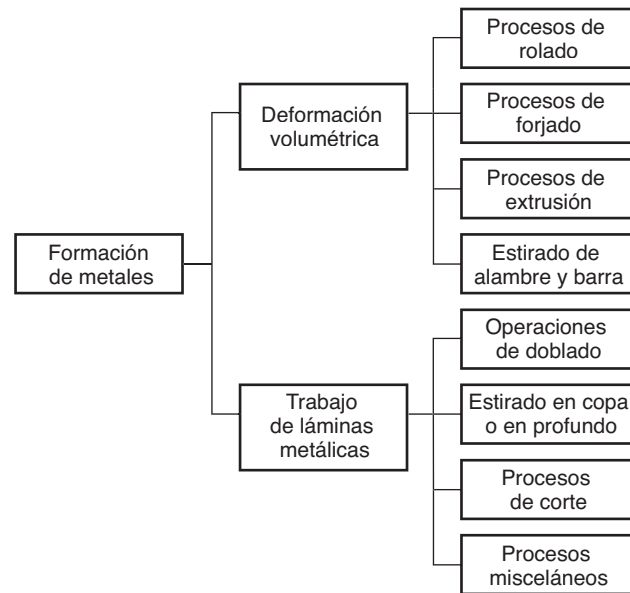
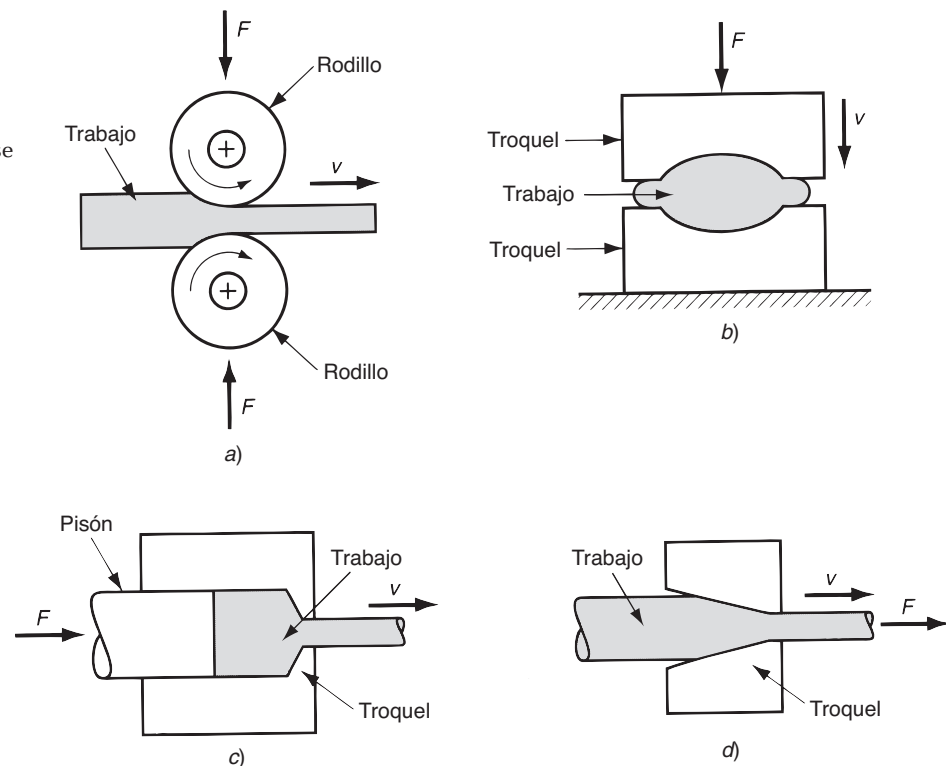


FIGURA 18.1 Clasificación de las operaciones de formado de metales.

Procesos de deformación volumétrica Los procesos de deformación volumétrica se caracterizan por deformaciones significativas y grandes cambios de forma, y la relación entre el área superficial y el volumen de trabajo es relativamente pequeña. El término **volumétrico** describe a las piezas de trabajo que tienen esta baja relación de área-volumen. La forma del trabajo inicial para estos procesos incluye tochos cilíndricos y barras rectangulares. La operación básica en deformación volumétrica se ilustra en la figura 18.2 como sigue:

FIGURA 18.2 Procesos básicos de deformación volumétrica: a) rodado, b) forjado, c) extrusión y d) estirado. El movimiento relativo en las operaciones se indica por v , y las fuerzas se indican por F .

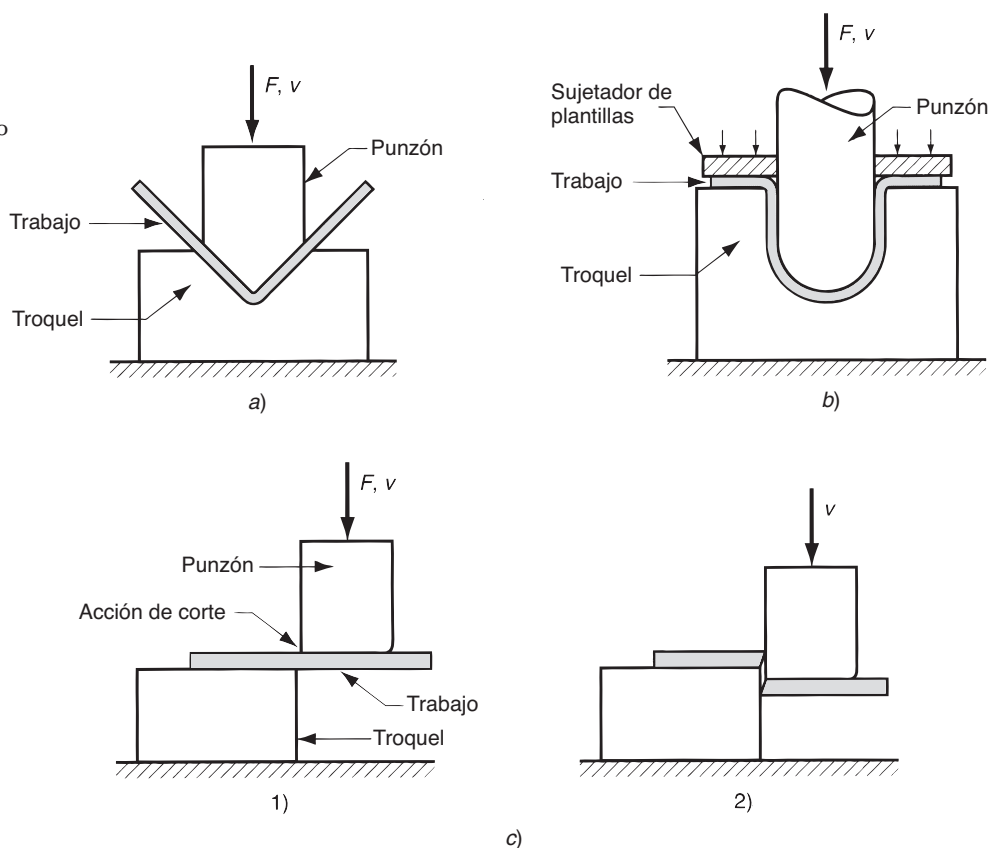


- **Rolado.** Es un proceso de deformación por compresión en el cual el espesor de una plancha o placa se reduce por medio de dos herramientas cilíndricas opuestas llamadas rodillos. Los rodillos giran para estirar y realizar el trabajo dentro de la abertura entre ellos y comprimirla.
- **Forjado.** En el forjado se comprime una pieza de trabajo entre dos troqueles opuestos, de manera que la forma del troquel se imprima para obtener el trabajo requerido. El forjado es un proceso tradicional de trabajo en caliente, pero muchos tipos de forjado se hacen también en frío.
- **Extrusión.** Es un proceso de compresión en el cual se fuerza el metal de trabajo a fluir a través de la abertura de un troquel para que tome la forma de la abertura de éste en su sección transversal.
- **Estirado.** En este proceso de formado, el diámetro de un alambre o barra se reduce cuando se tira del alambre a través de la abertura del troquel.

Trabajo de láminas metálicas Los procesos de trabajo de láminas metálicas son operaciones de formado o preformado de láminas, tiras y rollos de metal. La razón entre el área superficial y el volumen del material inicial es alta; por lo que esta relación es un medio útil para distinguir la deformación volumétrica de los procesos de láminas metálicas. **Prensado** es el término que se aplica frecuentemente a las operaciones de láminas metálicas, debido a que las máquinas utilizadas para desempeñar estas operaciones son prensas (se usan también prensas de varios tipos en otros procesos de manufactura). La pieza producida en una operación de laminado metálico se llama frecuentemente **estampado**.

Las operaciones de láminas metálicas se ejecutan siempre en frío y se utiliza un juego de herramientas llamadas **punzón** y **troquel**. El punzón es la porción positiva y el troquel es la porción negativa del juego de herramientas. Las operaciones básicas de láminas metálicas se describen en la figura 18.3 y se definen como sigue:

FIGURA 18.3 Operaciones básicas en el trabajo de láminas metálicas:
a) doblado, b) estirado y c) corte; 1) al primer contacto del punzón con la lámina y 2) después del corte. La fuerza y el movimiento relativo se indican por F y v .



- **Doblado.** El doblado implica la deformación de una lámina metálica o placa para que adopte un ángulo respecto a un eje recto, en la mayoría de los casos.
- **Estirado.** En el trabajo de láminas metálicas, el estirado se refiere a la transformación de una lámina plana de metal en una forma hueca o cóncava, como una copa, mediante el estirado del metal. Se usa un sujetador para mantener fija la plantilla, mientras el punzón empuja la lámina de metal, como se muestra en la figura 18.3b). Para distinguir esta operación del estirado de barras y alambres, se usan frecuentemente los términos *estirado en copa* o *estirado profundo*.
- **Corte.** Este proceso queda de alguna manera fuera de lugar en nuestra lista de procesos de deformación, debido a que implica más el corte que el formado del metal. En esta operación se corta la pieza usando un punzón y un troquel, como se muestra en la figura 18.3c). Aunque éste no es un proceso de formado, se incluye aquí debido a que es una operación necesaria y muy común en el trabajo de láminas metálicas.

Los procesos misceláneos dentro de la clasificación del trabajo de láminas metálicas de la figura 18.1 incluye una de procesos de formado relacionados que no utilizan herramientas de prensado y troquel. Como ejemplos de estos procesos se encuentran el formado recto, doblado laminar, repujado y doblado de tubos.

18.2 COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL EN EL FORMADO DE METALES

La curva de esfuerzo-deformación ofrece una visión que permite comprender el comportamiento de los metales durante su formación. La curva típica de esfuerzo-deformación para la mayoría de los metales se divide en una región elástica y una región plástica (sección 3.1.1). En el formado de un metal, la región plástica es de interés primordial debido a que en estos procesos el material se deforma plástica y permanentemente.

La relación típica esfuerzo-deformación exhibe elasticidad por debajo del punto de fluencia, y endurecimiento por deformación arriba de dicho punto. Las figuras 3.4 y 3.5 muestran este comportamiento en ejes lineales y logarítmicos. En la región plástica, el comportamiento del metal se expresa por la curva de fluencia:

$$\sigma = K\epsilon^n$$

donde K = coeficiente de resistencia, MPa (lb/in²), y n es el exponente de endurecimiento por deformación. El esfuerzo σ y la deformación ϵ en la curva de fluencia son el esfuerzo real y la deformación real. La curva de fluencia es generalmente válida como una relación que define el comportamiento plástico de un metal en el trabajo en frío. Los valores típicos de K y n para diferentes metales a temperatura ambiente se enlistan en la tabla 3.4.

Esfuerzo de fluencia La curva de fluencia describe la relación esfuerzo-deformación en la región donde tiene lugar el formado del metal. También indica el esfuerzo de fluencia del metal, la propiedad de resistencia que determina las fuerzas y la potencia requerida para realizar una operación particular de formado. La gráfica esfuerzo-deformación de la figura 3.5 muestra que cuando la mayoría de los metales se deforma a temperatura ambiente, aumentan su resistencia debido al endurecimiento por deformación. El esfuerzo requerido para continuar la deformación debe incrementarse para contrarrestar este incremento de la resistencia. **El esfuerzo de fluencia** se define como el valor instantáneo del esfuerzo requerido para continuar la deformación del material o mantener “fluyendo” al metal. Ésta es la resistencia a la fluencia del metal en función de la deformación, que puede expresarse como:

$$Y_f = K\epsilon^n \quad (18.1)$$

donde Y_f = esfuerzo de fluencia, MPa (lb/in²).

En las operaciones de formado individual que se revisarán en los dos capítulos siguientes, se puede usar el esfuerzo de fluencia instantáneo para analizar la secuencia del

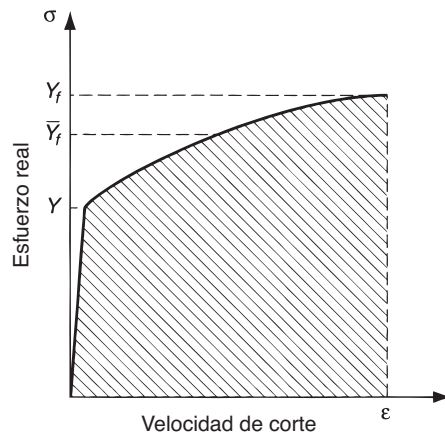


FIGURA 18.4 Curva de esfuerzo-deformación que indica la localización del esfuerzo de fluencia promedio $\bar{Y}_f$ en relación con la resistencia a la fluencia Y y el esfuerzo de fluencia final Y_f .

proceso. Por ejemplo, en ciertas operaciones de forja se puede determinar la fuerza instantánea durante la compresión a partir de los valores del esfuerzo de fluencia. La fuerza máxima se puede calcular basándose en el esfuerzo de fluencia que resulta del esfuerzo al final de la colada de la forja.

En otros casos, el análisis se basa en los promedios de esfuerzos y deformaciones que ocurren durante el mismo proceso de deformación, en lugar de los valores instantáneos. La extrusión representa este caso, figura 18.2c). Como consecuencia de la extrusión, la sección transversal del tocho se reduce y el metal se endurece gradualmente por deformación para alcanzar un valor máximo. Es más útil analizar el proceso con base en el esfuerzo de fluencia promedio durante la deformación, que determinar una secuencia de valores instantáneos de esfuerzo-deformación durante la reducción, que no solamente sería difícil obtener, sino de limitado interés.

Esfuerzo de fluencia promedio El *esfuerzo de fluencia promedio* (también llamado *esfuerzo de fluencia medio*) es el valor promedio de los esfuerzos sobre la curva esfuerzo-deformación desde el comienzo de la deformación hasta el valor final (máximo) que ocurre durante este proceso. El valor se ilustra en la gráfica esfuerzo-deformación de la figura 18.4.

El esfuerzo de fluencia promedio se determina integrando la ecuación de la curva de fluencia (ecuación 18.1) entre cero y el valor final de deformación que define el rango de interés. Esto genera la ecuación

$$\bar{Y}_f = \frac{K \epsilon^n}{1+n} \quad (18.2)$$

donde $\bar{Y}_f$ = esfuerzo de fluencia promedio, MPa (lb/in²); y ϵ = máximo valor de deformación durante el proceso de deformación.

En el capítulo siguiente se hace un uso extensivo del esfuerzo de fluencia promedio en el estudio de los procesos de deformación volumétrica. Dados los valores de K y n para el material de trabajo, se desarrollará un método de cálculo de la deformación final para cada proceso. Con base en esta deformación, se puede usar la ecuación (18.2) para determinar el esfuerzo de fluencia promedio a que se sujeta el material durante la operación.

18.3 TEMPERATURA EN EL FORMADO DE METALES

La curva de fluencia es una representación válida del comportamiento esfuerzo-deformación de un metal durante su deformación plástica, particularmente en operaciones de trabajo en frío. Para cualquier metal, los valores de K y n dependen de la temperatura. Tanto la resistencia como el endurecimiento por deformación se reducen a altas temperaturas.

Además, la ductilidad se incrementa a altas temperaturas. Este cambio de propiedades es importante porque cualquier operación de deformación se puede alcanzar a temperaturas elevadas con fuerza y potencia menores. Hay tres rangos de temperatura: trabajo en frío, caliente por debajo o por encima del punto de recrystalización.

Trabajo en frío *El trabajo en frío*, también conocido como *formado en frío*, es el formado de metal que se realiza a temperatura ambiente o ligeramente arriba. Las ventajas significativas del formado en frío comparado con el trabajo en caliente son: 1) proporcionar mejor precisión, lo que significa tolerancias más estrechas, 2) mejorar el acabado de la superficie, 3) el endurecimiento por deformación aumenta la resistencia y la dureza de la pieza, 4) el flujo de granos durante la deformación brinda la oportunidad de obtener propiedades direccionales convenientes en el producto resultante y 5) al no requerir calentamiento del trabajo, se ahorran costos de horno y combustible y se logran mayores velocidades de producción. Debido a esta combinación de ventajas, se han creado muchos procedimientos de formado en frío para operaciones importantes de producción en masa. Estos procedimientos proporcionan tolerancias estrechas y buenas superficies, minimizan la cantidad de maquinado y permiten que estos procedimientos se clasifiquen como procesos de forma neta o casi neta (sección 1.3.1).

Hay ciertas desventajas o limitaciones asociadas con las operaciones de formado en frío: 1) se requiere mayores potencia y fuerzas para desempeñar las operaciones, 2) se debe tener cuidado para asegurar que las superficies de la pieza de trabajo inicial están libres de incrustaciones y suciedad, 3) la ductilidad y el endurecimiento por deformación del metal de trabajo limitan la cantidad de formado que se puede hacer sobre la pieza. En algunas operaciones debe recocerse el metal (sección 8.1) para permitir la realización de formados posteriores. En otros casos el metal no es lo suficientemente dúctil para ser trabajado.

Para superar el problema de endurecimiento por deformación y reducir los requerimientos de fuerza y potencia, muchas operaciones de formado se ejecutan a temperaturas elevadas. Se involucran dos rangos de temperaturas elevadas que dan lugar a los términos trabajo en caliente por debajo y por encima de la temperatura de recrystalización.

Trabajo en caliente por debajo de la temperatura de recrystalización Debido a que las propiedades de deformación plástica se mejoran normalmente con el aumento de la temperatura en la pieza de trabajo, las operaciones de formado se realizan algunas veces a temperaturas algo más elevadas que la temperatura ambiente, pero por debajo de las temperaturas de recrystalización. Se aplica el término *trabajo en caliente* a este segundo rango de temperatura. La línea divisoria entre el trabajo en caliente y el trabajo en frío se expresa frecuentemente en términos del punto de fusión del metal. La línea divisoria usual es de $0.3T_m$, donde T_m es el punto de fusión del metal particular (temperatura absoluta).

Menores resistencia y endurecimiento por deformación, así como la mayor ductilidad del metal a temperaturas intermedias confieren al trabajo por debajo de la temperatura de recrystalización las siguientes ventajas sobre el trabajo en frío: 1) fuerzas más bajas y menores requerimientos de potencia, 2) son posibles trabajos más intrincados, 3) se puede eliminar o reducir la necesidad de recocido.

Trabajo en caliente *El trabajo en caliente* (también llamado *formado en caliente*) implica la deformación a temperaturas por encima de la temperatura de recrystalización. La temperatura de recrystalización de un metal es aproximadamente la mitad de su punto de fusión en la escala absoluta. En la práctica, el trabajo en caliente se lleva a cabo usualmente a temperaturas por encima de $0.5T_m$. El metal de trabajo se suaviza más conforme la temperatura se incrementa más allá de $0.5T_m$, mejorando así la ventaja del trabajo en caliente por arriba de este nivel. Sin embargo, el proceso de deformación genera el calor que incrementa la temperatura de trabajo en algunas regiones de la pieza. Esto puede causar la fusión en estas regiones, lo cual es altamente indeseable. Las incrustaciones en la superficie de trabajo se aceleran también a temperaturas más altas. Por consiguiente, las temperaturas de trabajo en caliente se mantienen normalmente dentro del rango de $0.5T_m$ a $0.75T_m$.

La ventaja más significativa del trabajo en caliente es la capacidad de producir deformaciones plásticas sustanciales del metal, más de las que son posibles con el trabajo en frío o el trabajo que se lleva a cabo por debajo de la temperatura de recrystalización. La razón principal es que la curva de fluencia del metal trabajado en caliente tiene un coeficiente de resistencia sustancialmente menor que a temperatura ambiente, el exponente de endurecimiento por deformación es cero (al menos en teoría) y la ductilidad del metal se incrementa de manera significativa. Todo esto da por resultado las siguientes ventajas respecto al trabajo en frío: 1) la forma de la pieza de trabajo se puede alterar de manera significativa, 2) se requiere menor fuerza y potencia para deformar el metal, 3) los metales que usualmente se fracturan en el trabajo en frío pueden formarse en caliente, 4) las propiedades de resistencia son generalmente isotrópicas debido a la ausencia de una estructura orientada de granos que se crea en el trabajo en frío, 5) el trabajo en caliente no produce fortalecimiento de la pieza. Esta última ventaja puede parecer inconsistente, ya que el aumento en la resistencia del metal se considera frecuentemente una ventaja del trabajo en frío. Sin embargo, hay aplicaciones en las cuales es indeseable que el metal se endurezca por trabajo debido a que reduce su ductilidad, por ejemplo, cuando la pieza tiene que procesarse posteriormente en frío. Sus desventajas son: precisión dimensional más baja, mayores requerimientos de energía (energía térmica para calentar la pieza de trabajo), oxidación de la superficie de trabajo (incrustaciones), acabado superficial más deficiente y menor duración en la vida de las herramientas.

La recrystalización del metal en el trabajo en caliente involucra difusión atómica, proceso que depende del tiempo. Las operaciones de formado del metal se desempeñan frecuentemente a altas velocidades que no dejan tiempo suficiente para completar la recrystalización de la estructura granular durante el ciclo de deformación. Sin embargo, debido a las altas temperaturas, la recrystalización ocurre a la larga, ya sea inmediatamente después del proceso de formado o más tarde, al enfriarse la pieza de trabajo. Aun si la recrystalización ocurre después de la verdadera deformación, su ocurrencia final junto con el suavizado sustancial del metal a altas temperaturas es la característica que distingue al trabajo en caliente del trabajo por debajo de la temperatura de recrystalización o en frío.

Formado isotérmico Ciertos metales como los aceros altamente aleados, muchas aleaciones de titanio y las aleaciones de níquel para altas temperaturas poseen buena dureza en caliente, propiedad que los hace útiles para el uso a altas temperaturas. Y aunque dichas propiedades los hacen atractivos para estas aplicaciones, también los hace difíciles de formar por métodos convencionales. El problema es que cuando estos metales se calientan a las temperaturas de trabajo en caliente y entran en contacto con las herramientas de formado relativamente frías, el calor es transferido de manera rápida fuera de la superficie de la pieza, elevando la resistencia en estas regiones. La variación en la temperatura y la resistencia en diferentes regiones de la pieza de trabajo producen patrones de flujo irregular en el metal durante la deformación; esto conduce a la formación de esfuerzos residuales y al posible agrietamiento superficial.

El **formado isotérmico** se refiere a las operaciones de formado que se llevan a cabo de tal manera que eliminan el enfriamiento superficial y los gradientes térmicos resultantes en la pieza de trabajo. Se realiza por precalentamiento de las herramientas que entran en contacto con la pieza a la misma temperatura de trabajo del metal. Esto desgasta las herramientas y reduce la vida, pero evita los problemas descritos cuando los metales difíciles se forman por métodos convencionales. En algunos casos el formado isotérmico representa la única forma en que pueden formarse estos materiales de trabajo. El procedimiento se asocia más estrechamente con el forjado y en el capítulo siguiente se revisará el formado isotérmico.

18.4 SENSIBILIDAD A LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN

En teoría, un metal en trabajo en caliente se comporta como un material perfectamente plástico, con un exponente de endurecimiento por deformación $n = 0$. Esto significa que una vez que se alcanza el nivel de esfuerzo de fluencia, el metal debe continuar fluyendo

bajo el mismo nivel de esfuerzo de fluencia. Sin embargo, un fenómeno adicional caracteriza el comportamiento de los metales durante su deformación, especialmente a las temperaturas elevadas del trabajo en caliente. Este fenómeno es la sensibilidad a la velocidad de deformación. En esta revisión, se empezará por definir la velocidad de deformación.

La rapidez a la que se deforma el metal en un proceso de formado se relaciona directamente con la velocidad de deformación v . En muchas operaciones de formado, la velocidad de deformación es igual a la velocidad del pistón o de cualquier otro elemento móvil del equipo. Esto se visualiza más fácilmente en un ensayo de tensión, como la velocidad del cabezal de la máquina respecto a su base fija. Dada la rapidez de deformación, la **velocidad de deformación** se define:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{h} \quad (18.3)$$

donde $\dot{\epsilon}$ = velocidad de deformación real, m/s/m (in/s/in), o simplemente s^{-1} ; y h = altura instantánea de la pieza de trabajo que se deforma, m (in). Si la velocidad de deformación v es constante durante la operación, entonces ésta varía al cambiar h . En la mayoría de las operaciones prácticas de formado, la valoración de la velocidad de deformación se complica por la forma de la pieza de trabajo y las variaciones en la velocidad de deformación en diferentes regiones de la pieza. La velocidad de deformación puede alcanzar $1\,000\,s^{-1}$ o más para algunos procesos de formado de metal, como rolado y forjado a alta velocidad.

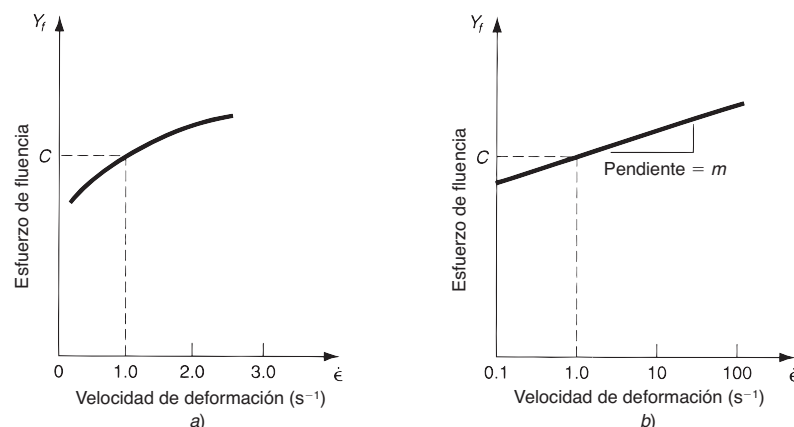
Ya se ha observado que el esfuerzo de fluencia de un metal es una función de la temperatura. En las temperaturas de trabajo en caliente, el esfuerzo de fluencia depende de la velocidad de deformación. El efecto de la velocidad de deformación sobre las propiedades de resistencia se conoce como **sensibilidad a la velocidad de deformación**. El efecto se puede ver en la figura 18.5. Al aumentar la velocidad de deformación, se incrementa la resistencia a la deformación. Esto se representa de manera usual como una línea aproximadamente recta en una gráfica log-log, lo cual conduce a la relación siguiente

$$Y_f = C\dot{\epsilon}^m \quad (18.4)$$

donde C es la constante de resistencia (similar pero no igual al coeficiente de resistencia en la ecuación de la curva de fluencia) y m es el exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación. El valor de C se determina a una velocidad de deformación de 1.0, y m es la pendiente de la curva en la figura 18.5b).

El efecto de la temperatura sobre los parámetros de la ecuación (18.4) es notable. Al incrementar la temperatura, decrece el valor de C (consistente con su efecto sobre K en la ecuación de la curva de fluencia) y aumenta el valor de m . El resultado general se puede ver en la figura 18.6. A temperatura ambiente el efecto de la velocidad de deformación es casi despreciable, e indica que la curva de fluencia es una buena representación del comportamiento del material. A medida que aumenta la temperatura, la velocidad de deformación juega un papel más importante en la determinación del esfuerzo de fluencia, como se indica por las pendientes más grandes de las relaciones deformación-velocidad. Esto es importante en el trabajo en caliente porque la resistencia a la deformación del

FIGURA 18.5 a) Efecto de la velocidad de deformación sobre la resistencia a la fluencia a temperatura de trabajo elevada, b) la misma relación graficada en coordenadas log-log.



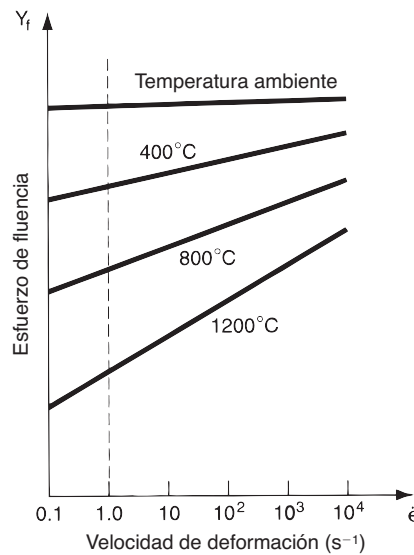


FIGURA 18.6 Efecto de la temperatura sobre el esfuerzo de fluencia para un metal típico. La constante C en la ecuación (18.4), indicada por la intersección de cada línea continua con la línea punteada vertical a una velocidad de deformación = 1.0, decrece, y m (pendiente de cada línea) aumenta al incrementarse la temperatura.

material aumenta drásticamente con el incremento de la velocidad de deformación. Para dar una idea del efecto, en la tabla 18.1 se proporcionan los valores típicos de m para los tres rangos de temperatura del trabajo en metales.

Se puede observar que aun en el trabajo en frío la velocidad de deformación puede tener un efecto mínimo sobre el esfuerzo de fluencia. En el trabajo en caliente el efecto puede ser significativo. Una expresión más completa para el esfuerzo de fluencia como función de la deformación y de la velocidad de deformación podría ser la siguiente:

$$Y_f = A \dot{\epsilon}^n \epsilon^m \quad (18.5)$$

donde A = un coeficiente de resistencia que combina los efectos de los valores previos de K y de C . Por supuesto, A , n y m podrían ser funciones de la temperatura, y el enorme trabajo de ensayar y recopilar los valores de estos parámetros para diferentes metales y varias temperaturas podría ser prohibitivo.

En esta cobertura de varios procesos de deformación volumétrica que se hará en el capítulo 19, se verá que muchos de ellos se realizan en caliente, y se desprecia el efecto de la velocidad de deformación en el análisis de las fuerzas y la potencia. Para las operaciones de trabajo en frío, trabajo en caliente por debajo de la temperatura de recrystalización y trabajo en caliente por arriba de la temperatura de recrystalización, a velocidades de deformación relativamente bajas, esta subestimación representa una suposición razonable.

18.5 FRICCIÓN Y LUBRICACIÓN EN EL FORMADO DE METALES

La fricción en el formado de metales surge debido al estrecho contacto entre las superficies de la herramienta y el material de trabajo, y a las altas presiones que soportan las superficies en estas operaciones. En la mayoría de los procesos de formado, la fricción es inconveniente por las siguientes razones: 1) retarda el flujo del metal en el trabajo, ocasionando

TABLA 18.1 Valores típicos de temperatura, sensibilidad a la velocidad de deformación y coeficiente de fricción en trabajo en frío, en caliente por debajo y por encima de la temperatura de recrystalización.

Categoría	Rango de temperatura	Exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación	Coeficiente de fricción
Trabajo en frío	$\leq 0.3T_m$	$0 \leq m \leq 0.05$	0.1
Trabajo en caliente por debajo de la temp. de recríst.	$0.3T_m - 0.5T_m$	$0.05 \leq m \leq 0.1$	0.2
Trabajo en caliente por encima de la temp. de recríst.	$0.5T_m - 0.75T_m$	$0.05 \leq m \leq 0.4$	0.4 - 0.5

esfuerzos residuales y algunas veces defectos del producto, 2) se incrementan las fuerzas y la potencia para desempeñar la operación y 3) el desgaste de las herramientas puede conducir a la pérdida de la precisión dimensional, lo cual da por resultado piezas defectuosas y el remplazo de las herramientas. Como las herramientas para formado de metales son generalmente costosas, su desgaste es de una mayor importancia. La fricción y el desgaste de las herramientas son más severos en el trabajo en caliente, debido a las condiciones más rudas.

La fricción en el formado de metales es diferente a la que se encuentra en la mayoría de los sistemas mecánicos, como trenes de engranajes, flechas, cojinetes y otros componentes que involucran un movimiento relativo entre las superficies. Estos casos se caracterizan generalmente por bajas presiones de contacto, temperaturas entre bajas y moderadas, y una lubricación amplia para minimizar el contacto entre los metales. Por el contrario, las condiciones en el formado de metales representan presiones altas entre la superficie dura de la herramienta y la pieza de trabajo suave, deformación plástica del material más suave y altas temperaturas (al menos en el trabajo en caliente). Estas condiciones pueden generar coeficientes de fricción relativamente altos en el metal de trabajo, incluso con la adición de lubricantes. Los valores típicos del coeficiente de fricción para las tres categorías de formado de metales aparecen en la tabla 18.1.

Si el coeficiente de fricción llega a ser lo suficientemente grande, ocurre una condición conocida como adherencia. La **adherencia** en el trabajo de metales (también llamada **fricción por adherencia**) es la tendencia de las dos superficies en movimiento relativo a pegarse una a la otra en lugar de deslizarse. Esto significa que el esfuerzo de fricción entre las superficies excede al esfuerzo de flujo cortante del metal de trabajo, ocasionando que el metal se deforme por un proceso de corte por debajo de la superficie, en lugar de que ocurra un deslizamiento entre las superficies. La adherencia ocurre en las operaciones de formado de metal y es un problema prominente en el rolado; se estudia en ese contexto en el capítulo siguiente.

Los lubricantes para el trabajo de los metales se aplican en la interfaz herramienta-trabajo en muchas operaciones de formado para reducir los perjudiciales efectos de la fricción. Los beneficios que se obtienen de su aplicación incluyen una reducción en la adherencia, en las fuerzas, en la potencia y en el desgaste de las herramientas, así como un mejor acabado de la superficie en el producto final. Los lubricantes tienen también otras funciones, como reducir el calor en las herramientas. Las consideraciones para escoger un lubricante apropiado para el trabajo de metales incluyen el tipo de procesos de formado que se va a utilizar (rolado, forjado, estirado de lámina metálica u otros), ya sea trabajo en caliente o trabajo en frío, así como el material de trabajo, la reactividad química con la herramienta y con los metales de trabajo (por lo general, es deseable que los lubricantes se adhieran a las superficies para que sean más efectivos en la reducción de la fricción), facilidad de aplicación, bajas toxicidad, inflamabilidad y escaso costo.

Los lubricantes usados para operaciones de trabajo en frío incluyen aceites minerales, grasas y aceites grasos, emulsiones en agua, jabones y otros recubrimientos [3], [5]. El trabajo en caliente se realiza algunas veces en seco para ciertas operaciones y materiales (por ejemplo, el laminado en caliente del acero y la extrusión de aluminio). Cuando los lubricantes se usan para trabajo en caliente incluyen aceites minerales, grafito y vidrio. El vidrio fundido se convierte en un lubricante efectivo para la extrusión en caliente de aleaciones de acero. El grafito contenido en agua o aceite mineral es un lubricante común para el forjado en caliente de varios materiales de trabajo. En las referencias [5] y [7] se encuentran más detallados los tratamientos de lubricación en el trabajo de metales.

REFERENCIAS

- [1] Altan, T. Oh, S.-I. y Gegel, H. L., **Metal Forming: Fundamentals and Applications**, ASM International, Materials Park, Ohio, 1983.
- [2] Cook, N. H., **Manufacturing Analysis**, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Massachusetts. 1966.
- [3] Lange, K., et al. (eds.), **Handbook of Metal Forming**, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1995.
- [4] Mielnik, E. M., **Metalworking Science and Engineering**, McGraw-Hill, Inc., Nueva York, 1991.
- [5] Nachtman, E. S. y Kalpakjian, S., **Lubricants and Lubrication in Metalworking Operations**, Marcel Dekker, Inc. Nueva York, 1985.

- [6] Wagoner, R. H. y Chenot, J. L., *Fundamentals of Metal Forming*, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1997.
- [7] Wick, C., et al. (eds.), *Tools and Manufacturing Engineers Handbook*, 4a. ed., vol. II, *Forming*. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1984.

PREGUNTAS DE REPASO

- 18.1. ¿Cuáles son las características que distinguen a los procesos de deformación volumétrica de los procesos con láminas metálicas?
- 18.2. La extrusión es un proceso fundamental del formado. Descríbala.
- 18.3. ¿Por qué se usa con frecuencia el término prensado para los procesos con láminas metálicas?
- 18.4. ¿Cuál es la diferencia entre el estirado profundo (embutido profundo) y el estirado de barras?
- 18.5. Indique la ecuación matemática para la curva de fluencia.
- 18.6. ¿Cómo afecta el incremento de temperatura a los parámetros de la ecuación de la curva de fluencia?
- 18.7. Indique algunas de las ventajas del trabajo en frío respecto al trabajo por debajo y encima de la temperatura de recristalización.
- 18.8. ¿Qué es el formado isotérmico?
- 18.9. Describa los efectos de la velocidad de deformación en el formado de metales.
- 18.10. ¿Por qué es indeseable la fricción en las operaciones del formado de metales?
- 18.11. ¿Qué es la fricción por adherencia en el trabajo de metales?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 13 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

- 18.1. ¿Cuál de los siguientes es un proceso de formación volumétrica? (tres respuestas correctas): *a)* doblado, *b)* estirado profundo, *c)* extrusión, *d)* forjado, *e)* laminado y *f)* cortado.
- 18.2. ¿Cuál de las siguientes opciones son típicas de la forma de la pieza en los procesos con láminas metálicas? *a)* alta relación de volumen-área o *b)* baja relación de volumen-área.
- 18.3. ¿En cuál de las siguientes regiones de la curva esfuerzo-deformación la curva de fluencia expresa el comportamiento de un metal? *a)* región elástica o *b)* región plástica.
- 18.4. ¿Por cuál de los siguientes factores se multiplica el esfuerzo de fluencia para obtener el esfuerzo de fluencia promedio? *a)* n , *b)* $(1+n)$, *c)* $1/n$, o *d)* $1/(1+n)$, donde n es el exponente de endurecimiento por formación.
- 18.5. ¿El trabajo en caliente de metales se refiere a cuál de las siguientes regiones de temperatura, respecto al punto de fusión del metal, dado en una escala de temperatura absoluta? *a)* temperatura ambiente, *b)* $0.2T_m$, *c)* $0.4T_m$ o *d)* $0.6T_m$.
- 18.6. ¿Cuáles de las siguientes opciones son ventajas y características del trabajo en caliente respecto al trabajo en frío? (cuatro respuestas correctas): *a)* menos probabilidad de fractura de la pieza de trabajo, *b)* se reduce la fricción, *c)* propiedades de resistencia aumentadas, *d)* propiedades mecánicas isotrópicas, *e)* menores requerimientos de energía total, *f)* menores requerimientos de fuerzas de deformación, *g)* posibilidad de cambios más significativos de forma y *h)* se reduce la sensibilidad a la velocidad de deformación.
- 18.7. ¿El aumento en la velocidad de deformación tiende a producir cuál de los siguientes efectos sobre el esfuerzo de fluencia durante el formado en caliente de un metal? *a)* disminución del esfuerzo de fluencia, *b)* no tiene efecto, *c)* incremento de esfuerzo de fluencia.
- 18.8. ¿Cuál de las siguientes opciones respecto a su valor en el trabajo en caliente tiende a ser el coeficiente de fricción entre la pieza y la herramienta en el trabajo en frío? *a)* mayor, *b)* menor, *c)* sin efecto.

PROBLEMAS

Curva de fluencia de formado

- 18.1. Los parámetros para cierto metal son: coeficiente de resistencia igual a 550 MPa y exponente de endurecimiento por deformación de 0.22. Durante una operación de formado, el esfuerzo real final que experimenta el metal es de 0.85. Determine el esfuerzo de fluencia a esta deformación y el esfuerzo de fluencia promedio que experimenta el metal durante la operación.
- 18.2. Un metal tiene una curva de fluencia con los parámetros coeficiente de resistencia de 850 MPa y exponente de endurecimiento por deformación de 0.30. Una probeta de metal

en tensión con longitud de calibración de 100 mm se estira a una longitud de 157 mm. Determine el esfuerzo de fluencia a esta nueva longitud y el esfuerzo de fluencia promedio al que se sujetó el metal durante la deformación.

- 18.3. Un metal tiene una curva de fluencia con los siguientes parámetros: coeficiente de resistencia de 35 000 lb/in² y exponente de endurecimiento por deformación de 0.26. Una probeta en tensión de metal con longitud de calibración de 2.0 in se estira a una longitud de 3.3 in. Determine el esfuerzo de fluencia a esta nueva longitud y el esfuerzo de fluencia promedio al que se sujetó el metal durante la deformación.
- 18.4. El coeficiente de resistencia y el exponente de endurecimiento por deformación de cierto material de prueba son 40 000 lb/in² y 0.19, respectivamente. Una probeta cilíndrica del metal con diámetro inicial de 2.5 in y una longitud de 3.0 in se comprime a una longitud de 1.5 in. Determine el esfuerzo de fluencia a la nueva longitud y el esfuerzo de fluencia promedio al cual ha estado sujeto el metal durante la deformación.
- 18.5. Deduzca la ecuación para el esfuerzo de fluencia promedio; ecuación (18.2).
- 18.6. Para cierto metal, el coeficiente de resistencia es de 700 MPa y el exponente de endurecimiento por deformación es de 0.27. Determine el esfuerzo de fluencia promedio que experimenta el metal si se le sujeta a un esfuerzo igual a su coeficiente de resistencia K .

Velocidad de deformación

- 18.11. Una probeta con una longitud inicial de calibración de 150 mm está sujeta a un ensayo de tensión en el cual las mordazas que sostienen el extremo de la probeta de prueba se mueven a una velocidad relativa de 0.1 m/s. Construya una gráfica de la velocidad de deformación como función de la longitud, cuando la probeta se estira a una longitud de 200 mm.
- 18.12. Una probeta con una longitud inicial de calibración de 6.0 in está sujeta a un ensayo de tensión en el cual las mordazas que sostienen el extremo de la probeta de prueba se mueven a una velocidad relativa de 1.0 in/s. Construya una gráfica de la velocidad de deformación como función de la longitud, cuando la probeta se estira a una longitud de 8.0 in.
- 18.13. Una pieza de trabajo con una altura inicial h de 100 mm se comprime a una altura final de 50 mm. Durante la deformación, la velocidad relativa de las placas que comprimen la pieza es de 200 mm/s. Determine la velocidad de deformación para: a) $h = 100$ mm, b) $h = 75$ mm y c) $h = 51$ mm.
- 18.14. Una operación de trabajo en caliente se lleva a cabo a varias velocidades. La constante de resistencia es de 30 000 lb/in² y

18.7. Determine el valor del exponente de endurecimiento por deformación para un metal que ocasionará que el esfuerzo de fluencia promedio sea 3/4 del esfuerzo de fluencia final después de la deformación.

- 18.8. El coeficiente de resistencia es de 35 000 lb/in² y el exponente de endurecimiento por deformación es de 0.40 para un metal que se usa en una operación de formado, en la cual la pieza de trabajo reduce el área de su sección transversal por estirado. Si el esfuerzo de fluencia promedio sobre la pieza es de 20 000 lb/in², determine la cantidad de reducción de área de la sección transversal que experimenta la pieza.
- 18.9. En una prueba de esfuerzo, dos pares de valores de esfuerzo y endurecimiento se midieron para una probeta de metal después de que había dado: 1) esfuerzo real de 217 MPa y deformación real de 0.35 y 2) esfuerzo real de 259 MPa y deformación real de 0.68. Con base en esta información, determine el coeficiente de resistencia y el exponente de endurecimiento por deformación.
- 18.10. Los valores de esfuerzo y deformación siguientes se midieron en la región plástica durante una prueba de tensión llevada a cabo con un nuevo metal experimental: 1) esfuerzo real de 43 608 lb/in² y deformación real de 0.27 in/in, 2) y esfuerzo real de 52 048 lb/in² y deformación real de 0.85 in/in. Con base en esta información, determine el coeficiente de resistencia y el exponente de endurecimiento por deformación.

el exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación es de 0.15. Determine el esfuerzo de fluencia si la velocidad de deformación es a) 0.01/s, b) 1.0/s, c) 100/s.

- 18.15. Un ensayo de tensión para cierto metal se lleva a cabo para determinar estos parámetros: constante de esfuerzo C y el exponente a la sensibilidad a la velocidad de deformación m en la ecuación (18.4). La temperatura a la que se lleva a cabo la prueba es de 500 °C. A la velocidad de deformación de 12/s, el esfuerzo se mide a 160 MPa; y a velocidad de deformación de 250/s, el esfuerzo es de 300 MPa. a) Determine C y m . b) Si la temperatura fuera de 600 °C, ¿qué cambios esperarías en los valores de C y m ?
- 18.16. Un ensayo de tensión para cierto metal se lleva a cabo para determinar la constante de resistencia C y el exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación m a 1 000 °F. A una velocidad de deformación de 10/s, el esfuerzo se mide a 23 000 lb/in²; y a una velocidad de deformación de 300/s, el esfuerzo es de 45 000 lb/in². a) Determine C y m . b) Si la temperatura fuera de 900 °F, ¿qué cambios esperarías en los valores de C y m ?

19

PROCESOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA EN EL TRABAJO DE METALES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

- 19.1 Laminado
 - 19.1.1 Laminado plano y su análisis
 - 19.1.2 Laminado de perfiles
 - 19.1.3 Molinos laminadores
- 19.2 Otros procesos de deformación relacionados con el laminado
- 19.3 Forjado
 - 19.3.1 Forjado en troquel abierto
 - 19.3.2 Forjado con troquel impresor
 - 19.3.3 Forjado sin rebaba
 - 19.3.4 Troqueles de forjado, martinets y prensas
- 19.4 Otros procesos de deformación relacionados con el forjado
- 19.5 Extrusión
 - 19.5.1 Tipos de extrusión
 - 19.5.2 Análisis de la extrusión
 - 19.5.3 Troqueles y prensas de extrusión
 - 19.5.4 Otros procesos de extrusión
 - 19.5.5 Defectos en productos extruidos
- 19.6 Estirado de alambres y barras
 - 19.6.1 Análisis del estirado
 - 19.6.2 Práctica del estirado
 - 19.6.3 Estirado de tubos

Los procesos de deformación descritos en este capítulo realizan un cambio significativo en las piezas del metal cuya forma inicial es más voluminosa que laminar. Las formas iniciales incluyen barras, tochos cilíndricos, tochos rectangulares y planchas, así como otras formas similares elementales. Los procesos de deformación volumétrica que refinan las formas originales, algunas veces mejoran las propiedades mecánicas y siempre adicionan un valor comercial al producto. El trabajo de los procesos de deformación consiste en someter el metal a un esfuerzo suficiente para hacer que éste fluya plásticamente y tome la forma deseada.

Los procesos de deformación volumétrica se realizan en operaciones de trabajo en frío, y caliente tanto por arriba como por debajo de la temperatura de cristalización. El trabajo en frío o debajo de la temperatura de cristalización es apropiado cuando el cambio de forma es menos severo y hay necesidad de mejorar las propiedades mecánicas, o alcanzar un buen acabado en la pieza final. El trabajo en caliente se requiere generalmente cuando involucra la deformación volumétrica de grandes piezas de trabajo.

La importancia tecnológica y comercial de los procesos de deformación volumétrica surge a partir de lo siguiente:

- Con las operaciones de trabajo en caliente se pueden lograr cambios significativos en la forma de las piezas de trabajo.
- Las operaciones de trabajo en frío se pueden usar no solamente para dar forma al producto, sino también para incrementar su resistencia mediante el endurecimiento por deformación.
- Estos procesos producen poco o ningún desperdicio como subproducto de la operación. Algunas operaciones de deformación volumétrica son procesos de **forma neta o casi neta**; se alcanza la forma final con poco o ningún maquinado posterior.

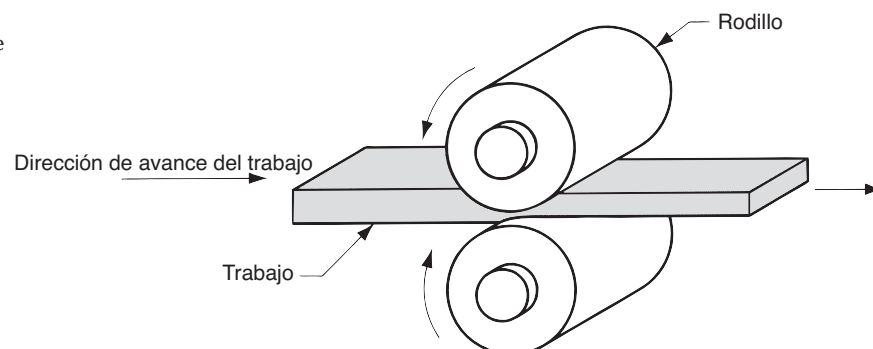
Los procesos de deformación volumétrica que se cubren en este capítulo son: 1) laminado, 2) forjado, 3) extrusión, 4) estirado de alambre y barras. El capítulo también documenta las variantes y operaciones afines a los cuatro procesos básicos que se han desarrollado a través de los años.

19.1 LAMINADO

El **laminado** es un proceso de deformación en el cual el espesor del material de trabajo se reduce mediante fuerzas de compresión ejercidas por dos rodillos opuestos. Los rodillos giran, como se ilustra en la figura 19.1, para jalar del material del trabajo y simultáneamente apretarlo entre ellos. El proceso básico ilustrado en la figura es el laminado plano, que se usa para reducir el espesor de una sección transversal rectangular. Un proceso estrechamente relacionado es el laminado de perfiles, en el cual una sección transversal cuadrada se transforma en un perfil, tal como en una viga en I.

La mayoría de los procesos de laminado involucran una alta inversión de capital, requieren piezas de equipo pesado llamadas molinos laminadores o de laminación. El alto costo de inversión requiere que los molinos se usen para producción en grandes cantidades de artículos estándar, como láminas y placas. La mayoría del laminado se realiza en caliente debido a la gran cantidad de deformación requerida, y se le llama **laminado en caliente**. Los metales laminados en caliente están generalmente libres de esfuerzos residuales y sus propiedades son isotrópicas. Las desventajas del laminado en caliente son que el producto no puede mantenerse dentro de tolerancias adecuadas, y la superficie presenta una capa de óxido característica.

FIGURA 19.1 Proceso de laminación, específicamente laminado plano.

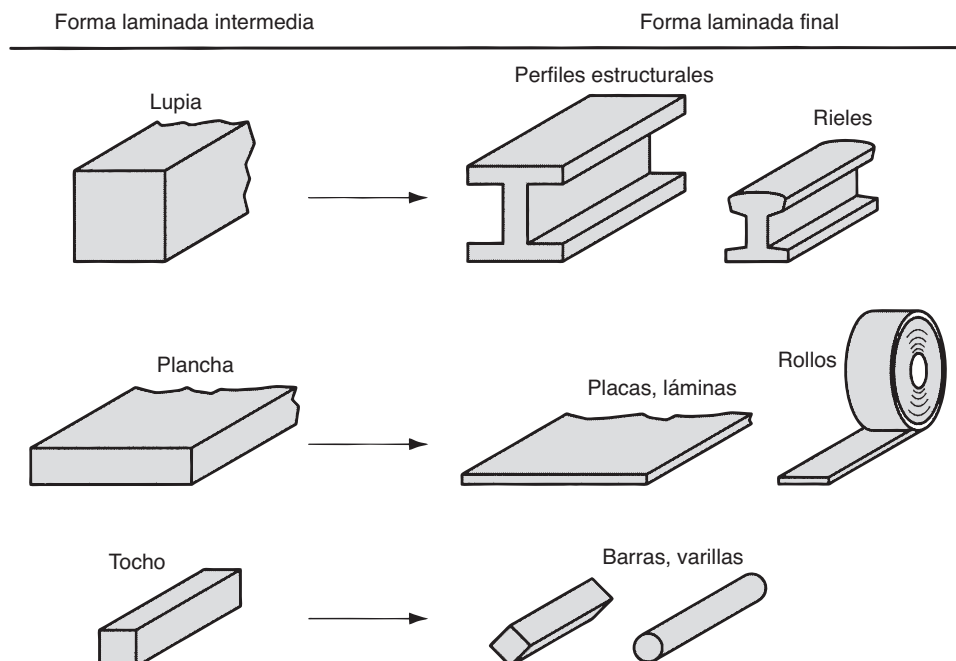


La fabricación de acero representa la aplicación más común de las operaciones de laminación (véase Nota histórica 19.1). Se analizará la secuencia de pasos en un molino de laminación para ilustrar la variedad de productos que pueden hacerse. En otras industrias metálicas básicas se encuentran pasos similares. El trabajo empieza con un lingote de acero fundido recién solidificado. Aún caliente, el lingote se coloca en un horno donde permanece durante muchas horas, hasta alcanzar la temperatura uniforme en toda su extensión, para que pueda fluir consistentemente durante el laminado. Para el acero, la temperatura de laminación es alrededor de $1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($2\,200\text{ }^{\circ}\text{F}$). La operación de calentamiento se llama **recalentado** y los hornos en los cuales se lleva a cabo se llaman **fosas de recalentamiento**.

El lingote recalentado pasa al molino de laminación, donde se lamina para convertirlo en una de las tres formas intermedias llamadas lupias, tochos o planchas. Una **lupia** tiene una sección transversal cuadrada de $150 \times 150\text{ mm}$ ($6 \times 6\text{ in}$) o mayor. Una **plancha** se lamina a partir de un lingote o de una lupia y tiene una sección rectangular de 250 mm (10 in) de ancho o más, y un espesor de 40 mm (1.5 in o más). Un **tocho** se lamina a partir de una lupia y es cuadrado, con dimensiones de 40 mm (1.5 in) por lado o mayor. Estas formas intermedias se laminan posteriormente para convertirlas en productos finales.

Las lupias se laminan para generar perfiles estructurales y rieles para ferrocarril. Los tochos se laminan para producir barras y varillas. Estas formas son la materia prima para el maquinado, estirado de alambre, forjado y otros procesos de trabajo de metales. Las planchas se laminan para convertirlas en placas, láminas y tiras. Las placas laminadas en caliente se usan para la construcción de barcos, puentes, calderas, estructuras soldadas para maquinaria pesada, tubos y tuberías, y muchos otros productos. La figura 19.2 muestra algunos de estos productos laminados de acero. El laminado posterior de las placas y láminas trabajadas en caliente se realiza frecuentemente por **laminado en frío**, a fin de prepararlas para operaciones posteriores de trabajo en lámina (capítulo 20). El laminado en frío hace más resistente el metal y permite unas tolerancias más estrechas del espesor. Además, la superficie del material laminado en frío está libre de incrustaciones o copas de óxido y es generalmente superior a los correspondientes productos laminados en caliente. Estas características hacen de las láminas, tiras y rollos laminados en frío el material ideal para estampados, paneles exteriores y otros productos que van desde automóviles hasta utensilios y muebles de oficina.

FIGURA 19.2 Algunos productos de acero hechos en molino de laminación.



Nota histórica 19.1 Laminado.

El laminado del oro y la plata por medios manuales data del siglo XIV. Leonardo da Vinci diseñó uno de los primeros molinos de laminación en 1480, pero es dudoso que su modelo se haya construido alguna vez. Alrededor del año 1600 se practicaba el laminado del plomo y del estaño en molinos manuales. Alrededor de 1700, el hierro ya se laminaba en caliente en Alemania, Bélgica, Francia, Inglaterra y Suecia. Estos molinos se usaron para hacer lámina a partir de barras de hierro. Antes de esta época, los únicos molinos laminadores que existían en las acerías eran molinos ranuradores, pares de rodillos opuestos con collares (discos cortantes) que cortaban el hierro y el acero en tiras angostas para hacer clavos y productos similares. Los molinos ranuradores no estaban diseñados para reducir el espesor del metal.

La práctica moderna de laminado data de 1783, cuando se expidió en Inglaterra una patente para un proceso que producía barras de hierro usando rodillos acanalados. La Revolución Industrial creó una tremenda demanda de productos de hierro y acero, estimulando el desarrollo de la laminación. El primer molino que laminaba rieles para ferrocarril se inició en Inglaterra en 1820. Las primeras vigas en I se laminaron en Francia en 1849. Además, el tamaño y la capacidad de los molinos de laminado plano se incrementaron de manera drástica durante este periodo.

El laminado es un proceso que requiere una fuente muy grande de potencia. Hasta el siglo XVIII se usaron las ruedas accionadas por agua para mover los molinos de laminación. Las máquinas de vapor incrementaron la capacidad de estos molinos de laminación hasta poco después de 1900, cuando los motores eléctricos remplazaron al vapor.

19.1.1 Laminado plano y su análisis

El laminado plano se ilustra en las figuras 19.1 y 19.3. Involucra el laminado de planchas, tiras, láminas y placas, piezas de trabajo de sección transversal rectangular con un ancho mayor que el espesor. En el laminado plano, se presiona el trabajo entre dos rodillos de manera que su espesor se reduce a una cantidad llamada **draft**:

$$d = t_o - t_f \quad (19.1)$$

donde d = draft, mm (in); t_o = espesor inicial, in (mm); t_f = espesor final, mm (in). El draft se expresa algunas veces como una fracción del espesor del material inicial llamada **reducción**:

$$r = \frac{d}{t_o} \quad (19.2)$$

donde r = reducción. Cuando se usa una serie de operaciones de laminado, la reducción se toma como la suma de los adelgazamientos dividida entre el espesor original.

Además de reducir el espesor, el laminado incrementa usualmente el ancho del material de trabajo. Esto se llama **esparcido** y tiende a ser más pronunciado con bajas relaciones entre ancho y espesor, así como con bajos coeficientes de fricción. Existe la conservación del material, de tal manera que el volumen de metal que sale de los rodillos es igual al volumen que entra:

$$t_o w_o L_o = t_f w_f L_f \quad (19.3)$$

donde w_o y w_f son los anchos de trabajo antes y después, mm (in), y L_o y L_f son las longitudes antes y después, mm (in). De igual forma, la velocidad volumétrica del flujo material antes y después debe ser la misma, así que las velocidades pueden relacionarse antes y después de la siguiente manera:

$$t_o w_o v_o = t_f w_f v_f \quad (19.4)$$

donde v_o y v_f son las velocidades de entrada y salida del material de trabajo.

Los rodillos entran en contacto con el material de trabajo a lo largo de un arco de contacto definido por el ángulo θ . Cada rodillo tiene un radio R y su velocidad de rotación tiene una velocidad superficial v_r . Esta velocidad es mayor que la velocidad de entrada v_o y menor que la velocidad de salida v_f . Como el flujo de metal es continuo, hay un cambio gradual en la velocidad del material de trabajo entre los rodillos. Sin embargo, existe un punto a lo largo del arco donde la velocidad del trabajo iguala la velocidad del rodillo.

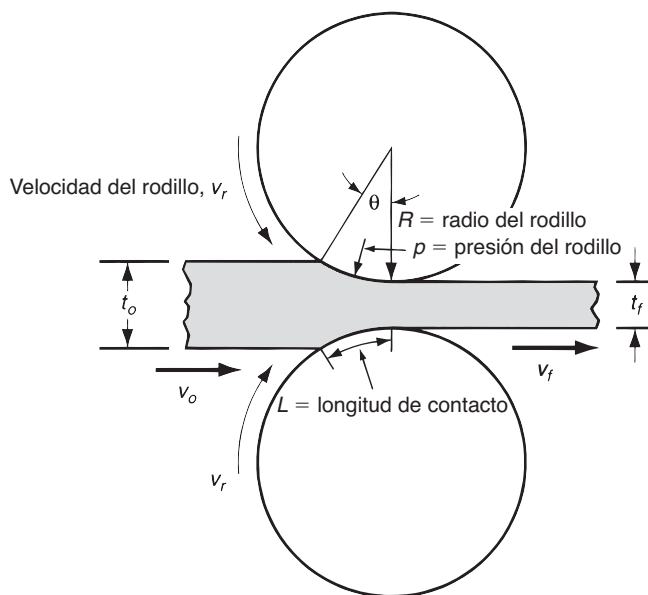


FIGURA 19.3 Vista lateral del laminado plano en la que se muestra el espesor antes y después, las velocidades de trabajo, el ángulo de contacto con los rodillos y otras características.

Este punto se llama **punto de no deslizamiento**, también conocido como **punto neutro**. A cualquier lado de este punto, ocurren deslizamientos y fricción entre el rodillo y el material de trabajo. La cantidad de deslizamiento entre los rodillos y el material de trabajo puede medirse por medio del **deslizamiento hacia delante**, un término que se usa en laminado y se define como:

$$s = \frac{v_f - v_r}{v_r} \quad (19.5)$$

donde s = deslizamiento hacia delante, v_f = velocidad final del trabajo (salida), m/s (ft/s); y v_r = velocidad de rodillo, m/s (ft/s).

El esfuerzo real experimentado por el trabajo laminado se basa en el espesor del material antes y después del laminado. En forma de ecuación,

$$\epsilon = \ln \frac{t_o}{t_f} \quad (19.6)$$

Se puede usar la deformación real para determinar el esfuerzo de fluencia promedio $\bar{Y}_f$ aplicado al material de trabajo en el laminado plano. De la ecuación 18.2 del capítulo anterior, se sabe que

$$\bar{Y}_f = \frac{K \epsilon^n}{1 + n} \quad (19.7)$$

El esfuerzo de fluencia promedio será útil para calcular las estimaciones de fuerza y potencia en laminado.

La fricción se presenta en el laminado con cierto coeficiente de fricción, y la fuerza de compresión de los rodillos, multiplicada por este coeficiente de fricción, da por resultado una fuerza de fricción entre los rodillos y el trabajo. En el lado de la entrada del punto neutro la fuerza de fricción tiene una dirección; en el otro lado, tiene la dirección opuesta. Sin embargo, las dos fuerzas no son iguales. La fuerza de fricción es mayor en la entrada, de manera que la fuerza neta jala el trabajo a través de los rodillos. El laminado no sería posible sin estas diferencias. Hay un límite para el máximo draft posible que puede alcanzar el laminado plano con un coeficiente de fricción, dado por

$$d_{\text{máx}} = \mu^2 R \quad (19.8)$$

donde $d_{\text{máx}}$ = draft máximo, mm (in); μ = coeficiente de fricción y R = radio del rodillo, mm (in). La ecuación indica que si la fricción fuera cero, el adelgazamiento podría ser cero y esto haría imposible la operación de laminado.

El coeficiente de fricción en el laminado depende de varios factores, como lubricación, material de trabajo y temperatura de trabajo. En el laminado en frío el valor es alrededor de 0.1; en el trabajo en caliente debajo de la temperatura de cristalización, un valor típico es alrededor de 0.2; y en el laminado en caliente arriba de la temperatura de cristalización μ es alrededor de 0.4 [15]. El laminado en caliente se caracteriza frecuentemente por una condición llamada **adherencia**, en la cual la superficie caliente del material de trabajo se pega a los rodillos sobre el arco de contacto. Esta condición ocurre a menudo en el laminado de aceros y aleaciones para alta temperatura. Cuando ocurre la adherencia, el coeficiente de fricción puede ser tan alto como 0.7. La consecuencia de la adherencia es que las capas superficiales del material de trabajo no se pueden mover a la misma velocidad que la velocidad del rodillo v_r ; y debajo de la superficie la deformación es más severa a fin de permitir el paso de la pieza a través de la abertura entre los rodillos.

Dado un coeficiente de fricción suficiente para realizar el laminado, la fuerza de rodillo F requerida para mantener la separación entre los dos rodillos se puede calcular integrando la presión unitaria de laminado (mostrada como p en la figura 19.3) sobre el área de contacto rodillo-trabajo. Esto se puede expresar como sigue:

$$F = w \int_0^L p dL \quad (19.9)$$

donde F = fuerza de laminado N (lb); w = ancho del material de trabajo que se está laminando, mm (in); p = presión de laminado, MPa (lb/in²); y L = longitud de contacto entre el rodillo y el trabajo, mm (in). La integración requiere dos términos separados, uno a cada lado del punto neutro. Las variaciones en la presión del rodillo a lo largo de la longitud de contacto son significativas. La figura 19.4 da una idea de esta variación. La presión alcanza un máximo en el punto neutro y se desvanece a cada lado de los puntos de entrada y salida. Al aumentar la fricción, la presión se incrementa al máximo relativo entre los valores de entrada y salida. Al disminuir la fricción el punto neutro se corre de la entrada hacia la salida a fin de mantener una fuerza neta que jale el material en la dirección del laminado. De otra forma, con una baja fricción, el material de trabajo podría deslizarse en lugar de pasar entre los rodillos.

Se puede calcular una aproximación de los resultados obtenidos por la ecuación 19.9 con base en el esfuerzo de fluencia promedio que experimenta el material de trabajo en la brecha entre los rodillos. Esto es,

$$F = \bar{Y}_f w L \quad (19.10)$$

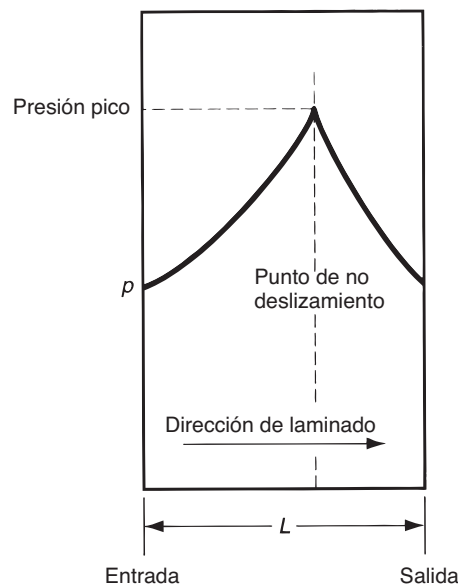


FIGURA 19.4 Variación típica de presión a lo largo de la longitud de contacto en el laminado plano. La presión pico se localiza en el punto neutro. El área bajo la curva, representada por la integración de la ecuación 19.9, es la fuerza de laminación F .

donde $\bar{Y}_f$ = esfuerzo de fluencia promedio de la ecuación 19.7 en MPa (lb/in²); el producto wL es el área de contacto rodillo-trabajo, mm² (in²). La longitud de contacto se puede aproximar mediante:

$$L = \sqrt{R(t_o - t_f)} \quad (19.11)$$

El momento de torsión en laminado se puede estimar suponiendo que la fuerza ejercida por los rodillos se centra en el trabajo, conforme pasa entre ellos y actúa con un brazo de palanca de la mitad de la longitud de contacto L . Entonces, el momento de torsión para cada rodillo es:

$$T = 0.5 FL \quad (19.12)$$

La potencia requerida para mover cada rodillo es el producto del momento de torsión y la velocidad angular. La velocidad angular es $2N$, donde N = velocidad rotacional del rodillo. Por lo tanto, la potencia en cada rodillo es $2NT$. Al sustituir la ecuación 19.12 por el momento de torsión en esta expresión para la potencia, y al duplicar el valor, dado que un molino de laminado posee dos rodillos, se obtiene la siguiente expresión:

$$P = 2\pi NFL$$

donde P = potencia, J/s o W (in-lb/min); N = velocidad de rotación 1/s (rev/min); F = fuerza de laminado, N (lb); L = longitud de contacto, m (in).

EJEMPLO 19.1 Laminado plano

Una tira con un ancho de 300 mm y 25 mm de espesor se alimenta a través de un molino laminador con dos rodillos de 250 mm de radio cada uno. El espesor de material de trabajo se reduce a 22 mm en un paso, a una velocidad de rodillo de 50 rev/min. El material de trabajo tiene una curva de fluencia definida por $K = 275$ MPa y $n = 0.15$ y se supone que el coeficiente de fricción entre los rodillos y el trabajo es de 0.12. Determine si la fricción es suficiente para realizar la operación de laminado. Si es así, calcule la fuerza de laminado, el momento de torsión y la potencia en caballos de fuerza.

Solución: El draft que se intenta en esta operación de laminado es:

$$d = 25 - 22 = 3 \text{ mm}$$

De la ecuación 19.8, el draft máximo posible para el coeficiente de fricción dado es:

$$d_{\text{máx}} = (0.12)^2(250) = 3.6 \text{ mm}$$

Como el draft permisible máximo excede la reducción que se pretende, es posible la operación de laminado. Para calcular la fuerza de laminado se necesita la longitud de contacto L y el esfuerzo de fluencia promedio $\bar{Y}_f$. La longitud de contacto está dada por la ecuación 19.11:

$$L = \sqrt{250(25 - 22)} = 27.4 \text{ mm}$$

$\bar{Y}_f$ se determina por la deformación real:

$$\epsilon = \ln \frac{25}{22} = 0.128$$

La fuerza de laminado se determina por la ecuación 19.10:

$$F = 175.7(300)(27.4) = 1\,444\,786 \text{ N}$$

El momento de torsión requerido para mover cada rodillo está dado por la ecuación 19.12:

$$T = 0.5(1\,444\,786)(27.4)(10^{-3}) = 19\,786 \text{ N-m}$$

y la potencia se obtiene de la ecuación 19.13:

$$P = 2\pi(50)(1\,444\,786)(27.4)(10^{-3}) = 12\,432\,086 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{min} = 207\,201 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{s}(\text{W})$$

Convirtiendo esto a caballos de fuerza (un caballo de fuerza = 745.7 W):

$$HP = \frac{207\,201}{745.7} = 278 \text{ hp}$$

En este ejemplo se puede observar que se requieren grandes fuerzas y potencias para el laminado. La inspección de las ecuaciones 19.10 y 19.13 indica que puede reducirse la fuerza y la potencia para laminar una tira de ancho y material dados, por cualquiera de los siguientes medios: 1) uso de laminado en caliente en lugar de laminado en frío para reducir la resistencia y el endurecimiento por deformación (K y n) del material de trabajo, 2) reducción del draft en cada paso, 3) utilización de un menor radio en el rodillo R para reducir la fuerza y 4) utilizando menor velocidad de laminación N para reducir la potencia.

19.1.2 Laminado de perfiles

En el laminado de perfiles, el material de trabajo se deforma para generar un contorno en la sección transversal. Los productos hechos por este procedimiento incluyen perfiles de construcción como vigas en I, en L y canales en U; rieles para vías de ferrocarril y barras redondas y cuadradas, así como varillas (véase la figura 19.2). El proceso se realiza pasando el material de trabajo a través de rodillos que tienen impreso el reverso de la forma deseada.

La mayoría de los principios que se aplican en el laminado plano son también aplicables al laminado de perfiles. Los rodillos formadores son más complicados; y el material inicial, de forma usualmente cuadrada, requiere una transformación gradual a través de varios rodillos para alcanzar la sección final. El diseño de la secuencia de las formas intermedias y los correspondientes rodillos se llama *diseño de pases de laminación*. Su meta es lograr una deformación uniforme a través de las secciones transversales de cada reducción. De otra forma, ciertas porciones de trabajo se reducen más que otras, causando una mayor elongación en estas secciones. La consecuencia de una reducción no uniforme puede ser torceduras y agrietamiento del producto laminado. Se utiliza rodillos horizontales y verticales para lograr una reducción consistente del material de trabajo.

19.1.3 Molinos laminadores

Se dispone de varias configuraciones de molinos de laminación que manejan una variedad de aplicaciones y problemas técnicos en los procesos de laminación. El molino de laminación básico consiste en dos rodillos opuestos y se denomina molino de laminación de *dos rodillos*, el cual se muestra en la figura 19.5a). Los rodillos en estos molinos tienen diámetros que van de 0.6 a 1.4 m (2.0 a 4.5 ft). La configuración de rodillos puede ser reversible o no reversible. En el *molino no reversible* los rodillos giran siempre en la misma dirección y el trabajo siempre pasa a través del mismo lado. El *molino reversible* permite la rotación de los rodillos en ambas direcciones, de manera que el trabajo puede pasar a través de cualquier dirección. Esto permite una serie de reducciones que se hacen a través del mismo juego de rodillos, pasando simplemente el trabajo varias veces desde direcciones opuestas. La desventaja de la configuración reversible es la cantidad significativa de movimiento angular debido a la rotación de grandes rodillos, y los problemas técnicos asociados a la reversibilidad de la dirección.

En la figura 19.5 se ilustran algunas configuraciones alternas. En la configuración de *tres rodillos*, figura 19.5b), hay tres rodillos en una columna vertical y la dirección de rotación de cada rodillo permanece sin cambio. Para lograr una serie de reducciones se puede pasar el material de trabajo en cualquier dirección, ya sea elevando o bajando la tira

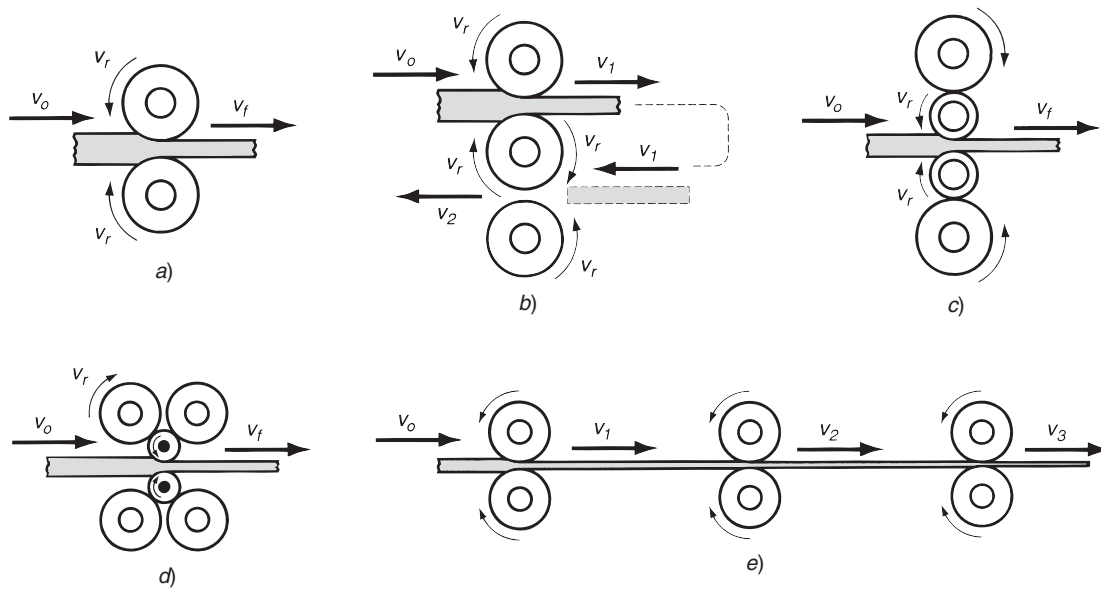


FIGURA 19.5 Varias configuraciones de molinos de laminación: a) dos rodillos, b) tres rodillos, c) cuatro rodillos, d) molino en conjunto y e) molino de rodillos en tándem.

después de cada paso. El equipo en un molino de tres rodillos se vuelve más complicado debido al mecanismo elevador que se necesita para elevar o bajar el material de trabajo.

Como indican las ecuaciones anteriores, se gana algunas ventajas al reducir el diámetro de los rodillos. La longitud de contacto entre los rodillos y el trabajo se reduce con un menor radio de los rodillos y esto conduce a fuerza más bajas, menor momento de torsión y menor potencia. En los molinos de **cuatro rodillos** se usan dos rodillos de diámetro menor para hacer contacto con el trabajo y dos rodillos detrás como respaldo, como se muestra en la figura 19.5c). Debido a las altas fuerzas de laminado, los rodillos menores podrían desviarse elásticamente con el paso de la laminación, si no fuera por los rodillos más grandes de respaldo que los soportan. Otra configuración que permite el uso de rodillos menores contra el trabajo es el **molino en conjunto o racimo**, figura 19.5d).

Para lograr altas velocidades de rendimiento en los productos estándar se usa frecuentemente un **molino de rodillos en tándem**. Esta configuración consiste en una serie de bastidores de rodillos, como se aprecia en la figura 19.5e). Aunque sólo se muestran tres bastidores en el diagrama, un molino laminador en tándem puede tener ocho o diez pares de rodillos, y cada uno realiza una reducción en el espesor o un refinamiento en la forma del material de trabajo que pasa entre ellos. A cada paso de laminación se incrementa la velocidad, haciendo significativo el problema de sincronizar las velocidades de los rodillos en cada etapa.

Los molinos en tándem modernos se utilizan con frecuencia en operaciones de colada continua (sección 7.2.2). Estas instalaciones logran un alto grado de continuidad en los procesos que se requieren para transformar las materias primas iniciales en productos finales. Las ventajas incluyen: eliminación de fosas de recalentado, reducción del espacio en las instalaciones y tiempos de manufactura más cortos. Estas ventajas técnicas se traducen en beneficios económicos para aquellos molinos que pueden realizar la colada continua y la laminación.

19.2 OTROS PROCESOS DE DEFORMACIÓN RELACIONADOS CON EL LAMINADO

Algunos otros procesos de deformación volumétrica usan rodillos para formar las piezas de trabajo; estas operaciones incluyen laminado de cuerdas, laminado de anillos, laminado de engranes y perforado de rodillos.

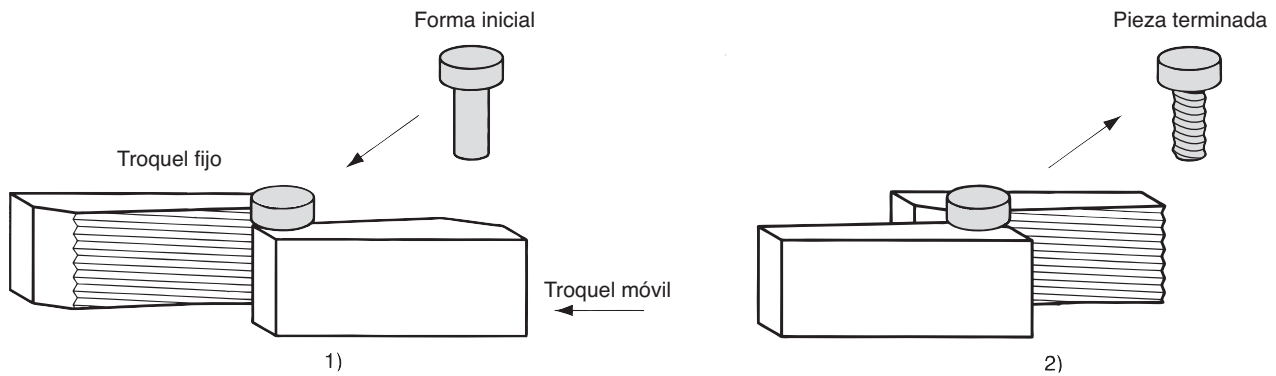


FIGURA 19.6 Laminado de cuerdas con troqueles planos: 1) inicio del ciclo y 2) fin del ciclo.

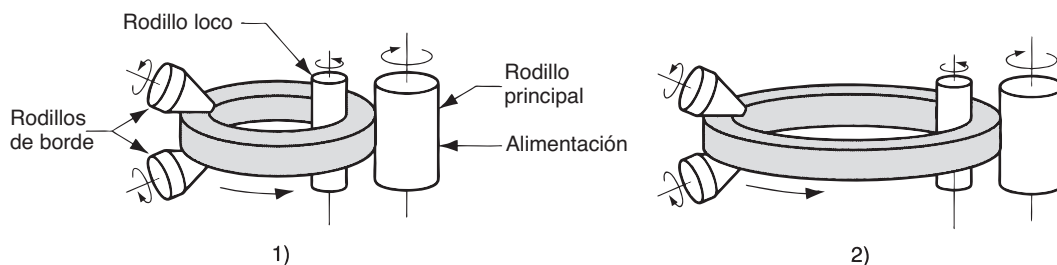
Laminado de cuerdas El laminado de cuerdas se usa para formar cuerdas en piezas cilíndricas mediante su laminación entre dos troqueles. Es el proceso comercial más importante para producción masiva de componentes con cuerdas externas (pernos y tornillos, por ejemplo). El proceso competidor es el maquinado de cuerdas (sección 22.1.2). La mayoría de las operaciones de laminado de cuerdas se realiza por trabajo en frío, utilizando máquinas laminadoras de cuerdas. Estas máquinas están equipadas con troqueles especiales que determinan el tamaño y forma de la cuerda; los troqueles son de dos tipos: 1) troqueles planos que se mueven alternadamente entre sí, como se ilustra en la figura 19.6, y 2) troqueles redondos, que giran relativamente entre sí para lograr la acción de laminado.

Las velocidades de producción en el laminado de cuerdas pueden ser muy altas; su capacidad alcanza hasta 8 piezas por segundo para pernos y tornillos pequeños. Pero la velocidad no es la única ventaja respecto al maquinado; existen otras como son: 1) mejor utilización del material, 2) cuerdas más fuertes debido al endurecimiento por trabajo, 3) superficies más lisas, 4) mejor resistencia a la fatiga debido a los esfuerzos por compresión que se introducen durante el laminado.

Laminado de anillos El laminado de anillos es un proceso de deformación que lamina las paredes gruesas de un anillo para obtener anillos de paredes más delgadas, pero de un diámetro mayor. La figura 19.7 ilustra el proceso antes y después. Conforme el anillo de paredes gruesas se comprime, el material se alarga, ocasionando que el diámetro del anillo se agrande. El laminado de anillos se aplica usualmente en procesos de trabajo en caliente para anillos grandes y en procesos de trabajo en frío para anillos pequeños.

Las aplicaciones de laminado de anillos incluyen collarines para cojinetes de balines y rodillos, llantas de acero para ruedas de ferrocarril y cinchos para tubos, recipientes a presión y máquinas rotatorias. Las paredes de los anillos no se limitan a secciones rectangulares; el proceso permite la laminación de formas más complejas. Las ventajas del laminado de anillos sobre otros métodos para fabricar las mismas piezas son: el ahorro de

FIGURA 19.7 Laminación de anillos que se usa para reducir el espesor e incrementar su diámetro: 1) inicio y 2) proceso terminado.



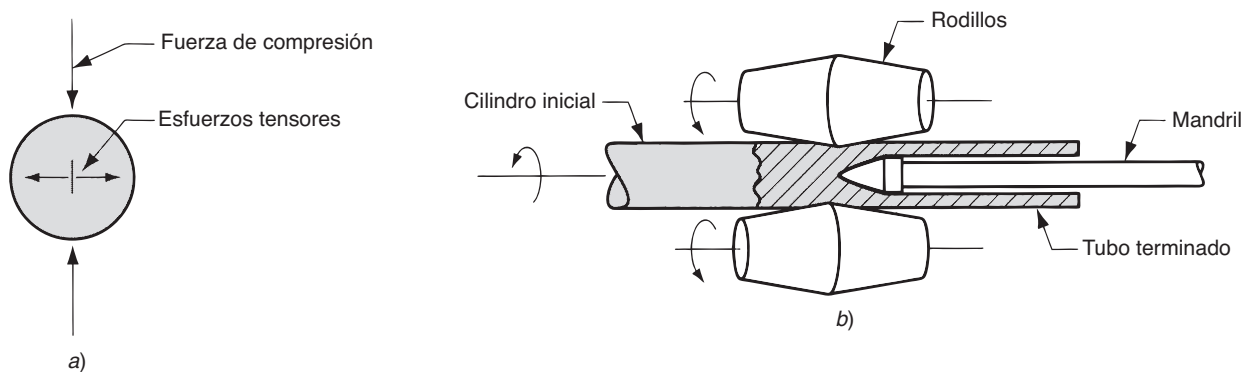


FIGURA 19.8 Perforación de rodillos: a) formación de esfuerzos internos y de la cavidad por compresión de la pieza cilíndrica y b) disposición del molino de laminación Mannesmann para producir tubo sin costura.

materias primas, la orientación ideal de los granos para la aplicación y el endurecimiento a través del trabajo en frío.

Laminado de engranes Éste es un proceso de formado en frío que produce ciertos engranes. La industria automotriz es un importante usuario de estos productos. La instalación para el laminado de engranes es similar al laminado de cuerdas, excepto porque las características de deformación de los cilindros o discos se orientan paralelamente a su eje (o a un ángulo en el caso de engranes helicoidales), en lugar de la espiral del laminado de cuerdas. Las ventajas del laminado de engranes, comparadas con el maquinado, son similares a las ventajas en el laminado de cuerdas: altas velocidades de producción, mejor resistencia a la fatiga y menos desperdicio de material.

Perforado de rodillos Es un proceso especializado de trabajo en caliente para hacer tubos sin costura de paredes gruesas. Utiliza dos rodillos opuestos y por tanto se agrupa entre los procesos de laminado. El proceso se basa en el principio de que al comprimir un sólido cilíndrico sobre su circunferencia, como en la figura 19.8a), se generan altos esfuerzos de tensión en su centro. Si la compresión es lo suficientemente alta, se forma una grieta interna. Este principio se aprovecha en el perforado de rodillos mediante la disposición que se muestra en la figura 19.8b). Los esfuerzos de compresión se aplican sobre el tocho sólido cilíndrico por dos rodillos, cuyos ejes se orientan en pequeños ángulos (alrededor de 6°) respecto al eje del tocho; de esta manera la rotación tiende a jalar el tocho a través de los rodillos. Un mandril se encarga de controlar el tamaño y acabado de la perforación creada por la acción. Se usan los términos **perforado rotatorio de tubos** y **proceso Mannesmann** para esta operación en la fabricación de tubos.

19.3 FORJADO

El **forjado** es un proceso de deformación en el cual se comprime el material de trabajo entre dos troqueles, usando impacto o presión gradual para formar la pieza. Es la operación más antigua para formado de metales y se remonta quizá al año 5000 a.C. (véase la nota histórica 19.2). En la actualidad el forjado es un proceso industrial importante mediante el cual se hace una variedad de componentes de alta resistencia para automóviles, vehículos aeroespaciales y otras aplicaciones. Estos componentes incluyen cigüeñales y bielas para motores de combustión interna, engranes, componentes estructurales para aviación y piezas para turbinas y motores de propulsión. Además, las industrias del acero y de otros

metales básicos usan el forjado para fijar la forma básica de grandes componentes que luego se maquinan para lograr su forma final y dimensiones definitivas.

Nota histórica 19.2 Forjado.

El proceso de forjado se remonta a los primeros registros escritos de la raza humana, hace cerca de 7 000 años. Hay evidencias de que el forjado era usado en el antiguo Egipto, Grecia, Persia, India, China y Japón para hacer armas, joyería y otros implementos. En esos tiempos, a los artesanos en el arte de la forja se les tenía en alta estima.

En la antigua Creta se usaban placas de piedra labrada como troqueles de impresión en el martillado del oro y la

plata, alrededor de 1600 a. C. Esto evolucionó a la fabricación de monedas por un proceso similar hacia el año 800 a. C. En Roma se usaron troqueles de impresión más complicados por el año 200 d. C. El negocio de la herrería permaneció relativamente sin cambios hasta que se introdujo el martinete de forja con pistón guiado a fines del siglo XVIII. Este desarrollo trajo la práctica de la forja a la era industrial.

El forjado se lleva a cabo de diversos modos. Una manera de clasificar las operaciones de forja es mediante la temperatura de trabajo. La mayoría de las operaciones de forja se realiza en caliente (por arriba o por debajo de la temperatura de cristalización), dada la deformación que demanda el proceso y la necesidad de reducir la resistencia e incrementar la ductilidad del metal de trabajo; sin embargo, el forjado en frío es muy común para ciertos productos. La ventaja del forjado en frío es que incrementa la resistencia que resulta del endurecimiento por deformación del componente.

En el forjado se aplica la presión por impacto o en forma gradual. La diferencia depende más del tipo de equipo usado que de las diferencias en la tecnología de los procesos. Una máquina de forjado que aplica cargas de impacto se llama **martinete de forja**, mientras que la que aplica presión gradual se llama **prensa de forjado**.

Otra diferencia entre las operaciones de forjado es el grado en que los troqueles restringen el flujo del metal de trabajo. Atendiendo a esta clasificación, hay tres tipos de operaciones de forjado: *a)* forjado en troquel abierto, *b)* forjado en troquel impresor y *c)* forjado sin rebaba. Los diagramas de estos tres tipos se presentan en la figura 19.9. En el **forjado en troquel abierto**, el trabajo se comprime entre dos troqueles planos (o casi planos), permitiendo que el metal fluya sin restricciones en una dirección lateral respecto a las superficies del troquel. En el **forjado en troquel impresor**, las superficies del troquel contienen una forma o impresión que se imparte al material de trabajo durante la compresión, restringiendo significativamente el flujo de metal. En este tipo de operación, una parte del metal fluye más allá del troquel impresor formando una **rebaba**, como se muestra en la figura. La rebaba es un exceso de metal que debe recortarse más tarde. En el **forjado sin rebaba**, el troquel restringe completamente el material de trabajo dentro de la cavidad y no se produce rebaba excedente. Es necesario controlar estrechamente el volumen de la pieza inicial para que iguale al volumen de la cavidad del troquel.

19.3.1 Forjado en troquel abierto

El caso más simple de forjado en troquel abierto consiste en comprimir una pieza de sección cilíndrica entre dos troqueles planos, muy semejante a una prueba de la compresión (sección 3.1.2). Esta operación de forjado conocida como **recalcado** o **forjado para recalcar**, reduce la altura del trabajo e incrementa su diámetro.

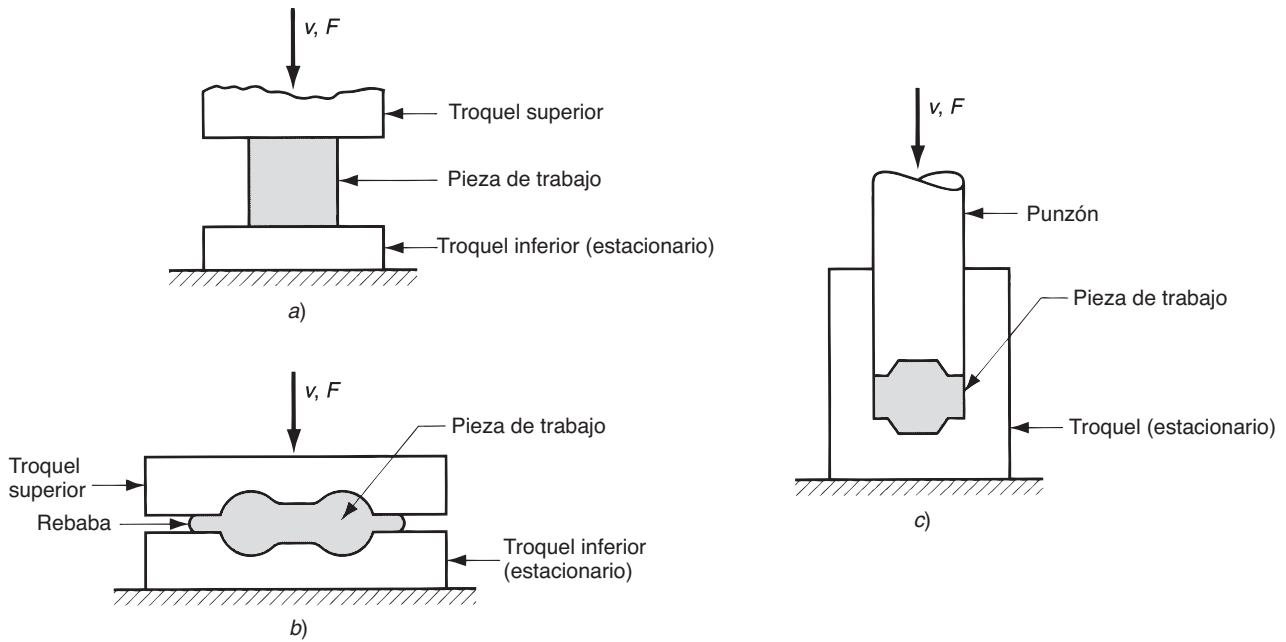


FIGURA 19.9 Tres tipos de operación de forja ilustrados por diagramas de sección transversal: a) forjado en troquel abierto, b) forjado en troquel impresor y c) forjado sin rebaba.

Análisis del forjado en troquel abierto Si el forjado en troquel abierto se lleva a cabo bajo condiciones ideales, sin fricción entre el trabajo y la superficie del troquel, ocurre una deformación homogénea y el flujo radial de material es uniforme a lo largo de su altura, como se representa en la figura 19.10. Bajo condiciones ideales, la deformación real que experimenta el material durante el proceso se puede determinar por:

$$\epsilon = \ln \frac{h_o}{h} \quad (19.14)$$

donde h_o = altura inicial de trabajo, mm (in); y h = altura de un punto intermedio en el proceso, mm (in). Al final de la carrera de compresión, h = su valor final h_f , y la deformación real alcanza su máximo valor.

FIGURA 19.10 Deformación homogénea de una pieza de trabajo cilíndrica bajo condiciones ideales en una operación de forjado en troquel abierto: 1) inicio del proceso con la pieza de trabajo a su longitud y diámetro originales, 2) compresión parcial y 3) tamaño final.

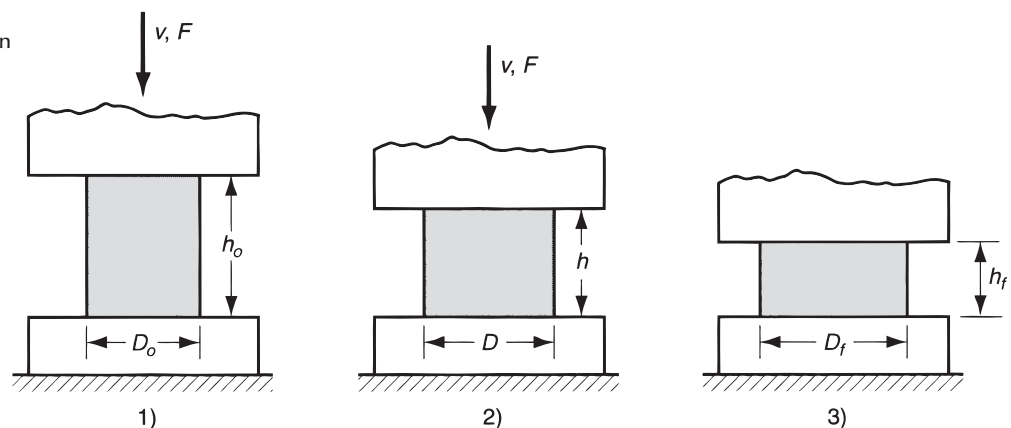
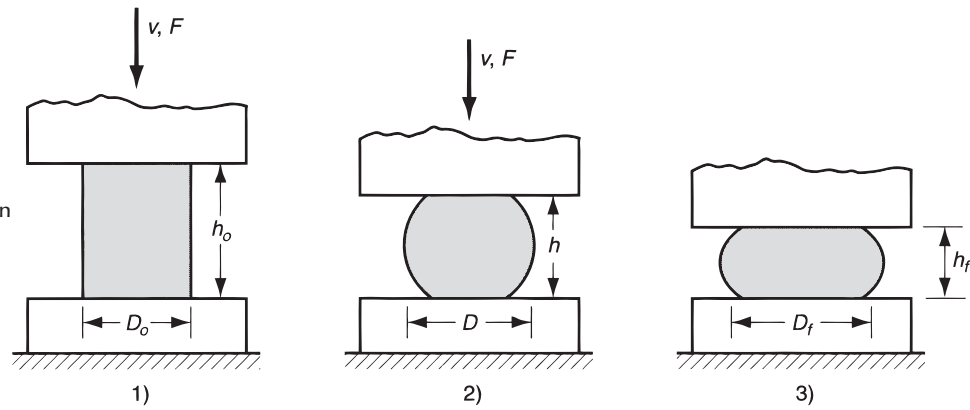


FIGURA 19.11 Deformación real de una pieza de trabajo cilíndrica en forjado en troquel abierto en la que se muestra un abarrilamiento pronunciado: 1) inicio del proceso, 2) deformación parcial y 3) forma final.



Se puede estimar la fuerza para ejecutar el recalcado. Se puede obtener la fuerza requerida para continuar la compresión a una altura dada h durante el proceso, multiplicando el área correspondiente de la sección transversal por el esfuerzo de fluencia:

$$F = Y_f A \quad (19.15)$$

donde F = fuerza, lb (N); A = área de la sección transversal de la pieza, mm^2 (in^2); Y_f = esfuerzo de fluencia correspondiente a la deformación dada por la ecuación 19.14, en MPa (lb/in^2). El área A se incrementa continuamente al reducirse la altura durante la operación. El esfuerzo de fluencia Y_f se incrementa también como resultado del endurecimiento por trabajo, excepto cuando el metal es perfectamente plástico (por ejemplo, trabajo en caliente). En este caso, el exponente de endurecimiento por deformación $n = 0$, y el esfuerzo de fluencia Y_f iguala a la resistencia de fluencia del metal Y . La fuerza alcanza un valor máximo al final de la carrera de forjado, donde el área y el esfuerzo de fluencia llegan a su valor más alto.

Una operación real de recalcado no ocurre exactamente como se muestra en la figura 19.10, debido a que la fricción se opone al flujo de metal en la superficie de los troqueles. Esto crea un efecto de abultamiento en forma de barril, llamado abarrilamiento, que se muestra en la figura 19.11. Cuando se realiza un trabajo en caliente con troqueles fríos, el abarrilamiento es más pronunciado. Esto se debe a un coeficiente de fricción más alto, típico del trabajo en caliente, y a la transferencia de calor en la superficie del troquel y sus cercanías, lo cual enfría el metal y aumenta su resistencia a la deformación. El metal más caliente se encuentra en medio de la pieza y fluye más fácilmente que el material más frío de los extremos. El efecto se acentúa al aumentar la relación entre el diámetro y la altura de la pieza, debido a la mayor área de contacto en la interfaz troquel-trabajo.

Todos estos factores originan que la fuerza de recalcado sea más grande que la pronosticada por la ecuación 19.15. Se puede aplicar un factor de forma a la ecuación 19.15 para aproximar los efectos del cociente D/h y la fricción:

$$F = K_f Y_f A \quad (19.16)$$

donde F , Y_f y A tienen las mismas definiciones que en la ecuación anterior; y K_f es el factor de forma del forjado, definido como:

$$K_f = 1 + \frac{0.4\mu D}{h} \quad (19.17)$$

donde μ = coeficiente de fricción; D = diámetro de la pieza de trabajo o cualquier dimensión que represente la longitud de contacto con la superficie de troquel, mm (in); y h = altura de la pieza, mm (in).

EJEMPLO 19.2 Forjado en troquel abierto

Una pieza de trabajo cilíndrica se sujeta a una operación de forjado para recalcar en frío. La pieza inicial tiene 75 mm de altura y 50 mm de diámetro. En la operación, su altura se

reduce a 36 mm. El material de trabajo tiene una curva de fluencia definida por $K = 350$ MPa y $n = 0.17$. Suponga un coeficiente de fricción de 0.1. Determine la fuerza conforme empieza el proceso, a alturas intermedias de 62 mm, 49 mm y a la altura final de 36 mm.

Solución: Volumen de la pieza de trabajo $V = 75\pi(50^2/4) = 147\,262\text{ mm}^3$. En el momento en que hace contacto con el troquel superior, $h = 75$ mm y la fuerza $F = 0$. Al principio de la fluencia, h es ligeramente menor que 75 mm, y se supone que la deformación $= 0.002$, en la cual el esfuerzo de fluencia es:

$$Y_f = K\epsilon^n = 350(0.002)^{0.17} = \text{MPa}$$

El diámetro es todavía aproximadamente $D = 50$ mm, y el área $A = \pi(50^2/4) = 1\,963.5\text{ mm}^2$. Para estas condiciones el factor de ajuste K_f se calcula como

$$K_f = 1 + \frac{0.4(0.1)(50)}{75} = 1.027$$

La fuerza de forjado es

$$F = 1.027(121.7)(1\,963.5) = 245\,410\text{ MPa}$$

A una $h = 62$ mm,

$$\epsilon = \ln \frac{75}{62} = \ln(1.21) = 0.1904$$

$$Y_f = 3\,500(0.1904)^{0.17} = 264.0\text{ MPa}$$

Si se supone un volumen constante y no se toma en cuenta el abarrilamiento,

$$A = 147\,262 / 62 = 2\,375.2\text{ mm}^2 \text{ y } D = 55.0\text{ mm}$$

$$K_f = 1 + \frac{0.4(0.1)(55)}{62} = 1.035$$

$$F = 1.035(264)(2\,375.2) = 649.303\text{ N}$$

De igual manera, a una $h = 49$ mm, $F = 995.642\text{ N}$. Y a $h = 36$ mm, $F = 1\,467.422\text{ N}$. La curva carga versus carrera de la figura 19.12 se construyó con los valores de este ejemplo. ■

Práctica del forjado en troquel abierto El forjado caliente en troquel abierto es un proceso industrial importante. Las formas generadas por operaciones en troquel abierto son simples, como flechas, discos y anillos. Los troqueles en algunas aplicaciones tienen superficies con ligeros contornos que ayudan a formar el material de trabajo. Éste, además, debe manipularse frecuentemente (girándolo en cada paso, por ejemplo) para efectuar los cambios de forma requeridos. La habilidad del operador es un factor importante para el éxito de estas operaciones. Un ejemplo de forjado en troquel abierto en la industria del acero es el formado de grandes lingotes cuadrados para convertirlos en secciones redondas. Las operaciones de forja en troquel abierto producen formas rudimentarias que necesitan operaciones posteriores para refinar las piezas a sus dimensiones y forma final. Una contribución importante del forjado en caliente en troquel abierto es la creación de un flujo de granos y de una estructura metalúrgica favorable en el metal.

Las operaciones clasificadas en la categoría de troquel abierto son operaciones relacionadas y pueden realizarse con troqueles convexos, con troqueles cóncavos y por secciones, como se ilustra en la figura 19.13. El **forjado con troqueles convexos (fullering)** es una operación de forja que se utiliza para reducir la sección transversal y redistribuir el metal en una pieza de trabajo, como preparación para operaciones posteriores de formado con forja. Se realiza con troqueles de superficies convexas. Las cavidades del troquel para el forjado con troqueles convexos se diseñan frecuentemente con múltiples cavidades de impresión, de manera que la barra inicial pueda formarse toscamente antes del formado

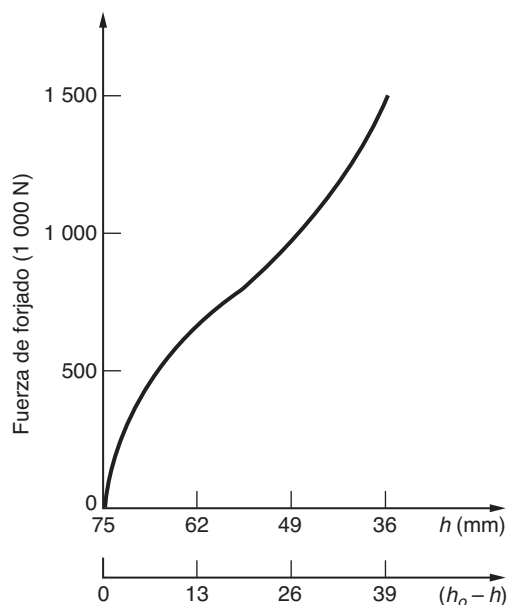


FIGURA 19.12 Fuerza de recalcado en función de la altura h y de la reducción de altura $(h_0 - h)$. A esta gráfica se le llama algunas veces curva carga-colada.

final. El **forjado con troqueles cóncavos** es similar al anterior, excepto porque los troqueles tienen superficies cóncavas.

Una operación de **forjado por secciones** consiste en una secuencia de compresiones forjadas a lo largo de una pieza de trabajo para reducir su sección transversal e incrementar su longitud. Se usa en la industria siderúrgica para producir lupias y planchas a partir de lingotes fundidos; en la operación se utilizan troqueles abiertos con superficies planas o con un ligero contorno. Con frecuencia se usa el término **forjado incremental** para este proceso.

19.3.2 Forjado con troquel impresor

El **forjado con troquel impresor**, llamado algunas veces **forjado en troquel cerrado**, se realiza con troquel que tiene la forma inversa de la requerida para la pieza. Este proceso se ilustra en una secuencia de tres pasos en la figura 19.14. La pieza de trabajo inicial se muestra como una pieza cilíndrica similar a la de las operaciones previas en troquel abierto. Al cerrarse el troquel y llegar a su posición final, el metal fluye más allá de la cavidad del troquel y forma una rebaba en la pequeña abertura entre las placas del troquel. Aunque la rebaba se debe recortar después, tiene realmente una función importante en el forjado por impresión, ya que cuando ésta empieza a formarse en el hueco del troquel, la fricción se opone a que el metal siga fluyendo hacia la abertura, y de esta manera fuerza al material de trabajo a permanecer en la cavidad. En el forjado en caliente, la restricción del flujo de metal es mayor debido a que la rebaba delgada se enfría rápidamente contra las placas del troquel, incrementando la resistencia a la deformación. La restricción del flujo de metal en la abertura hace que las presiones de compresión se incrementen significativamente, forzando al material a llenar los detalles algunas veces intrincados de la cavidad del troquel; con esto se obtiene un producto de alta calidad.

Con frecuencia se requieren varios pasos de formado en el forjado con troquel impresor para transformar la forma en blanco inicial en la forma final deseada. Para cada paso se necesitan cavidades separadas. Los pasos iniciales se diseñan para redistribuir el metal en la pieza de trabajo y conseguir así una deformación uniforme y la estructura metálica requerida en las etapas subsecuentes. Los últimos pasos le dan el acabado a la pieza final. Además, cuando se usa martinete, se pueden requerir varios golpes de martillo para

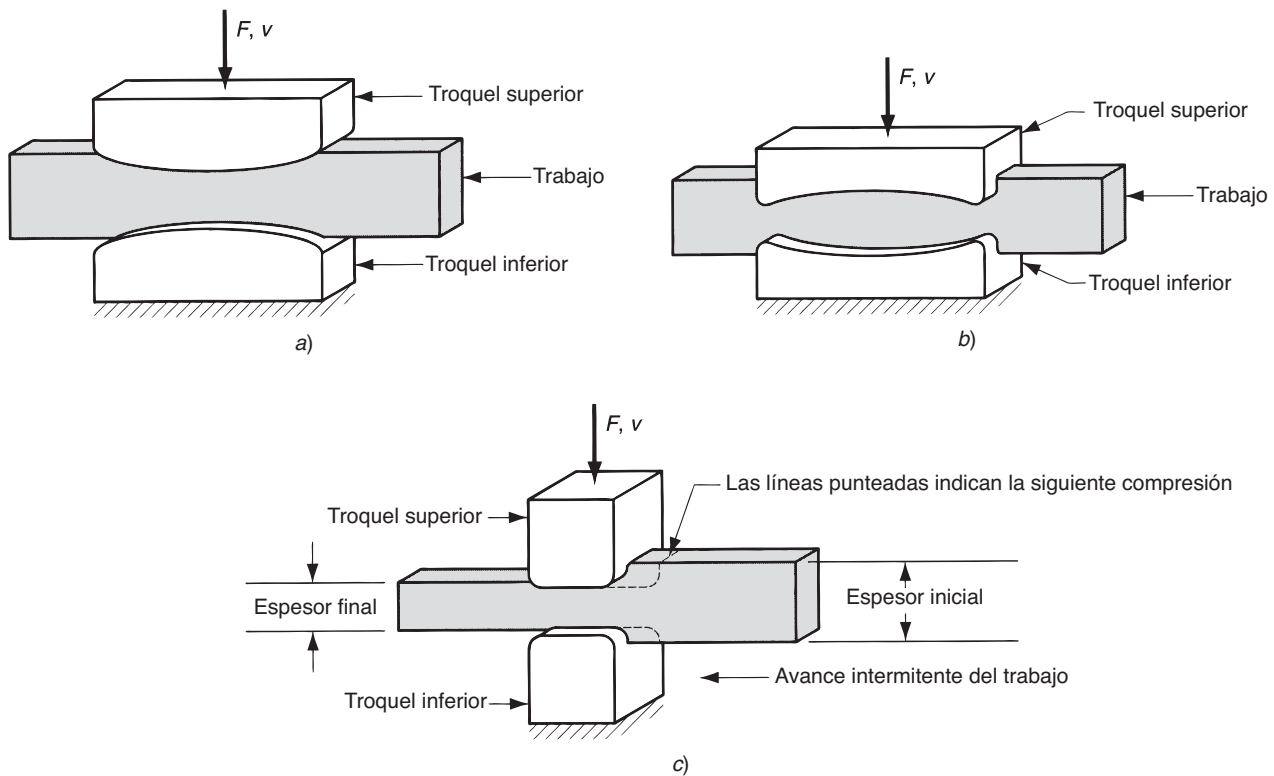


FIGURA 19.13 Varias operaciones de forjado en troquel abierto: a) con troqueles convexos, b) con troqueles cóncavos y c) por secciones.

cada paso. Cuando el forjado con martinete se hace a mano, como sucede a menudo, se requiere considerable habilidad del operador para lograr resultados consistentes en condiciones adversas.

Debido a la formación de rebaba en el forjado con troquel impresor y a las formas más complejas de las piezas hechas con estos troqueles, las fuerzas en este proceso son considerablemente más grandes y más difíciles de analizar que en el forjado en troquel abierto. Con frecuencia se usan fórmulas y factores de diseño relativamente simples para estimar las fuerzas en el forjado con troquel impresor. La fórmula de la fuerza es la misma

FIGURA 19.14 Secuencia en el forjado con troquel impresor: 1) inmediatamente antes del contacto inicial con la pieza de trabajo en bruto, 2) compresión parcial y 3) cerradura final de los troqueles, ocasionando la formación de rebaba entre las placas del troquel.

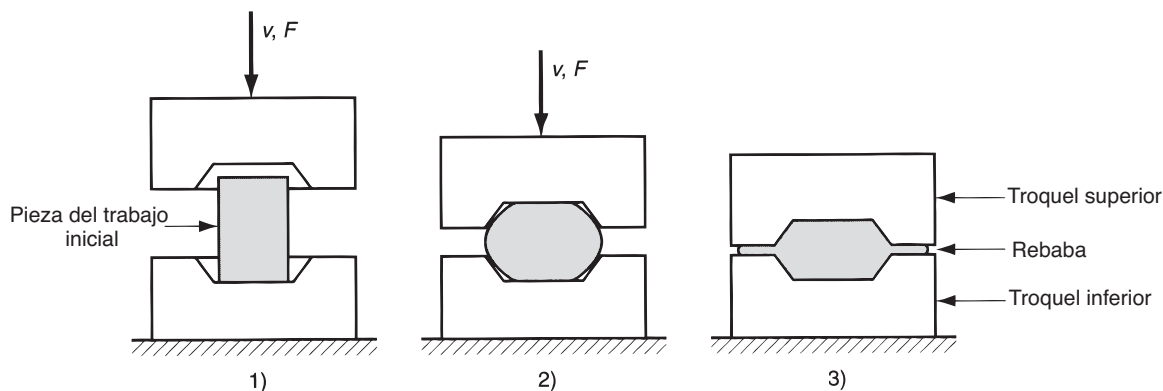


TABLA 19.1 Valores típicos de K_f para varias formas de la pieza en forjado con troquel impresor y en forjado sin rebabas.

Forma de la pieza:	K_f	Forma de la pieza:	K_f
Forjado con troquel impresor		Forjado sin rebaba:	
Formas simples con rebaba	6.0	Acuñado (superficies superior e inferior)	6.0
Formas complejas con rebaba	8.0	Formas complejas	8.0
Formas muy complejas con rebaba	10.0		

de la ecuación 19.16 para el forjado en troquel abierto, pero su interpretación es ligeramente diferente:

$$F = K_f Y_f A \quad (19.18)$$

donde F = fuerza máxima en la operación, N (lb); A = área proyectada de la pieza, incluida la rebaba, mm^2 (in^2); Y_f = esfuerzo de fluencia del material, MPa (lb/in^2); y K_f = factor de forma del forjado. En el forjado en caliente, el valor apropiado de Y_f es la resistencia a la fluencia del metal a temperatura elevada. En otros casos, la selección del valor apropiado del esfuerzo de fluencia es difícil porque para las formas complejas la deformación varía a través de la pieza de trabajo. En la ecuación 19.18, K_f es un factor con el que se intenta tomar en cuenta el incremento de la fuerza requerida para forjar formas complejas. La tabla 19.1 muestra la escala de valores de K_f para diferentes formas de la pieza. Obviamente, el problema, al especificar el valor apropiado de K_f para una forma dada de trabajo, limita la precisión de la estimación de la fuerza.

La ecuación 19.18 se aplica a la fuerza máxima durante la operación, ya que ésta determinará la capacidad requerida de la prensa o martinete que se use en la operación. La fuerza máxima se alcanza al final de la carrera o golpe de forjado donde el área proyectada es más grande y la fricción es máxima.

El forjado con troquel impresor no tiene tolerancias estrechas de trabajo y frecuentemente se requiere el maquinado para lograr la precisión necesaria. El proceso de forjado genera la configuración geométrica básica de la pieza y el maquinado realiza los acabados de precisión que se requieren en algunas porciones de la pieza (por ejemplo, perforaciones, cuerdas y superficies que deben coincidir con otros componentes). Las ventajas del forjado sobre el maquinado completo de la pieza son: velocidades de producción más altas, conservación del metal, mayor resistencia y orientación más favorable de los granos de metal. En la figura 19.15 se ilustra una comparación del flujo granular en el forjado y en el maquinado.

Las mejoras en la tecnología del forjado con troquel impresor han tenido como resultado la capacidad de producir forjados con secciones más delgadas, formas más complejas, reducción drástica de los requerimientos de ahusamiento en los troqueles, tolerancias más estrechas y la virtual eliminación de tolerancias al maquinado. Los procesos de forjado con estas características se conocen como **forjado de precisión**. Los metales más comunes que se usan en el forjado de precisión son el aluminio y el titanio. En la figura 19.16 se muestra una comparación del forjado de precisión y el forjado convencional con troquel impresor. Note que el forjado de precisión en este ejemplo no elimina las rebabas, aunque sí las reduce. Algunas operaciones de forjado de precisión se realizan sin producir rebaba. El forjado de precisión se clasifica propiamente como un proceso de **forma neta** o **casi neta**, dependiendo de la necesidad del maquinado para acabar la forma de la pieza.

FIGURA 19.15 Comparación del flujo de granos metálicos en una pieza que es: a) forjada en caliente con acabado maquinado y b) completamente maquinada.

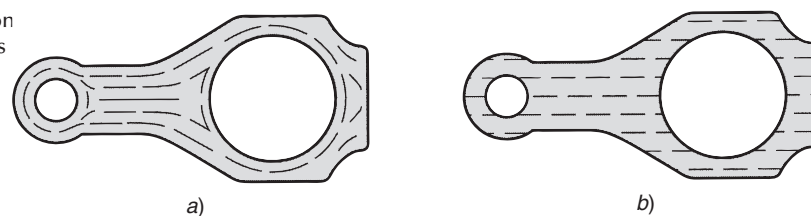
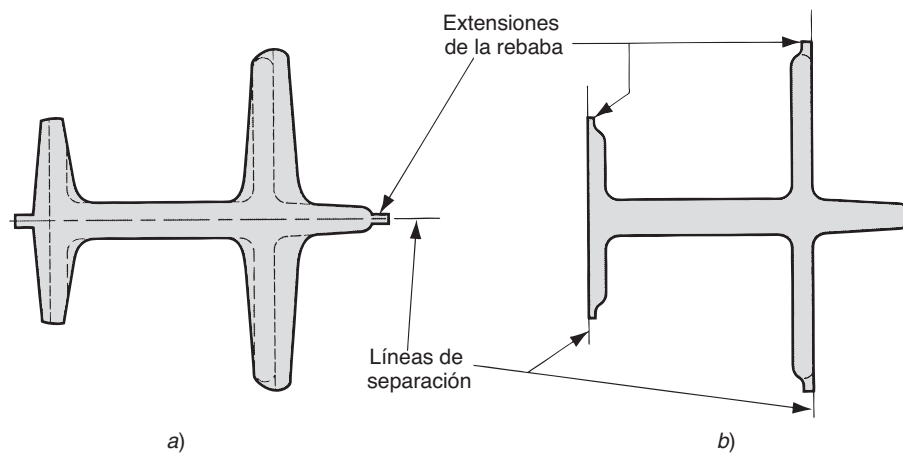


FIGURA 19.16 Secciones transversales de a) forjado convencional y b) forjado de precisión. Las líneas punteadas en a indican los requerimientos de maquinado posterior para convertir una pieza de forjado convencional en una forma equivalente a la de forjado de precisión. En ambos casos tiene que recortarse la rebaba.

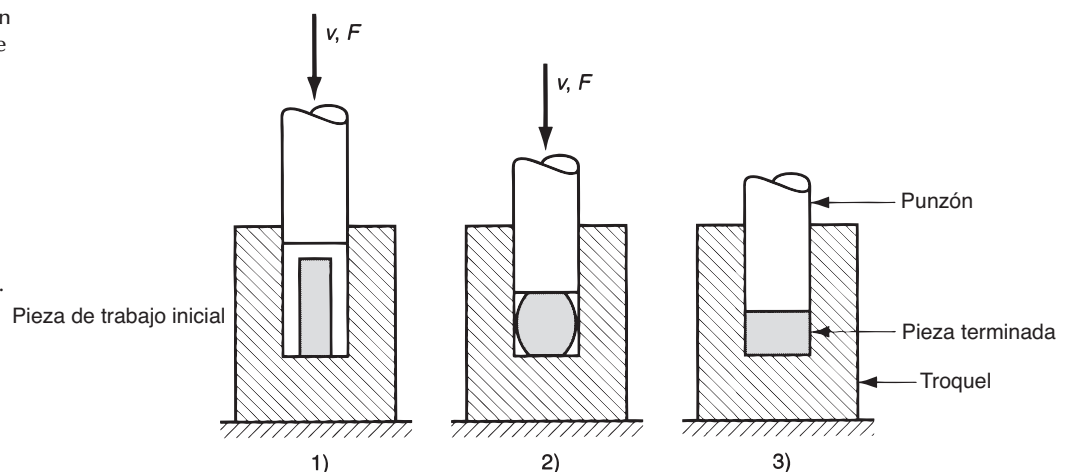


19.3.3 Forjado sin rebaba

En la terminología industrial, el forjado con troquel impresor se llama algunas veces forjado en troquel cerrado. Sin embargo, hay una distinción técnica entre el forjado con troquel impresor y forjado con troquel cerrado real. La distinción es que en el forjado con troquel impresor, la pieza de trabajo original queda contenida completamente dentro de la cavidad del troquel durante la compresión y no se forma rebaba. La secuencia del proceso se ilustra en la figura 19.17. Para identificar este proceso es apropiado el término **forjado sin rebaba**.

El forjado sin rebaba impone ciertos requerimientos sobre el control del proceso, más exigentes que el forjado con troquel impresor. Más importante es que el volumen de material de trabajo debe igualar al volumen de la cavidad del troquel dentro de muy estrechas tolerancias. Si la pieza en blanco inicial es demasiado grande, la presión excesiva puede causar daño al troquel o a la prensa. Si la pieza en blanco es demasiado pequeña, no se llenará la cavidad. Debido a este requerimiento especial, el proceso es más adecuado en la manufactura de piezas geométricas simples y simétricas, y para trabajar metales como el aluminio, el magnesio o sus aleaciones. El forjado sin rebaba se clasifica frecuentemente como un proceso de **forjado de precisión** [3].

FIGURA 19.17 Forjado sin rebaba: 1) inmediatamente antes del contacto inicial con la pieza de trabajo, 2) compresión parcial y 3) final de la carrera del punzón y cierre del troquel. Los símbolos v y F indican movimiento (v = velocidad) y fuerza aplicada, respectivamente.



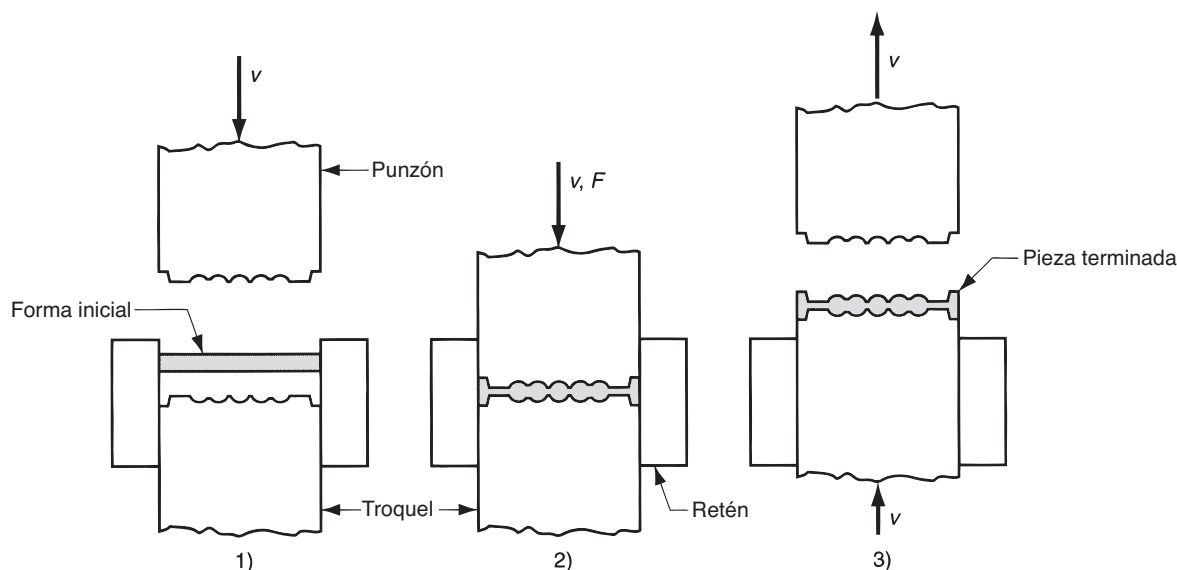


FIGURA 19.18 Operación de acuñado: 1) inicio del ciclo, 2) tiempo de compresión y 3) remoción de la pieza terminada.

Las fuerzas en el forjado sin rebaba alcanzan valores comparables a las del forjado con troquel impresor. Estas fuerzas se pueden estimar usando los mismos métodos para el forjado con troquel impresor: ecuación 19.18 y tabla 19.1.

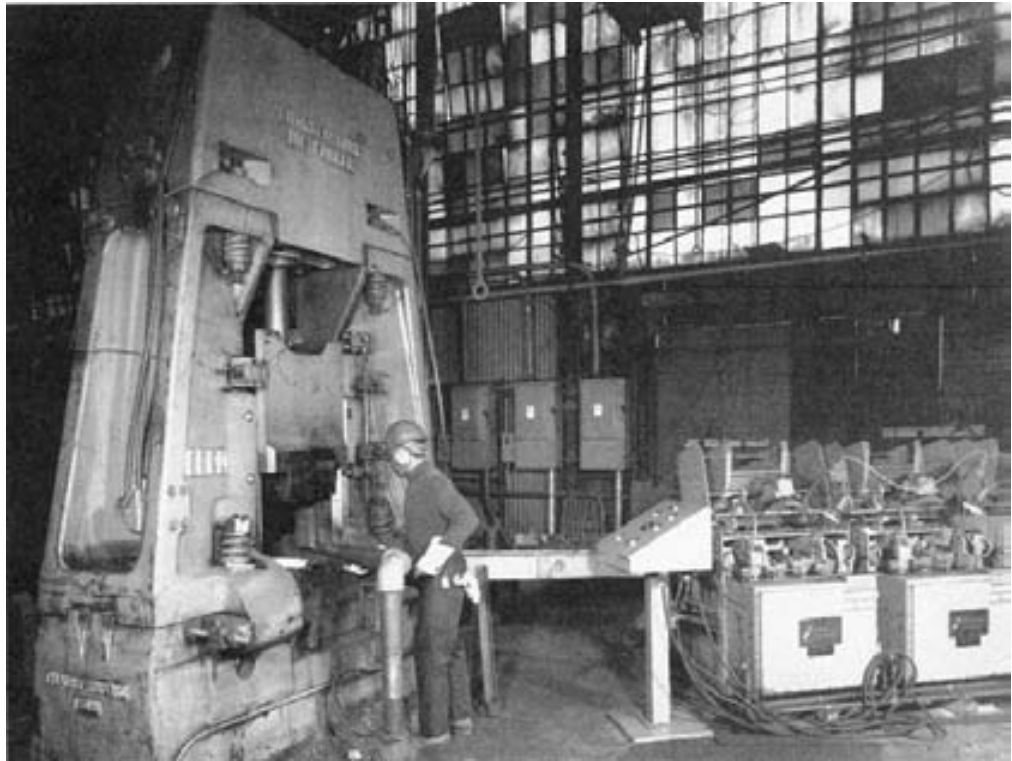
El **acuñado** es una aplicación especial del forjado sin rebaba mediante el cual se imprimen los finos detalles del troquel en la superficie superior y en el fondo de la pieza de trabajo. En el acuñado hay poco flujo de metal; no obstante, las presiones requeridas para reproducir los detalles superficiales de la cavidad del troquel son altas, como se indica por el valor K_f en la tabla 19.1. Una aplicación común del acuñado es desde luego la acuñación de monedas, que se ilustra en la figura 19.18. El proceso se usa también para dar acabados superficiales y de precisión dimensional a algunas piezas fabricadas por otras operaciones.

19.3.4 Troquel de forjado, martinets y prensas

El equipo que se usa en forjado consiste en máquinas de forja, que se clasifican en martinets, prensas, troqueles de forjado y herramientas especiales que se usan en estas máquinas; equipos auxiliares como hornos para calentar el trabajo, dispositivos mecánicos para cargar y descargar el material de trabajo y estaciones de recorte para recortar las rebabas del forjado con troquel impresor.

Martinets de forja Estos martinets funcionan aplicando una descarga por impacto contra el material de trabajo. Se usa frecuentemente el término ***martinete de caída libre*** para designar estas máquinas, por la forma de liberar la energía de impacto; véanse figuras 19.19 y 19.20. Los martinets de caída libre se usan más frecuentemente para forjado con troquel impresor. La parte superior del troquel de forjado se fija al pistón y la parte inferior se fija al yunque. En la operación, el trabajo se coloca en el troquel inferior, el pistón se eleva y luego se deja caer sobre la pieza de trabajo. Cuando la parte superior del troquel golpea el trabajo, la energía de impacto ocasiona que la pieza tome la forma de la cavidad del troquel. Se necesitan varios golpes de martillo para lograr el cambio deseado de forma. Los martinets de caída libre se pueden clasificar como martinets de caída libre por gravedad y de potencia. Los ***martinets de caída libre por gravedad*** generan su energía por el peso de un pistón que cae libremente. La fuerza del golpe se determina por

FIGURA 19.19 Martinete de forjado de caída libre alimentado por un transportador y unidades de calentamiento a la derecha de la foto (foto cortesía de Chambersburg Engineering Company).



la altura de la caída y el peso del pisón. Los ***martinetes de potencia*** aceleran el pisón con presión de aire o vapor. Una desventaja del martinete de caída libre es que una gran parte de la energía de impacto se transmite a través del yunque al piso del edificio.

Prensas de forjado Las prensas aplican una presión gradual, en lugar de impactos repentinos para realizar las operaciones de forja. Las prensas de forjado incluyen prensas mecánicas, prensas hidráulicas y prensas de tornillo. Las ***prensas mecánicas*** funcionan por medio de excéntricos, manivelas y juntas o articulaciones de bisagra que convierten el movimiento giratorio de un motor en movimientos de traslación del pisón. Estos mecanismos son muy similares a los que se usan en las prensas de estampado (sección 20.5.2). Las prensas mecánicas típicas alcanzan fuerzas muy altas en el fondo del recorrido de forjado. Las ***prensas hidráulicas*** usan un cilindro hidráulico para accionar el pisón. Las ***prensas de tornillo*** aplican la fuerza por medio de un tornillo que mueve al pisón vertical. Tanto

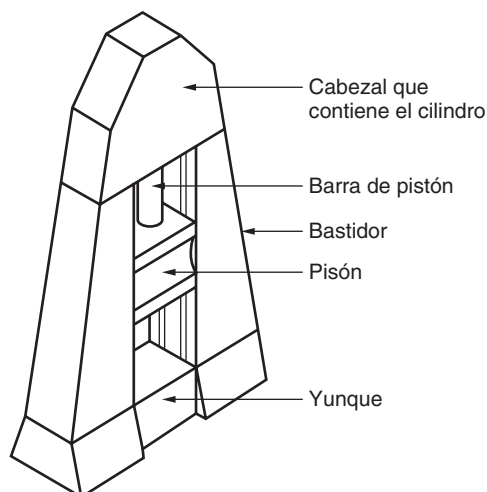


FIGURA 19.20 Detalles de un martinete de caída libre para forjado con troquel impresor.

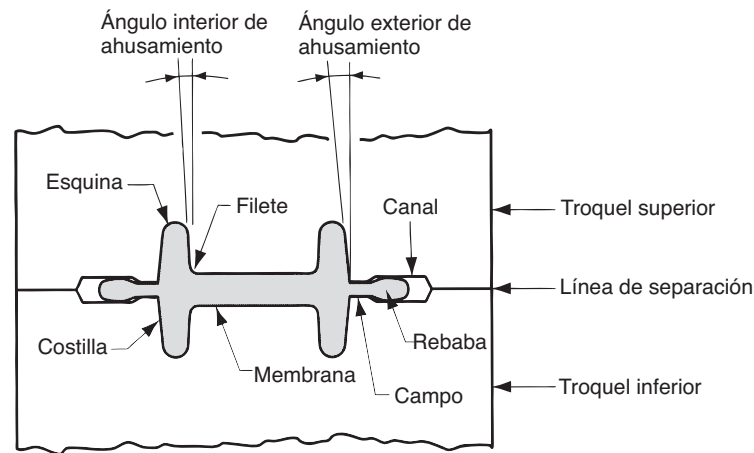


FIGURA 19.21
Terminología para un
troquel convencional en
forjado con troquel
impresor.

las prensas de tornillo como las hidráulicas operan a velocidades bajas del pistón o ariete y pueden suministrar una fuerza constante a través de la carrera. Por tanto, estas máquinas son apropiadas para las operaciones de forjado (y otras operaciones de formado) que requieren grandes carreras.

Troqueles de forjado Es importante el diseño apropiado de los troqueles para el éxito de la operación de forjado. Las piezas que se forjan deben diseñarse con base en el conocimiento de los principios y limitaciones de este proceso. El objetivo es describir parte de la terminología y algunos lineamientos que se usan en el diseño de troqueles para forja. El diseño de los troqueles abiertos es generalmente recto, ya que su forma es relativamente simple. Estos comentarios se aplican a los troqueles impresores y a los troqueles cerrados. La figura 19.21 define parte de la terminología en un troquel de impresión.

En la revisión de la siguiente terminología de los troqueles de forjado [3] se indican algunos de los principios y limitaciones en su diseño, que deben considerarse para el diseño de las piezas o para la selección de los procesos de manufactura:

- **Línea de separación.** La línea de separación o partición es el plano que divide la parte superior del troquel de la parte inferior. La llamada línea de rebaba en el forjado con troquel impresor es el plano donde se encuentran las dos mitades del troquel. Su mala selección afecta el flujo de los granos de la pieza, la carga requerida y la formación de rebaba.
- **Ahusamiento.** Es el grado de inclinación que requiere en los lados de la pieza para poder retirarla del troquel. El término se aplica también al ahusamiento en los lados de la cavidad del molde. Los ángulos típicos de salida son de 3° para el aluminio y el magnesio, y de 5° a 7° para piezas de acero. Los ángulos de ahusamiento para forjados de precisión son cercanos a cero.
- **Membranas y costillas.** Una membrana es una porción delgada del forjado que es paralela a la línea de separación, mientras que una costilla es una porción delgada perpendicular a la línea de separación. Estas características de la pieza producen dificultad en el flujo de metal al adelgazarse.
- **Filetes y radios de las esquinas.** Los filetes y las esquinas se ilustran en la figura 19.21. Los radios pequeños tienden a limitar el flujo de metal y a incrementar la resistencia en las superficies del troquel durante el forjado.
- **Rebaba.** La formación de rebaba juega un papel crítico en el forjado con troqueles de impresión porque causa una acumulación de la presión dentro del troquel que promueve el llenado de la cavidad. Esta acumulación de presión se controla diseñando un campo para la rebaba y un canal dentro del troquel, como se muestra en la figura 19.21. El campo determina el área superficial a lo largo del cual ocurre el flujo lateral del metal,

controlando así el incremento de la presión dentro del troquel. El canal permite que escape material en exceso y evita que la carga de forjado se eleve a valores extremos.

19.4 OTROS PROCESOS DE DEFORMACIÓN RELACIONADOS CON EL FORJADO

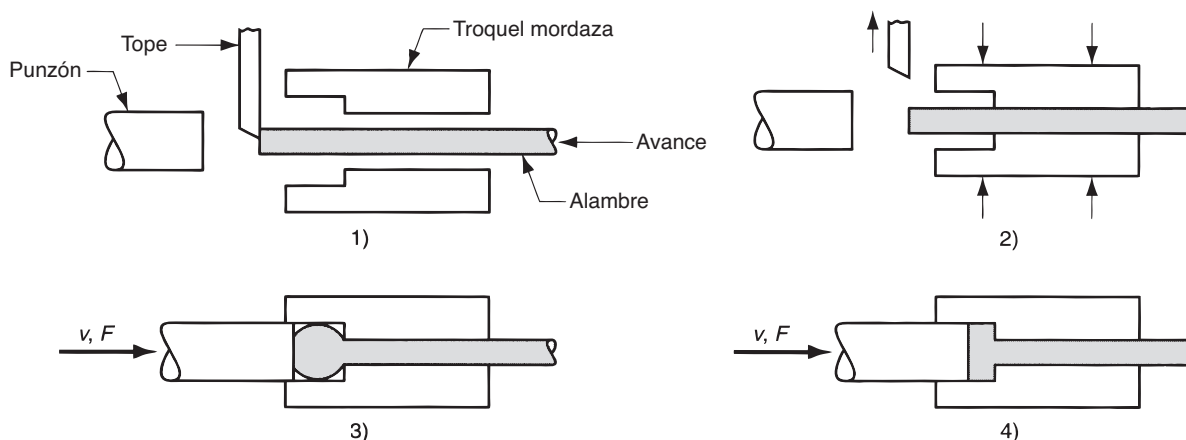
Además de las operaciones convencionales de forja descritas en las secciones anteriores, hay otras operaciones de formado de metal que se asocian muy cerca con el forjado.

Recalcado y encabezamiento El recalcado (también llamado *forjado de recalcado*) es una operación de deformación en la cual una parte o pieza de trabajo cilíndrica aumenta su diámetro y reduce su longitud. Esta operación se analizó en nuestra descripción del forjado en troquel abierto (sección 19.3.1). Sin embargo, es una operación industrial que puede también ejecutarse como un forjado en troquel cerrado como se observa en la figura 19.22.

El recalcado se usa ampliamente en la industria de los sujetadores para formar cabezas de clavos, pernos y productos similares de ferretería. En estas aplicaciones se emplea frecuentemente el término *encabezamiento* para denotar la operación. La figura 19.23 ilustra una variedad de aplicaciones de encabezamiento, indicando varias configuraciones posibles del troquel. Debido a este tipo de aplicaciones, se producen más piezas por recalcado que por cualquier otra operación de forjado. El recalcado se realiza como una operación de producción en masa, en frío, en tibio o en caliente, con máquinas especiales de recalcado por forja, llamadas formadoras o cabeceadoras. En general, estas máquinas se equipan con deslizaderas horizontales, en lugar de las verticales que se usan en los martinets y prensas convencionales. El material con que se alimentan estas máquinas son barras o alambres; se forman las cabezas con extremos de las barras y luego se corta la pieza a la longitud adecuada para hacer el artículo de ferretería deseado. Se usa el laminado de cuerdas (sección 19.2) para formar las piezas completas de pernos y tornillos.

Hay límites para la cantidad de deformación que se puede alcanzar en el recalcado, definidos usualmente como la longitud máxima del material a forjar. La longitud máxima que se puede recalcar en un golpe es tres veces el diámetro de la barra inicial. De otra manera, el metal se dobla o arruga en lugar de comprimirse para llenar adecuadamente la cavidad.

FIGURA 19.22 Una operación de recalcado para formar la cabeza de un perno u otro artículo similar. El ciclo consiste en: 1) el alambre se alimenta hasta el tope, 2) los troqueles mordaza se cierran apretando el material y el tope se retira, 3) el punzón avanza y 4) toca fondo para formar la cabeza.



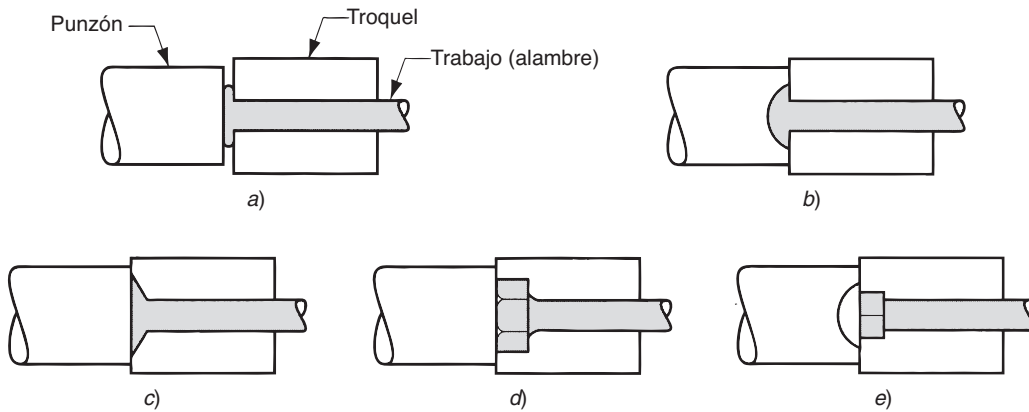
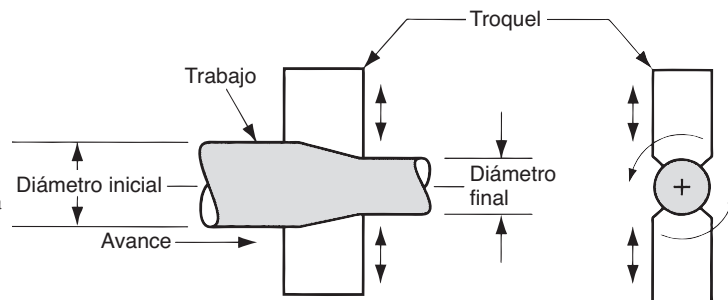


FIGURA 19.23 Ejemplos de formación de cabezas (forjado recalcado): a) cabeza de clavo mediante troqueles abiertos, b) cabeza redonda formada por el punzón, c) y d) cabezas formadas por el troquel y e) perno de carro formado por el troquel y el punzón.

Estampado (suajeado) con forja y forjado radial El estampado (o suajeado) y forjado radial son procesos de forjado que se usan para reducir el diámetro de un tubo o barra sólida. El estampado se ejecuta frecuentemente sobre el extremo de una pieza de trabajo para crear una sección ahusada. El proceso de *estampado*, que se muestra en la figura 19.24, se realiza por medio de troqueles rotatorios que golpean en una pieza de trabajo radialmente hacia dentro para ahusarla conforme la pieza avanza dentro de los troqueles. La figura 19.25 ilustra algunas de las formas y productos que se hacen por estampado. Se requiere algunas veces un carrete para controlar la forma y tamaño del diámetro interno de las piezas tubulares que se estampan. El *forjado radial* es similar al estampado en su acción contra la pieza y se usa para crear formas similares. La diferencia es que en el forjado radial los troqueles no giran alrededor de la pieza de trabajo; en su lugar, el trabajo es el que gira al avanzar dentro de los troqueles martillo.

Forjado con rodillos El forjado con rodillos es un proceso de deformación que se usa para reducir la sección transversal de una pieza de trabajo cilíndrica (o rectangular); ésta pasa a través de una serie de rodillos opuestos con canales que igualan la forma requerida por la pieza final. La operación típica se ilustra en la figura 19.26. El forjado con rodillos se clasifica generalmente como un proceso de forja, aun cuando utiliza rodillos. Los rodillos no giran de manera continua, sino sólo a través de una porción de revolución que corresponde a la deformación que requiere la pieza. Las piezas forjadas con rodillos son generalmente más fuertes y poseen una estructura granular favorable respecto a otros procesos competidores, como el maquinado, que puede usarse para producir estas mismas piezas.

FIGURA 19.24 Proceso de estampado (suajeado) para reducir material en barra sólida; los troqueles giran al martillar el trabajo. En el forjado radial el material gira mientras los troqueles permanecen en posición fija martillando el trabajo.



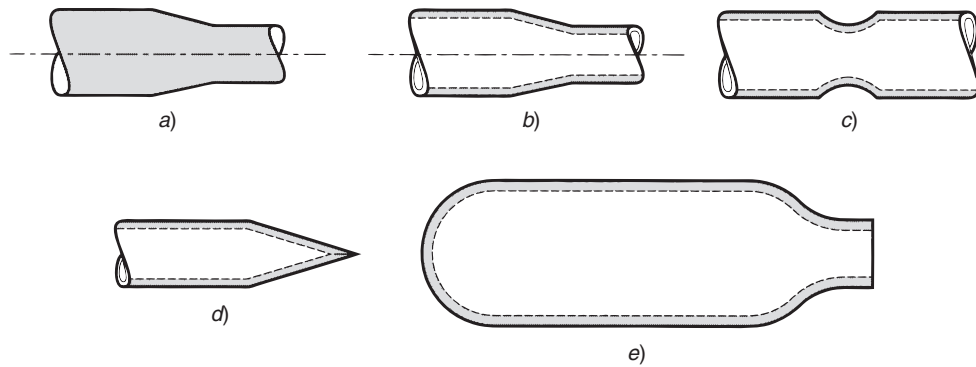
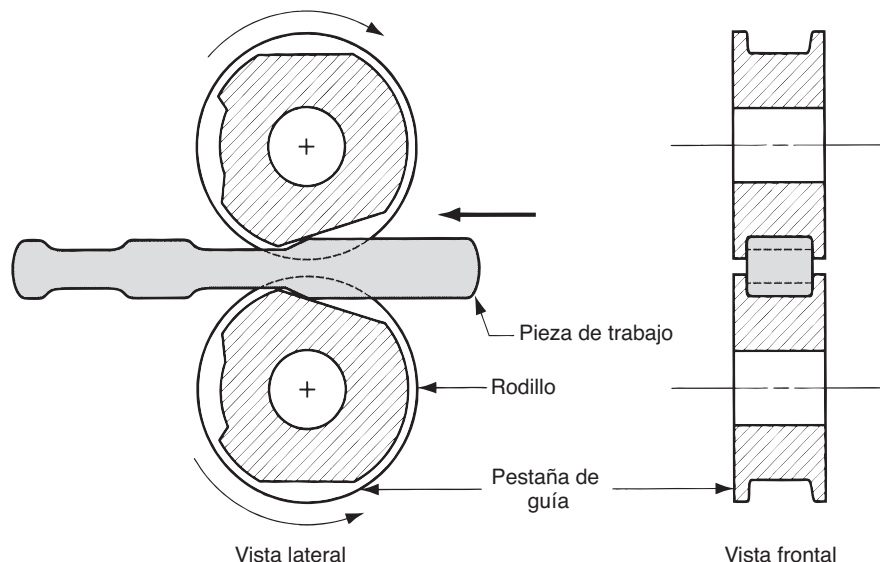


FIGURA 19.25 Ejemplos de piezas hechas por estampado: a) reducción de material sólido, b) ahusado de un tubo, c) estampado para formar un canal en un tubo, d) afilado de un tubo y e) estampado del cuello en un cilindro de gas.

Forjado orbital En este proceso, la deformación ocurre por medio de un troquel superior en forma de cono que presiona y gira simultáneamente sobre la pieza de trabajo. Como se ilustra en la figura 19.27, el material de trabajo se comprime sobre un troquel inferior que tiene una cavidad. Debido a que el eje del cono está inclinado, solamente una pequeña área de la superficie del trabajo se comprime en cualquier momento. Al revolver el troquel superior, el área bajo compresión también gira. Estas operaciones características del forjado orbital producen una reducción sustancial en la carga requerida de la prensa para alcanzar la deformación del trabajo.

Punzonado Como una operación de forjado, el **punzonado** es un proceso de deformación en el cual se prensa una forma endurecida de acero sobre un bloque de acero suave (u otro metal suave). El proceso se usa frecuentemente para hacer cavidades de moldes para moldeo de plásticos y fundición de troqueles, como se muestra en la figura 19.28. La forma de acero endurecido se llama **punzón o fresa**, y está maquinada con la forma de la pieza que se va a moldear. Para forzar la fresa dentro del bloque de metal suave se requiere una presión sustancial; esto se logra generalmente con una prensa hidráulica. La formación completa de la cavidad de la fresa en el bloque requiere frecuentemente varios pasos, como el fresado seguido del recocido para remover el endurecimiento por deformación. Cuando el bloque de material se ha deformado en cantidades significativas, como se muestra en la figura, se elimina el exceso por maquinado. La ventaja del punzonado

FIGURA 19.26 Forjado con rodillos.



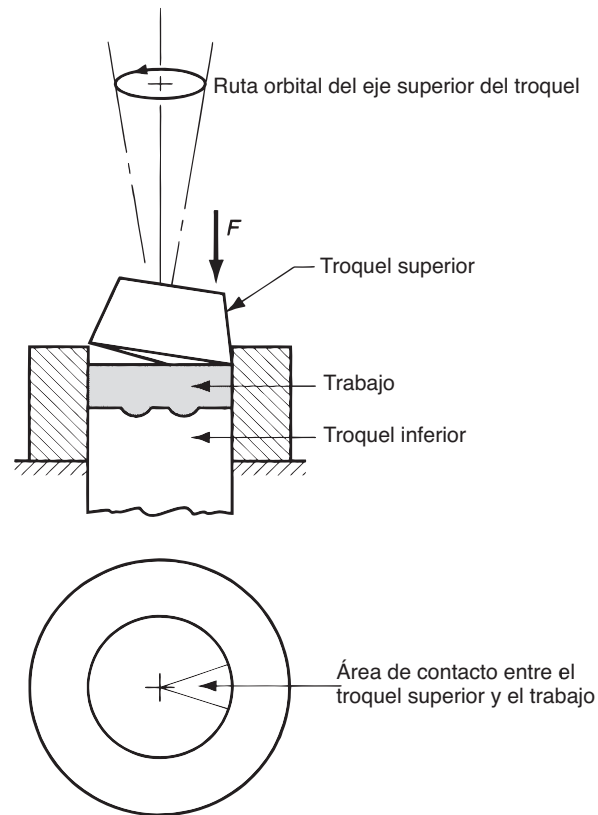
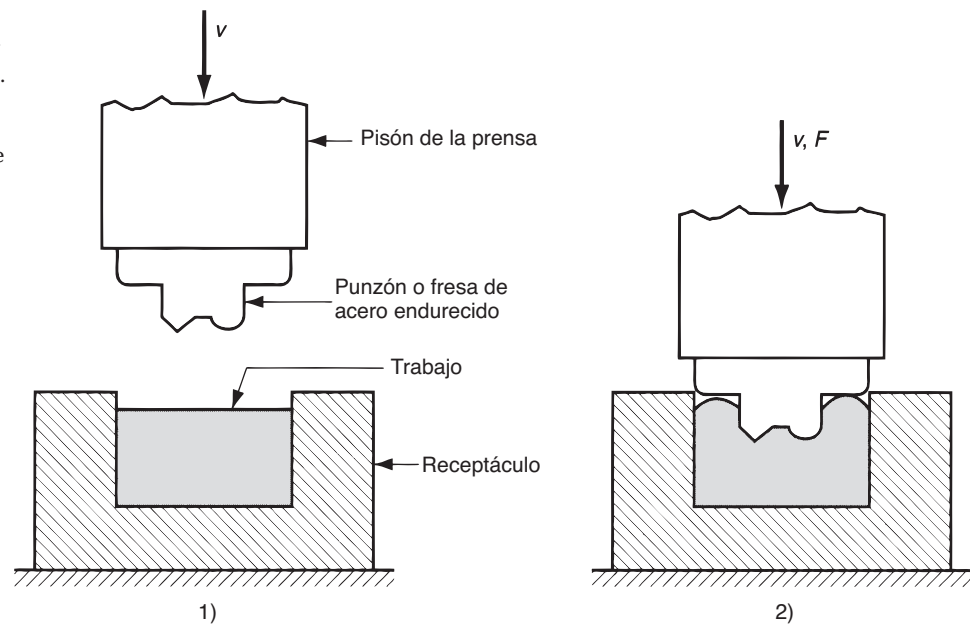


FIGURA 19.27 Forjado orbital. Al final del ciclo de deformación, el troquel inferior se eleva para expulsar la pieza.

FIGURA 19.28 Punzonado:
1) antes de la deformación y
2) al completarse el proceso.
Note que el material en
exceso formado por la
penetración de la fresa debe
removerse por maquinado.



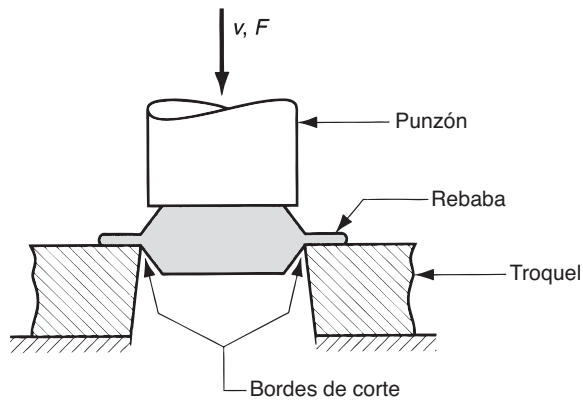


FIGURA 19.29 Operación de recorte (proceso de cizalla) para remover la rebaba después del forjado con troquel impresor.

en esta aplicación es que es más fácil maquinar la forma positiva que erosionar la cavidad negativa. Esta ventaja se multiplica en los casos donde se tienen que hacer cavidades múltiples en el bloque del troquel.

Forjado isotérmico y con troquel caliente El *forjado isotérmico* es un término que se aplica a operaciones de forjado caliente donde la pieza de trabajo se mantiene a temperaturas cercanas a su temperatura elevada inicial durante la deformación, usualmente mediante el calentamiento de los troqueles a esa misma temperatura elevada. Si se evita que la pieza de trabajo se enfríe al contacto con la superficie fría de los troqueles, como se hace en el forjado convencional, el metal fluye más fácilmente y la fuerza requerida para realizar el proceso se reduce. El forjado isotérmico es más costoso que el forjado convencional y se reserva para metales difíciles de forjar, como el titanio y las superaleaciones, y para piezas complejas. El proceso se lleva a cabo algunas veces al vacío para evitar la oxidación rápida del material del troquel. Similar al forjado isotérmico es el *forjado con troquel caliente*, en el cual se calientan los troqueles a una temperatura algo menor que la del metal de trabajo.

Recortado El recortado es una operación que se usa para remover la rebaba de la pieza de trabajo en el forjado con troquel impresor. El recortado en la mayoría de los casos se realiza por cizallamiento, como en la figura 19.29, en la cual un punzón fuerza el trabajo a través de un troquel de corte, cuyo contorno tiene el perfil de la pieza deseada. El recorte se hace usualmente mientras el trabajo está aún caliente; esto significa que se debe incluir una prensa de recortado separada por cada martinete o prensa. En los casos donde el trabajo podría dañarse por el proceso de corte, el recortado puede hacerse por medios alternos, como esmerilado o aserrado.

19.5 EXTRUSIÓN

La *extrusión* es un proceso de formado por compresión en el cual el metal de trabajo es forzado a fluir a través de la abertura de un troquel para darle forma a su sección transversal. El proceso puede parecerse a apretar un tubo de pasta de dientes. La extrusión data de 1800 (véase nota histórica 19.3). Las ventajas de los procesos modernos incluyen: 1) se puede extruir una gran variedad de formas, especialmente con extrusión en caliente; sin embargo, una limitación de la configuración geométrica es que la sección transversal debe ser la misma a lo largo de toda la pieza; 2) la estructura del grano y las propiedades de resistencia se mejoran con la extrusión en frío o en caliente; 3) son posibles tolerancias muy estrechas, en especial cuando se usa extrusión en frío; 4) en algunas operaciones de extrusión se genera poco o ningún material de desperdicio.

Nota histórica 19.3 Extrusión.

La extrusión como proceso industrial fue inventada alrededor de 1800 en Inglaterra, durante la Revolución Industrial, cuando aquel país iba a la vanguardia de las innovaciones tecnológicas. La invención consistió en la primera prensa hidráulica para extruir tubos de plomo. Un paso importante

hacia delante se dio en Alemania alrededor de 1890, cuando se construyó la primera prensa horizontal de extrusión para metales con puntos de fusión más altos que los del plomo. La característica que hizo posible esto fue el uso de un bloque simulado que separaba el pisón del tocho de trabajo.

19.5.1 Tipos de extrusión

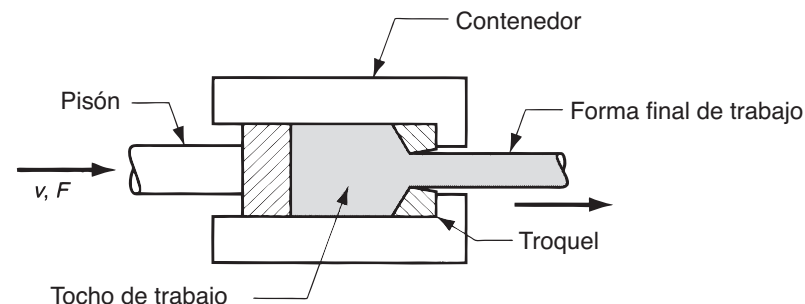
La extrusión se lleva a cabo de varias maneras. Una forma de clasificar las operaciones es atendiendo a su configuración física; se distinguen dos tipos principales: extrusión directa y extrusión indirecta. Otro criterio es la temperatura de trabajo; en frío, en tibio o en caliente. Por último, el proceso de extrusión puede ser continuo o discreto.

Extrusión directa versus extrusión indirecta La **extrusión directa** (también llamada **extrusión hacia delante**) se ilustra en la figura 19.30. Un tocho de metal se carga en un recipiente, y un pisón comprime el material forzándolo a fluir a través de una o más aberturas en un troquel al extremo opuesto del recipiente. Al aproximarse el pisón al troquel, una pequeña porción del tocho permanece y no puede forzarse a través de la abertura del troquel. Esta porción extra, llamada **tope o cabeza**, se separa del producto, cortándola justamente después de la salida del troquel.

Un problema en la extrusión directa es la gran fricción que existe entre la superficie del trabajo y las paredes del recipiente al forzar el deslizamiento del tocho hacia la abertura del troquel. Esta fricción ocasiona un incremento sustancial de la fuerza requerida en el pisón para la extrusión directa. En la extrusión en caliente este problema se agrava por la presencia de una capa de óxido en la superficie del tocho que puede ocasionar defectos en los productos extruidos. Para resolver este problema se usa un bloque simulado entre el pisón y el tocho de trabajo; el diámetro del bloque es ligeramente menor que el diámetro del tocho, de manera que en el recipiente queda un anillo estrecho de metal de trabajo (capas de óxido en su mayoría), dejando el producto final libre de óxidos.

En la extrusión directa se pueden hacer secciones huecas (por ejemplo, tubos) por medio del proceso que se ilustra en la figura 19.31. El tocho inicial se prepara con una perforación paralela a su eje. Esto permite el paso de un mandril que se fija en el bloque simulado. Al comprimir el tocho, se fuerza al material a fluir a través del claro entre el mandril y la abertura del troquel. La sección transversal resultante es tubular. Otras formas semihuecas se extruyen usualmente de esta misma manera.

FIGURA 19.30 Extrusión directa.



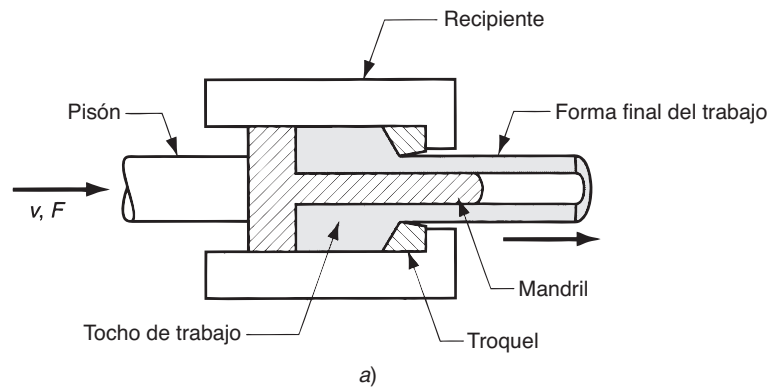
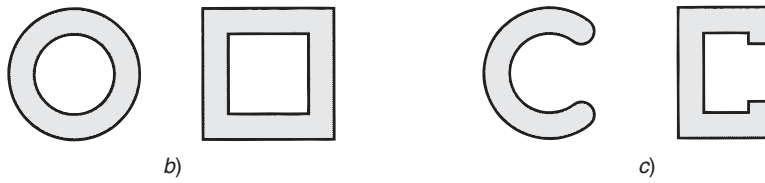


FIGURA 19.31 a) Extrusión directa para producir una sección transversal hueca o semihueca; b) hueca y c) semihueca.

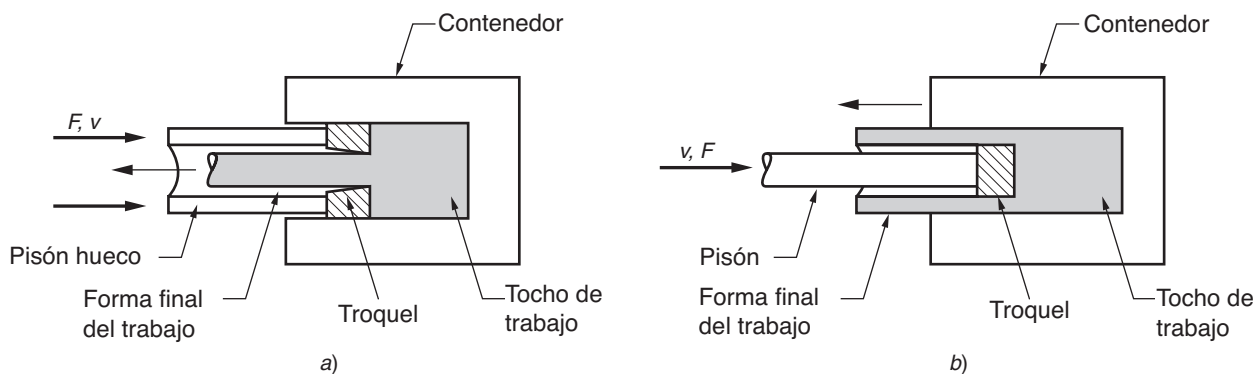


El tocho inicial en la extrusión directa es generalmente redondo, pero la forma final queda determinada por la abertura del troquel. Obviamente, la dimensión más grande de la abertura del troquel debe ser más pequeña que el diámetro del tocho.

En la **extrusión indirecta**, también llamada **extrusión hacia atrás** y **extrusión inversa**, figura 19.32a), el troquel está montado sobre el pisón, en lugar de estar en el extremo opuesto del recipiente. Al penetrar el pisón en el trabajo, fuerza al metal a fluir a través del claro en una dirección opuesta a la del pisón. Como el tocho no se mueve respecto al recipiente, no hay fricción en las paredes del recipiente. Por consiguiente, la fuerza del pisón es menor que en la extrusión directa. Las limitaciones de la extrusión en directo se deben a la menor rigidez del pisón hueco y a la dificultad de sostener el producto extruido tal como sale del troquel.

La extrusión indirecta puede producir secciones (tubulares) huecas, como las de la figura 19.32b). En este método el pisón presiona en el tocho, forzando al material a fluir alrededor del pisón y tomar una forma de copa. Hay limitaciones prácticas en la longitud

FIGURA 19.32 Extrusión indirecta para producir a) una sección transversal sólida y b) una sección transversal hueca.



de la pieza extruida que pueden resolverse por este método. El sostenimiento del pisón se convierte en un problema a medida que la longitud de trabajo aumenta.

Extrusión en frío versus extrusión en caliente La extrusión se puede realizar ya sea en frío o en caliente, dependiendo del metal de trabajo y de la magnitud de la deformación a que se sujete el material durante el proceso. Los metales típicos que se extruyen en caliente son: aluminio, cobre, magnesio, zinc, estaño y sus aleaciones. Estos mismos materiales se extruyen algunas veces en frío. Las aleaciones de acero se extruyen usualmente en caliente, aunque los grados más suaves y más dúctiles se extruyen algunas veces en frío (por ejemplo, aceros de bajo carbono y aceros inoxidable). El aluminio es probablemente el metal ideal para extrusión (en caliente o en frío); muchos productos comerciales de aluminio se hacen por este proceso (por ejemplo, perfiles estructurales y marcos para puertas y ventanas).

La **extrusión en caliente** involucra el calentamiento previo del tocho a una temperatura por encima de su temperatura de cristalización. Esto reduce la resistencia y aumenta la ductilidad del metal, permitiendo mayores reducciones de tamaño y el logro de formas más complejas con este proceso. Las ventajas adicionales incluyen reducción de la fuerza del pisón, mayor velocidad del mismo, y reducción de las características del flujo de grano en el producto final. Cuando el enfriamiento del tocho entra en contacto con las paredes del recipiente es un problema; para superarlo se usa algunas veces la **extrusión isotérmica**. La lubricación es un aspecto crítico de la extrusión en caliente de ciertos metales (por ejemplo, acero), y se han desarrollado lubricantes especiales que son efectivos bajo las condiciones agresivas de la extrusión en caliente. Algunas veces se usa el vidrio como lubricante de la extrusión en caliente; además de reducir la fricción, proporciona aislamiento térmico efectivo entre el tocho y el recipiente de extrusión.

En general, la **extrusión en frío** y la extrusión por debajo de su temperatura de cristalización se usan para producir piezas discretas, frecuentemente en forma terminada (o en forma casi terminada). El término **extrusión por impacto** se usa para indicar una extrusión fría de alta velocidad; este método se describe con más detalle en la sección 19.5.4. Algunas ventajas importantes de la extrusión en frío incluyen mayor resistencia debida al endurecimiento por deformación, tolerancias estrechas, acabados superficiales mejorados, ausencia de capas de óxidos y altas velocidades de producción. La extrusión en frío a temperatura ambiente elimina también la necesidad de calentar el tocho inicial.

Procesamiento continuo versus procesamiento discreto Un verdadero proceso continuo opera con estabilidad por un periodo indefinido de tiempo. Algunas operaciones de extrusión se aproximan a este ideal, produciendo secciones muy largas en un solo ciclo, pero estas operaciones quedan al fin limitadas por el tamaño del tocho que se puede cargar en el contenedor de extrusión. Estos procesos se describen más precisamente como operaciones semicontinuas. En casi todos los casos las secciones largas se cortan en longitudes más pequeñas en una operación posterior de corte o aserrado.

En una operación discreta de extrusión se produce una sola parte o pieza en cada ciclo de extrusión. La extrusión por impacto es un ejemplo de este caso de procesamiento discreto.

19.5.2 Análisis de la extrusión

La figura 19.33 se usará como referencia para la presente revisión de algunos parámetros de extrusión. En el diagrama se supone que tanto el tocho como la extrusión tienen una sección redonda transversal. Un parámetro importante es la **relación de extrusión** también llamada **relación de reducción**. La relación se define como:

$$r_x = \frac{A_o}{A_f} \quad (19.19)$$

donde r_x = relación de extrusión; A_o = área de la sección transversal del tocho inicial, mm² (in²); y A_f = área final de la sección recta de la pieza extruida, mm² (in²). La relación se

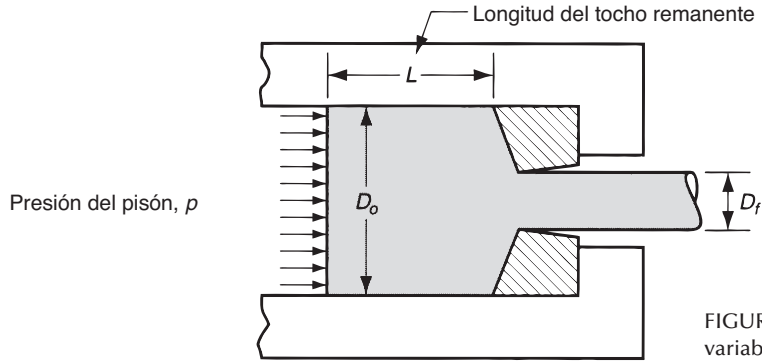


FIGURA 19.33 Presión y otras variables en la extrusión directa.

aplica tanto para la extrusión directa como para la indirecta. El valor de r_x se puede usar para determinar la deformación real de la extrusión, dado que la deformación ideal ocurre sin fricción y sin trabajo redundante:

$$\epsilon = \ln r_x = \ln \frac{A_o}{A_f} \quad (19.20)$$

La presión aplicada por el pistón para comprimir el tocho a través de la abertura del troquel se describe en la figura y se puede calcular bajo la suposición de deformación ideal (sin fricción ni trabajo redundante) como sigue:

$$p = \bar{Y}_f \ln r_x \quad (19.21)$$

donde $\bar{Y}_f$ = esfuerzo de fluencia promedio durante la deformación, MPa (lb/in²). Por conveniencia, se vuelve a expresar la ecuación 18.2 del capítulo anterior como:

$$\bar{Y}_f = \frac{K \epsilon^n}{1 + n}$$

De hecho, la extrusión es un proceso sin fricción, y las ecuaciones anteriores subestiman totalmente la deformación y la presión en una operación de extrusión. La fricción existe entre el troquel y el material de trabajo, a medida que el tocho se comprime y pasa a través de la abertura del troquel. En la extrusión directa, también existe la fricción entre la pared del contenedor y la superficie del tocho. La fricción incrementa la deformación experimentada por el metal. Por tanto, la presión real es mayor que la obtenida en la ecuación 19.21, que supone una extrusión sin fricción.

Se han sugerido varios métodos para calcular la deformación real y la presión del pistón asociada en la extrusión [1], [2], [4], [10], [11] y [18]. La siguiente ecuación empírica propuesta por Johnson [10] para estimar la deformación de extrusión ha ganado considerable reconocimiento:

$$\epsilon_x = a + b \ln r_x \quad (19.22)$$

donde ϵ_x = deformación de extrusión, a y b son constantes empíricas para el ángulo del troquel. Los valores típicos de estas constantes son $a = 0.8$ y $b = 1.2$ a 1.5 . Los valores de a y b tienden a aumentar cuando se incrementa el ángulo del troquel.

La presión del pistón para desempeñar la **extrusión indirecta** se puede estimar con base en la fórmula de Johnson para la deformación de extrusión como sigue:

$$p = \bar{Y}_f \epsilon_x \quad (19.23a)$$

donde $\bar{Y}_f$ se calcula con base en la deformación ideal de la ecuación 19.20, en lugar de la deformación de extrusión de la ecuación 19.22.

En la **extrusión directa**, el efecto de fricción entre las paredes del recipiente y el tocho ocasiona que la presión del pistón sea más grande que para la extrusión indirecta. Se

puede escribir la siguiente expresión que aísla la fuerza de fricción en el recipiente de la extrusión directa:

$$\frac{p_f \pi D_o^2}{4} = \mu p_c \pi D_o L$$

donde p_f = presión adicional requerida para superar la fricción, MPa (lb/in²); $\pi D_o^2/4$ = área de la sección transversal del tocho, mm² (in²); μ = coeficiente de fricción en la pared del recipiente; p_c = presión del tocho contra la pared del contenedor, MPa (lb/in²); y $\pi D_o L$ = área de la interfaz entre el tocho y la pared del recipiente, mm² (in²). El miembro derecho de la ecuación indica la fuerza de fricción entre tocho-contenedor, y el lado izquierdo da la fuerza adicional del pistón para superar dicha fricción. En el peor de los casos, ocurre la adherencia en la pared del recipiente, con lo cual el esfuerzo de fricción iguala la resistencia a la fluencia cortante del metal de trabajo:

$$\mu p_c \pi D_o L = Y_s \pi D_o L$$

donde Y_s = resistencia a la fluencia cortante, MPa (lb/in²). Si se supone que $Y_s = \bar{Y}_f/2$, entonces P_f se reduce a:

$$p_f = \bar{Y}_f \frac{2L}{D_o}$$

Con base en este razonamiento, se puede usar la siguiente fórmula para calcular la presión del pistón en la extrusión directa:

$$p = \bar{Y}_f \left(\epsilon_x + \frac{2L}{D_o} \right) \quad (19.23b)$$

donde el término $2L/D_o$ representa la presión adicional debida a la fricción en la interfaz contenedor-tocho, L es la porción de la longitud del tocho remanente para extruirse y D_o es el diámetro original del tocho. Note que p disminuye al reducirse la longitud remanente del tocho durante el proceso. En la figura 19.34 se presentan las curvas típicas de la presión de pistón en función de la carrera del pistón para la extrusión directa e indirecta. La ecuación 19.23b probablemente sobreestima la presión del pistón. Las presiones podrían ser menores que los valores calculados por esta ecuación con una buena lubricación.

La fuerza del pistón en la extrusión directa o indirecta es simplemente la presión p de las ecuaciones 19.23a o 19.23b, respectivamente, multiplicada por el área del tocho A_o :

$$F = p A_o \quad (19.24)$$

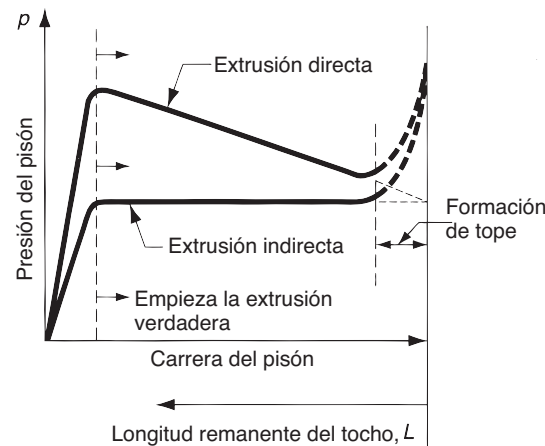


FIGURA 19.34 Gráficas típicas de la presión contra la carrera del pistón (y la longitud remanente del tocho) para extrusión directa e indirecta. Los valores más altos de la extrusión directa resultan de la fricción en las paredes del recipiente. La forma de la acumulación de la presión al inicio de la gráfica depende del ángulo del troquel (mayores ángulos del troquel significan acumulaciones de presión más pronunciadas). El incremento de presión al final de la carrera se relaciona con la formación del tope.

donde F = fuerza del pistón en extrusión, N (lb). El requerimiento de potencia para llevar a cabo la operación de extrusión es simplemente:

$$P = Fv \quad (19.25)$$

donde P = potencia, J/s(in-lb/min); F = fuerza del pistón, N (lb); v = velocidad del pistón, m/s (in/min).

EJEMPLO 19.3 Presiones de extrusión

Un tocho de 75 mm de largo y 25 mm de diámetro se extruye en una operación de extrusión directa con una relación $r_x = 4.0$. La extrusión tiene una sección redonda transversal. El ángulo del troquel (medio ángulo) = 90° . El metal de trabajo tiene un coeficiente de resistencia = 415 MPa, y un exponente de endurecimiento por deformación = 0.18. Use la fórmula de Johnson con $a = 0.8$ y $b = 1.5$ para estimar el esfuerzo de extrusión. Determine la presión aplicada al extremo del tocho cuando el pistón se mueve hacia delante.

Solución: Se examina la presión del pistón a las longitudes del tocho de $L = 75$ mm (valor inicial), $L = 50$ mm, $L = 25$ mm y $L = 0$. Se calcula la deformación real ideal, la deformación de extrusión usando la fórmula de Johnson y el esfuerzo de fluencia promedio:

$$\epsilon = \ln r_x = \ln 4.0 = 1.3863$$

$$\epsilon = 0.8 + 1.5(1.3863) = 2.8795$$

$$\bar{Y}_f = \frac{415(1.3863)^{0.18}}{1.18} = 373 \text{ MPa}$$

$L = 75$ mm: Con un ángulo del troquel de 90° , se supone que el metal del tocho será forzado a través de la abertura del troquel casi inmediatamente; entonces en el cálculo se supone que la presión máxima se alcanza a las longitudes del tocho de 75 mm. Para ángulos de troquel menores a 90° , la presión podría acumularse a un máximo, como en la figura 19.34, al comprimirse el tocho inicial dentro de la porción en forma de cono del troquel de extrusión. Usando la ecuación 19.23b:

$$p = 373 \left(2.8795 + 2 \frac{75}{25} \right) = 3\,312 \text{ MPa}$$

$$L = 50 \text{ mm: } p = 373 \left(2.8795 + 2 \frac{50}{25} \right) = 2\,566 \text{ MPa}$$

$$L = 25 \text{ mm: } p = 373 \left(2.8795 + 2 \frac{25}{25} \right) = 1\,820 \text{ MPa}$$

$L = 0$: la longitud 0 es un valor hipotético en extrusión directa. En realidad es imposible comprimir todo el metal a través de la abertura del troquel. En su lugar, una porción del tocho (el “tope”) permanece sin extruir y la presión empieza a aumentar rápidamente conforme L se aproxima a cero. El incremento de presión al final de la carrera se observa en la gráfica de la presión del pistón contra la carrera del pistón en la figura 19.34. El cálculo siguiente es el valor mínimo hipotético de la presión del pistón que podría resultar cuando $L = 0$.

$$p = 373 \left(2.8795 + 2 \frac{0}{25} \right) = 1\,074 \text{ MPa}$$

Éste es también el valor de la presión del pistón que estaría asociado con la extrusión indirecta a lo largo de toda la longitud del tocho. ■

19.5.3 Troqueles y prensas de extrusión

Los factores importantes en un troquel de extrusión son el ángulo del troquel y la forma del orificio. El ángulo del troquel, más precisamente la mitad del ángulo del troquel, es el

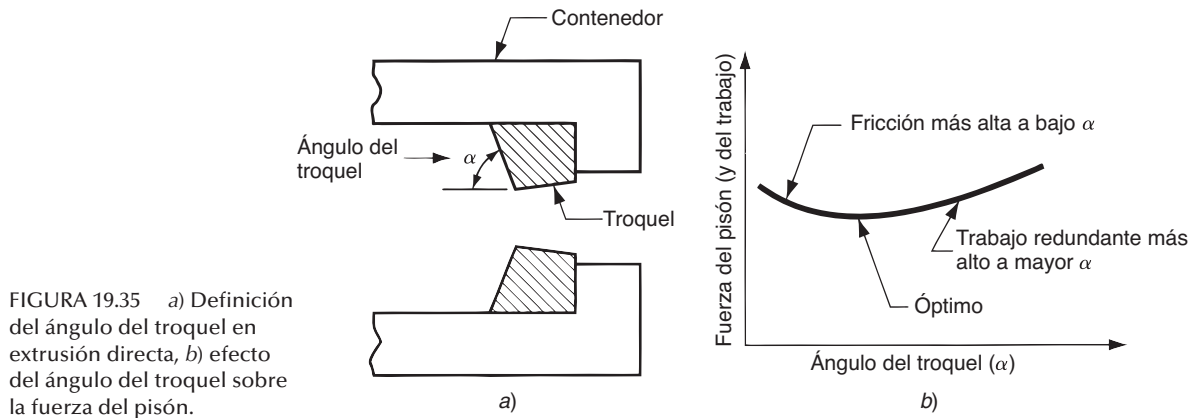


FIGURA 19.35 a) Definición del ángulo del troquel en extrusión directa, b) efecto del ángulo del troquel sobre la fuerza del pisón.

ángulo α , de la figura 19.35a). Para ángulos menores, el área superficial del troquel aumenta, así como también la fricción en la interfaz troquel-tocho. Mayor fricción significa mayor fuerza en el pisón. Por otra parte, un ángulo grande del troquel ocasiona mayor turbulencia del flujo de metal durante la reducción, y también incremento en la fuerza requerida del pisón. El efecto del ángulo del troquel sobre la fuerza del pisón es una función en forma de U como se muestra en la figura 19.35b). Existe un ángulo óptimo del troquel, como lo sugiere la gráfica hipotética. Este ángulo depende de varios factores, como material de trabajo, temperatura del tocho y lubricación; en consecuencia, es difícil determinarlo para un trabajo de extrusión. Los diseñadores de troquel usan reglas empíricas para decidir el ángulo apropiado.

Las ecuaciones previas para la presión del pisón, ecuaciones 19.23a, se aplican a los orificios circulares del troquel. La forma del orificio del troquel afecta la presión requerida del pisón en una operación de extrusión. Una sección transversal compleja, figura 19.36, requiere más presión y fuerza que una sección circular. El efecto de la forma del orificio del troquel puede valorarse por el **factor de forma**, definido como la relación entre la presión requerida para extruir una sección transversal de la forma dada y la presión de extrusión para una sección redonda de la misma área. Se puede expresar el factor de forma como sigue:

$$K_x = 0.98 + 0.02 \left(\frac{C_x}{C_c} \right)^{2.25} \quad (19.26)$$

donde K_x = factor de forma del troquel en extrusión; C_x = perímetro de la sección transversal extruida mm (in); y C_c = perímetro de un círculo de la misma área que la forma extruida, mm (in). La ecuación 19.26 se basa en los datos empíricos de la referencia [1] en una escala de valores de C_x/C_c desde 1.0 hasta cerca de 6.0. La ecuación puede no ser válida para valores mayores al límite superior de esta escala.

Como se indica en la ecuación 19.26, el factor de forma es una función del perímetro de la sección transversal del material extruido, dividida entre el perímetro de una sección circular de área igual. Una forma circular es la forma más simple con un valor de $K_x = 1.0$. Las secciones huecas de superficies delgadas tienen factores de forma más altos y difíciles de extruir. El aumento de la presión no se incluye en las ecuaciones previas para la presión, ecuaciones 19.23a, las cuales se aplican solamente para secciones transversales redondas. Para formas distintas a la redonda, la expresión correspondiente para una extrusión indirecta es:

$$p = K_x \bar{Y}_f \epsilon_x \quad (19.27a)$$

y para extrusión directa:

$$p = K_x \bar{Y}_f \left(\epsilon_x + \frac{2L}{D_o} \right) \quad (19.27b)$$

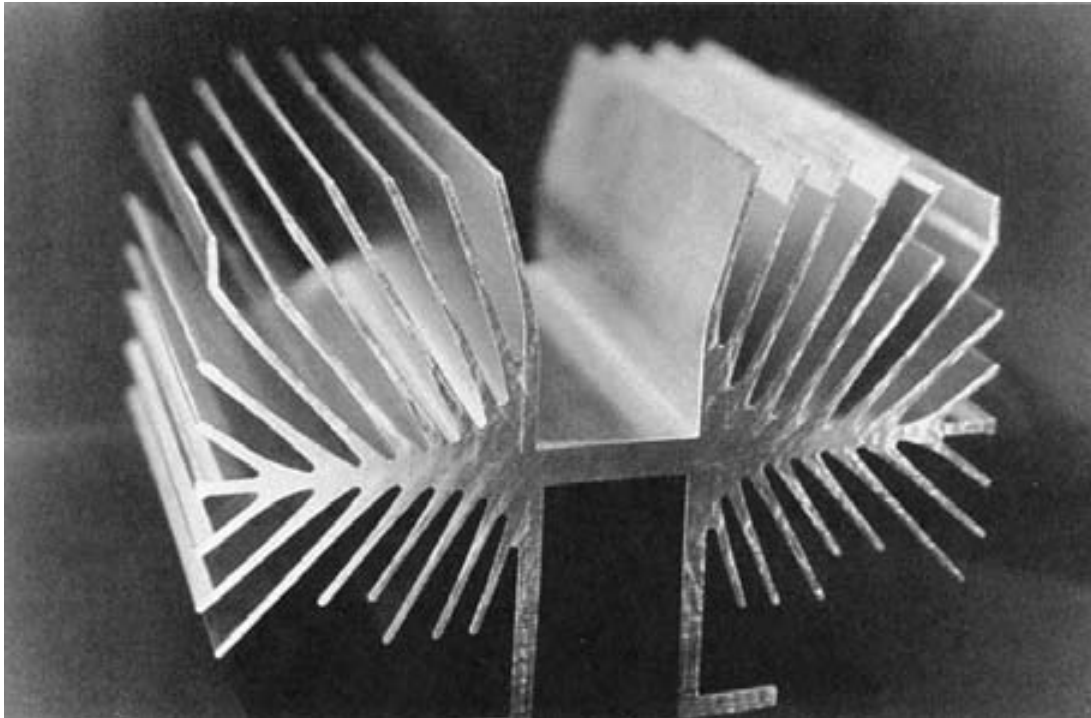


FIGURA 19.36 Una extrusión de sección transversal compleja para un dissipador de calor (foto cortesía de Aluminum Company of America).

donde p = presión de extrusión, MPa (lb/in²); K_x = factor de forma; los otros términos tienen el mismo significado de antes. Los valores de la presión obtenidos por estas ecuaciones pueden usarse en la ecuación 19.24 para determinar la fuerza del pisón.

Los materiales para troqueles de extrusión en caliente incluyen aceros para herramienta y aceros aleados. Las propiedades más importantes de estos materiales para troqueles son alta resistencia al desgaste, alta dureza en caliente y alta conductividad térmica para remover el calor del proceso. Los materiales para troqueles de extrusión en frío incluyen aceros para herramienta y carburos cementados. Sus propiedades deseables son resistencia al desgaste y buena disposición para retener su forma bajo altos esfuerzos. Los carburos se usan cuando se requieren altas velocidades de producción, larga vida en los troqueles y buen control dimensional.

Las prensas de extrusión pueden ser horizontales o verticales, dependiendo de la orientación de los ejes de trabajo. Los tipos horizontales son los más comunes. Las prensas de extrusión son accionadas normalmente por fuerza hidráulica, la cual es especialmente apropiada para producción semicontinua de secciones largas, como en la extrusión directa. Frecuentemente se usa la impulsión mecánica para extrusión en frío de piezas individuales, tales como la extrusión por impacto.

19.5.4 Otros procesos de extrusión

Los métodos principales de extrusión son la extrusión directa e indirecta. Hay varios nombres que se dan a algunas operaciones especiales de extrusión directa o indirecta cuyos métodos se describen aquí. Otras operaciones de extrusión son únicas. En esta sección se examinan estas formas especiales de extrusión y los procesos relacionados.

Extrusión por impacto La extrusión por impacto se realiza a altas velocidades y carreras más cortas que la extrusión convencional. Se usa para hacer componentes individuales.

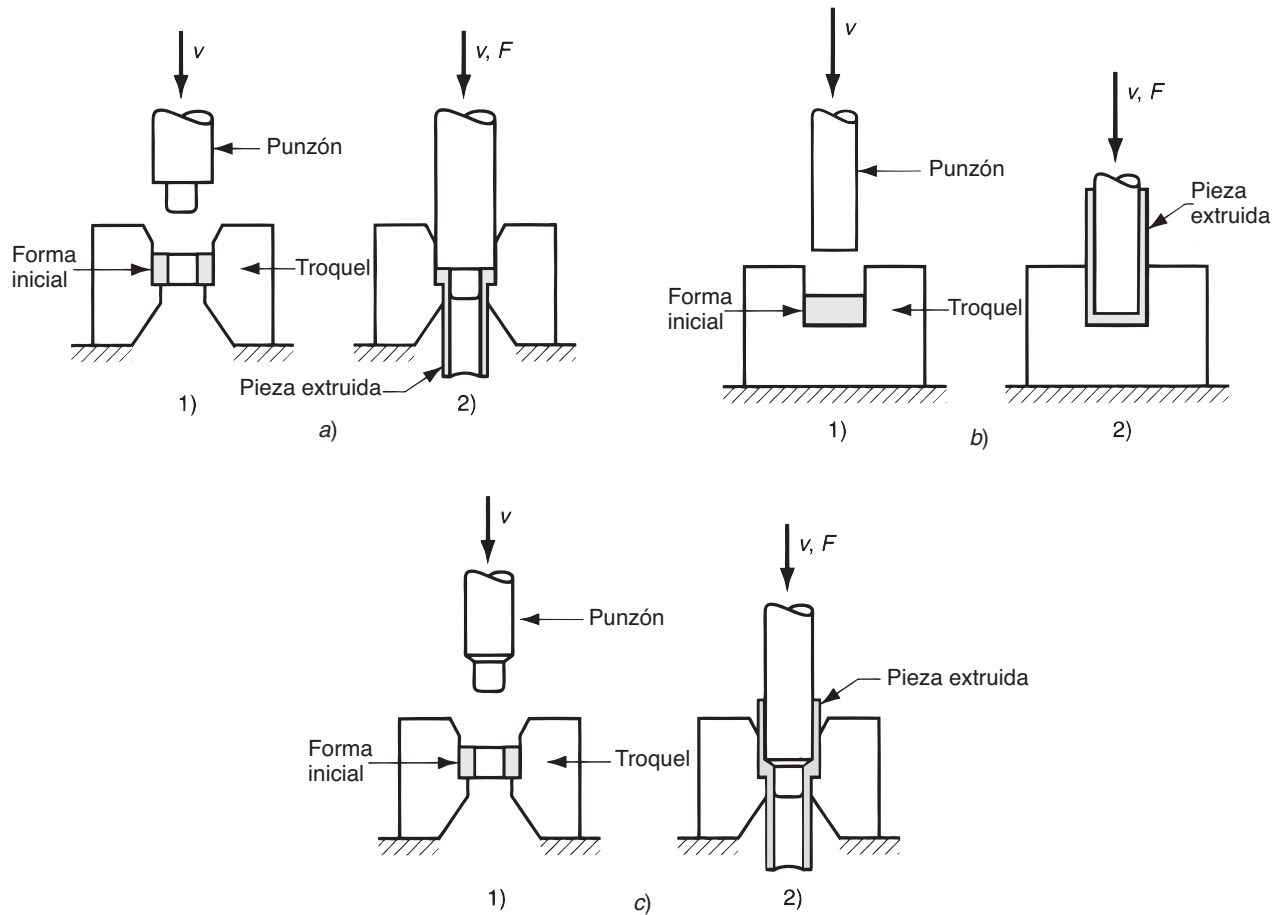


FIGURA 19.37 Varios ejemplos de extrusión por impacto: a) hacia delante, b) hacia atrás y c) combinación de las dos.

Como su nombre lo indica, el punzón golpea a la pieza de trabajo más que aplicar presión. La extrusión por impacto se puede llevar a cabo como extrusión hacia delante, extrusión hacia atrás o una combinación de ambas. Algunos ejemplos representativos se muestran en la figura 19.37.

La extrusión por impacto se hace usualmente en frío con varios metales; la extrusión por impacto hacia atrás es la más común. Los productos hechos por este proceso incluyen tubos para pastas de dientes y contenedores de baterías. Estos ejemplos muestran que se pueden hacer paredes muy delgadas en las piezas extruidas por impacto. Las características de alta velocidad del proceso por impacto permiten grandes reducciones y altas velocidades de producción, de aquí su alta importancia comercial.

Extrusión hidrostática Un problema de la extrusión directa es la fricción a lo largo de la interfaz tocho-contenedor. Este problema se puede solucionar al poner en contacto el tocho en el fluido en el interior del recipiente, presionando el fluido por el movimiento hacia delante del pistón, como se muestra en la figura 19.38, de tal manera que no exista fricción dentro del recipiente y se reduzca también la fricción en la abertura del troquel. La fuerza del pistón es entonces bastante menor que en la extrusión directa. La presión del fluido que actúa sobre todas las superficies del tocho da su nombre al proceso. Se puede llevar a cabo a temperatura ambiente o a temperaturas elevadas. Para temperaturas elevadas se necesitan fluidos y procedimientos especiales. La extrusión hidrostática es una adaptación de la extrusión directa.

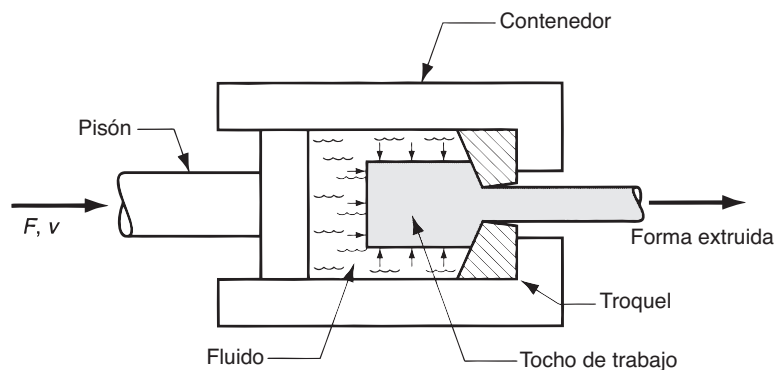


FIGURA 19.38 Extrusión hidrostática.

La presión hidrostática sobre el material de trabajo incrementa la ductilidad del material. Por consiguiente, este proceso se puede usar con metales que son demasiado frágiles para operaciones de extrusión convencional. Los metales dúctiles también pueden extruirse hidrostáticamente, y es posible una alta relación de reducción en esos materiales. Una desventaja del proceso es que se requiere preparar los tochos iniciales de trabajo. El tocho debe formarse con un huso en uno de sus extremos para ajustarlo al ángulo de entrada del troquel. Éste actúa como un sello que previene fugas del fluido a través de la abertura del troquel, al iniciar la presurización del recipiente.

19.5.5 Defectos en productos extruidos

Debido a la considerable deformación asociada a las operaciones de extrusión, pueden ocurrir numerosos defectos en los productos extruidos. Los defectos se pueden clasificar en las siguientes categorías que se ilustran en la figura 19.39:

- Reventado central.** Este defecto es una grieta interna que se genera como resultado de los esfuerzos de tensión a lo largo de la línea central de la pieza de trabajo durante la extrusión. Aunque los esfuerzos de tensión pueden parecer improbables en un proceso de compresión como la extrusión, tienden a ocurrir bajo condiciones que ocasionan gran deformación en regiones de trabajo apartadas del eje central. El movimiento de material más grande en las regiones exteriores estira el material a lo largo del centro de la pieza de trabajo. Si los esfuerzos son lo suficientemente grandes, ocurre el reventado central. Las condiciones que promueven estas fallas son los ángulos altos del troquel, las bajas relaciones de extrusión y las impurezas del metal de trabajo que sirven como puntos de inicio para las grietas. Lo difícil del reventado central es su detección. Es un defecto interno que no se observa generalmente por inspección visual. Otros nombres que se usan para este defecto son *fractura de punta de flecha*, *agrietado central* y *agrietado tipo chevron*.
- Tubificado (bolsa de contracción)** La tubificación es un defecto asociado con la extrusión directa. Como se puede apreciar en la figura 19.39b), es un hundimiento en el extremo del tocho. El uso de un bloque simulado, cuyo diámetro sea ligeramente

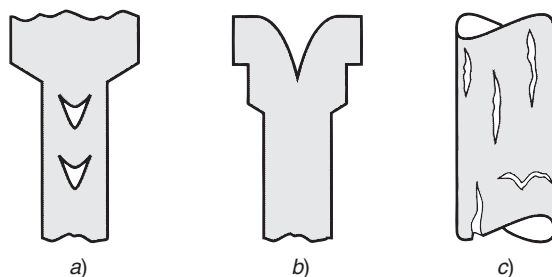


FIGURA 19.39 Algunos defectos comunes en extrusión: a) reventado central, b) tubificación (bolsa de contracción) y c) agrietado superficial.

menor que el del tocho, ayuda a evitar la tubificación. Otros nombres que se dan a este defecto son *cola de tubo* y *cola de pescado*.

- c) **Agrietado superficial** Este defecto es resultado de las altas temperaturas de la pieza de trabajo que causan el desarrollo de grietas en la superficie; ocurre frecuentemente cuando la velocidad de extrusión es demasiado alta y conduce a altas velocidades de deformación asociadas con generación de calor. Otros factores que contribuyen al agrietamiento superficial son la alta fricción y el enfriamiento rápido de la superficie de los tochos a altas temperaturas en la extrusión en caliente.

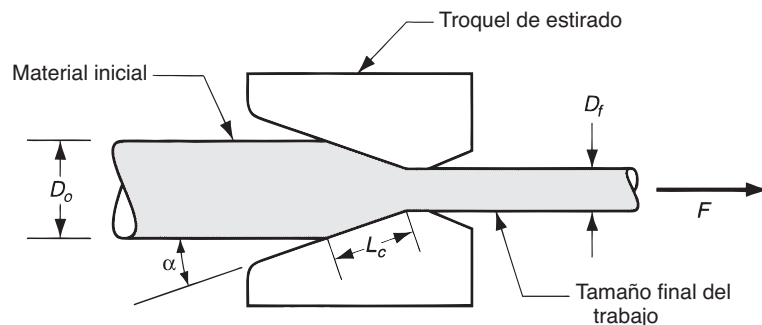
19.6 ESTIRADO DE ALAMBRES Y BARRAS

En el contexto de los procesos de deformación volumétrica, el **estirado** es una operación donde la sección transversal de una barra, varilla o alambre se reduce al tirar del material a través de la abertura de un troquel como se muestra en la figura 19.40. Las características generales del proceso son similares a las de la extrusión; la diferencia es que en el estirado el material de trabajo se jala a través del troquel, mientras que en la extrusión se empuja a través de él. Aunque la presencia de esfuerzos de tensión es obvia en el estirado, la compresión también juega un papel importante, ya que el metal se comprime al pasar a través de la abertura del troquel. Por esta razón, la deformación que ocurre en el estirado se llama algunas veces compresión indirecta. El estirado es un término que se usa también en el trabajo de láminas metálicas (sección 20.3). El término **estirado de alambre y barras** se usa para distinguir los procesos de estirado de los procesos de trabajo de láminas del mismo nombre.

La diferencia básica entre el estirado de barras y el estirado de alambre es el tamaño del material que se procesa. El **estirado de barras** se refiere al material de barras y varillas de diámetro grande, mientras que el **estirado de alambre** se aplica al material de diámetro pequeño. En el proceso de estirado de alambres se puede alcanzar diámetros hasta de 0.03 mm (0.001 in). Aunque la mecánica del proceso es la misma para los dos casos, el equipo y la terminología son de alguna manera diferentes.

El estirado de barras se realiza generalmente como una operación de **estirado simple**, en la cual el material se jala a través de la abertura del troquel. Debido a que el material inicial tiene un diámetro grande, su forma es más bien una pieza recta que enrollada. Esto limita la longitud del trabajo que puede procesarse y es necesaria una operación tipo lote. Por el contrario, el alambre se estira a partir de rollos de alambre que miden varios cientos (o miles) de ft de longitud y pasa a través de una serie de troqueles de estirado. El número de troqueles varía entre cuatro y doce. El término **estirado continuo** se usa para describir este tipo de operación, debido a las grandes corridas de producción que pueden alcanzarse con los rollos de alambre, ya que pueden soldarse a tope con el siguiente rollo para hacer la operación verdaderamente continua.

FIGURA 19.40 Estirado de barras, varillas o alambre.



En una operación de estirado, la modificación en el tamaño del trabajo se da generalmente por la reducción del área definida como sigue:

$$r = \frac{A_o - A_f}{A_o} \quad (19.28)$$

donde r = reducción del área en el estirado; A_o = área original del trabajo, mm² (in²); y A_f = área final, mm² (in²). La reducción del área se expresa frecuentemente como un porcentaje.

En el estirado de barras, estirado de varillas y en el estirado de alambre de diámetro grande para operaciones de recalcado y forjado de cabezas se usa el término draft para denotar la diferencia de tamaños antes y después de procesar el trabajo. El **draft** es simplemente la diferencia entre los diámetros original y final del material:

$$d = D_o - D_f \quad (19.29)$$

donde d = draft, mm (in); D_o = diámetro original del trabajo, mm (in); D_f = diámetro final del trabajo, mm (in).

19.6.1 Análisis del estirado

En esta sección se revisará la mecánica del estirado de alambre y barras, y el cálculo de esfuerzos y fuerzas en el proceso. Se considerará también la posibilidad de grandes reducciones en las operaciones de estirado.

Mecánica del estirado Si no ocurre fricción o trabajo redundante en el estirado, la deformación real puede determinarse como sigue:

$$\epsilon = \ln \frac{A_o}{A_f} = \ln \frac{1}{1-r} \quad (19.30)$$

donde A_o y A_f son las áreas original y final de la sección transversal del material de trabajo, como se definieron previamente; y r = reducción del estirado, definida en la ecuación 19.28. El esfuerzo que resulta de esta deformación ideal está dado por:

$$\sigma = \bar{Y}_f \epsilon = \bar{Y}_f \ln \frac{A_o}{A_f} \quad (19.31)$$

donde $\bar{Y}_f = \frac{K_{\epsilon^n}}{1+n}$ = esfuerzo de fluencia promedio, basado en el valor de la deformación de la ecuación 19.30.

Debido a que la fricción está presente en el estirado y aunque el metal de trabajo experimenta deformación no homogénea, el verdadero esfuerzo es más grande que el proporcionado por la ecuación 19.31. Además de la relación A_o/A_f , otras variables que tienen influencia en el esfuerzo del estirado son el ángulo del troquel y el coeficiente de fricción en la interfaz trabajo-troquel. Se han propuesto numerosos métodos para predecir el esfuerzo de estirado con base en los valores de estos parámetros [1], [2], [12] y [18]. A continuación se presenta la ecuación sugerida por Schey [18]:

$$\sigma_d = \bar{Y}_f \left(1 + \frac{\mu}{\tan \alpha} \right) \phi \ln \frac{A_o}{A_f} \quad (19.32)$$

donde σ_d = esfuerzo de estirado, MPa (lb/in²); μ = coeficiente de fricción troquel-trabajo; α = ángulo del troquel (medio ángulo) como se define en la figura 19.40; y ϕ es un factor que se usa para deformación no homogénea, el cual se determina para una sección transversal redonda como:

$$\phi = 0.88 + 0.12 \frac{D}{L_c} \quad (19.33)$$

donde D = diámetro promedio del trabajo durante el estirado, mm (in); y L_c = longitud de contacto del trabajo con el troquel de estirado en la figura 19.40, mm (in). Los valores

de D y L_c se pueden determinar con las siguientes ecuaciones:

$$D = \frac{D_o + D_f}{2} \quad (19.34a)$$

$$L_c = \frac{D_o - D_f}{2 \tan \alpha} \quad (19.34b)$$

La fuerza correspondiente de estirado es entonces el área de la sección transversal del material estirado multiplicada por el esfuerzo de estirado:

$$F = A_f \sigma_d = A_f \bar{Y}_f \left(1 + \frac{\mu}{\tan \alpha} \right) \phi \ln \frac{A_o}{A_f} \quad (19.35)$$

donde F = fuerza de estirado, N(lb); los otros términos se definieron previamente. La potencia requerida en una operación de estirado es la fuerza multiplicada por la velocidad de salida del trabajo.

EJEMPLO 19.4 Esfuerzo y fuerzas en el estirado del alambre

Un alambre se estira a través de un troquel de estirado con un ángulo de entrada = 15°. El diámetro inicial es de 2.5 mm y el diámetro final es de 2.0 mm. El coeficiente de fricción en la interfaz trabajo-troquel = 0.07. El metal tiene un coeficiente de resistencia $K = 205$ MPa y un exponente de endurecimiento por deformación $n = 0.20$. Determine el esfuerzo de estirado y la fuerza de estirado en esta operación.

Solución: Los valores de D y L_c para la ecuación 19.33 se pueden determinar usando la ecuación 19.34. $D = 2.25$ mm y $L_c = 1.0$ mm. Por lo tanto:

$$\phi = 0.88 + 0.12 \frac{2.25}{1.0} = 1.15$$

Se calculan las áreas respectivas antes y después del estirado y se obtienen los valores $A_o = 4.91 \text{ mm}^2$ y $A_f = 3.14 \text{ mm}^2$. La deformación real resultante $\epsilon = \ln(4.91/3.14) = 0.446$, y el esfuerzo de fluencia promedio en la operación se calcula como:

$$\bar{Y}_f = \frac{205(0.446)^{0.20}}{1.20} = 145.4 \text{ MPa}$$

El esfuerzo de estirado está dado por la ecuación 19.32:

$$\sigma_d = (145.4) \left(1 + \frac{0.07}{\tan 15} \right) (1.15)(0.446) = 94.1 \text{ MPa}$$

Por último, la fuerza de estirado es el esfuerzo multiplicado por el área de la sección transversal del alambre de salida:

$$F = 94.1(3.14) = 295.5 \text{ N}$$

Reducción máxima por pase Una pregunta que se le puede ocurrir al lector es: ¿por qué se necesita más de un paso para alcanzar la reducción deseada en el estirado del alambre?, ¿por qué no se hace la reducción entera en un solo paso a través de un solo troquel como se hace en la extrusión? La respuesta es que resulta claro, de las ecuaciones precedentes, que si la reducción se incrementa, también los esfuerzos de estirado aumentan. Si la reducción es lo suficientemente grande, los esfuerzos de estirado excederían la resistencia a la fluencia del material que sale. Cuando esto pasa, el alambre estirado simplemente se alarga, en lugar de que el nuevo material se comprima a través de la abertura del troquel. Para que el estirado del alambre sea exitoso, el esfuerzo máximo de estirado debe ser menor que el esfuerzo de fluencia del material que sale.

Es fácil determinar este esfuerzo de estirado máximo y la posible reducción máxima que puede hacerse en un paso bajo ciertas suposiciones. Suponga un metal perfectamente

plástico ($n = 0$), sin fricción y sin trabajo redundante. En este caso ideal, el esfuerzo de estirado máximo posible es igual a la resistencia a la fluencia del material de trabajo. Si se expresa esto usando la ecuación para el esfuerzo de estirado bajo condiciones de deformación ideal, ecuación 19.31, y se iguala $\bar{Y}_f = Y$ (porque $n = 0$):

$$\sigma_d = \bar{Y}_f \ln \frac{A_o}{A_f} = Y \ln \frac{A_o}{A_f} = Y \ln \frac{1}{1-r} = Y$$

Esto significa que $(A_o/A_f) = \ln(1/(1-r)) = 1$. De aquí que, $(A_o/A_f) = 1/(1-r)$ deben ser igual a los logaritmos naturales base e , es decir, la deformación máxima posible es 1.0:

$$\epsilon_{\text{máx}} = 1.0 \quad (19.36)$$

La relación máxima posible de área está dada por:

$$\frac{A_o}{A_f} = e = 2.7183 \quad (19.37)$$

y la reducción máxima posible es:

$$r_{\text{máx}} = \frac{e-1}{e} = 0.632 \quad (19.38)$$

El valor dado para la ecuación 19.38 se usa frecuentemente como la reducción teórica máxima posible en un solo paso, aun cuando ésta ignora: 1) los efectos de fricción y del trabajo redundante que podrían reducir el valor máximo posible, 2) el endurecimiento por deformación, que podría incrementar la reducción máxima posible debido a que el alambre a la salida podría ser más resistente que el metal inicial. En la práctica, las reducciones de estirado por paso están muy por debajo de los límites teóricos. Los límites superiores en la práctica industrial parecen ser reducciones de 0.50 para estirado simple de barras y 0.30 para estirado múltiple de alambre.

19.6.2 Práctica del estirado

El estirado se realiza generalmente como una operación de trabajo en frío. Se usa más frecuentemente para producir secciones redondas, pero también se pueden estirar secciones cuadradas y de otras formas. El estirado de alambre es un proceso industrial importante que provee productos comerciales como cables y alambres eléctricos; alambre para cercas, ganchos de ropa y carros para supermercados; varillas para producir clavos, tornillos, remaches, resortes y otros artículos de ferretería. El estirado de barras se usa para producir barras de metal para maquinado forjado y para otros procesos.

Las ventajas del estirado en estas aplicaciones incluyen: 1) estrecho control dimensional, 2) buen acabado de la superficie, 3) propiedades mecánicas mejoradas, como resistencia y dureza, 4) adaptabilidad para producción económica en masa o en lotes. Las velocidades de estirado son tan altas como 50 m/s (10 000 ft/min) para alambre muy fino. En el caso del estirado de barras se produce material para maquinado; la operación mejora la maquinabilidad de las barras (sección 24.1).

Equipo de estirado El estirado de barras se realiza en una máquina llamada **banco de estirado** que consiste en una mesa de entrada, un bastidor del troquel (que contiene el troquel de estirado), la corredera y el almacén de salida. El arreglo se muestra en la figura 19.41. La corredera se usa para jalar el material a través del troquel de estirado. Está accionado por cilindros hidráulicos o cadenas movidas por un motor. El bastidor del troquel se diseña frecuentemente para contener más de un troquel, de manera que se puedan estirar varias barras simultáneamente a través de los respectivos troqueles.

El estirado de alambre se hace con máquinas estiradoras continuas que contienen múltiples troqueles de estirado separados por tambores de acumulación entre los troqueles,

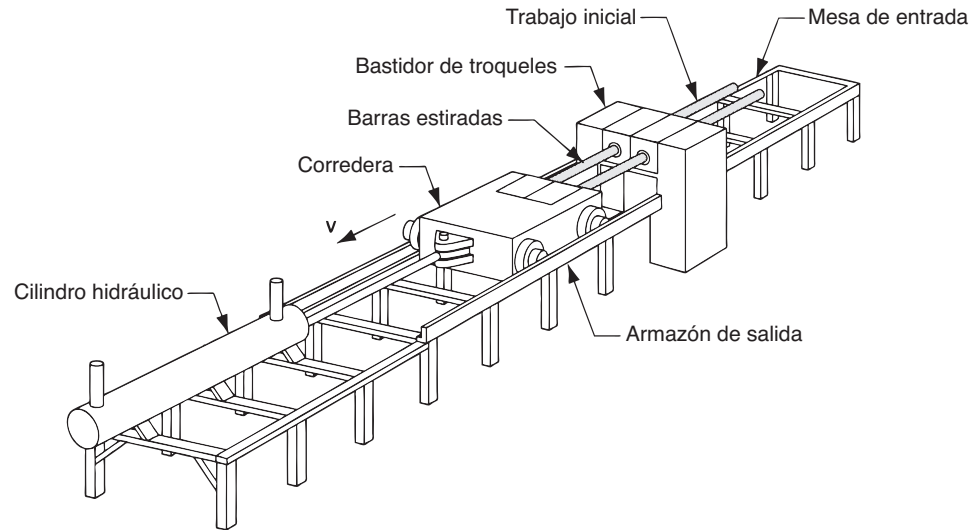
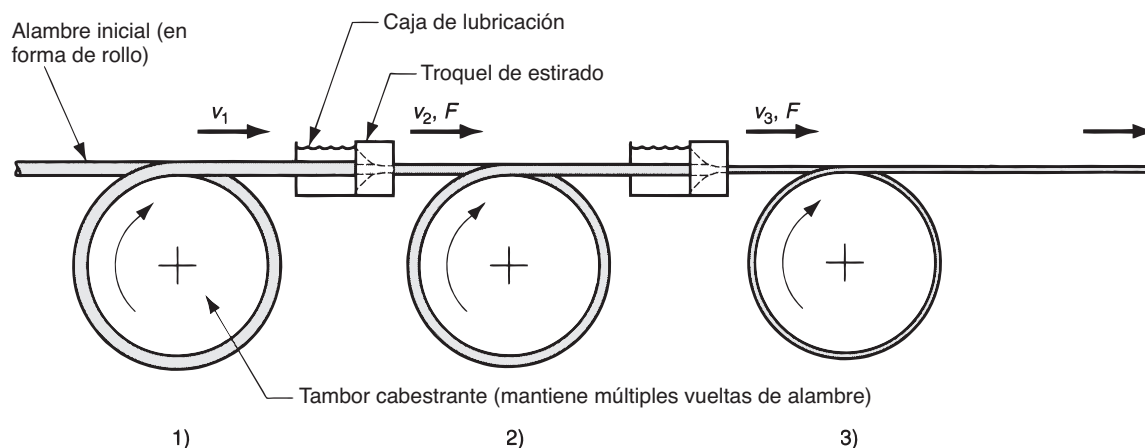


FIGURA 19.41 Banco de estirado operado hidráulicamente para estirado de barras metálicas.

como se ilustra en la figura 19.42. Cada tambor, llamado **cabestrante o molinete**, es movido por un motor que provee la fuerza apropiada para estirar el alambre a través del troquel correspondiente. También mantiene una tensión regular en el alambre que pasa al siguiente troquel de estirado en la serie. Cada troquel realiza cierta reducción en el alambre, y así se alcanza la reducción total deseada en la serie. Algunas veces se requiere recocido del alambre entre los grupos de troqueles en la serie, dependiendo del metal que se procesa y de la reducción total que se realiza.

Troqueles de estirado La figura 19.43 identifica las características de un troquel típico de estirado. Las cuatro regiones del troquel que se pueden distinguir son las siguientes: 1) entrada, 2) ángulo de aproximación, 3) superficie del cojinete (campo), 4) relevo de salida. La región de **entrada** es generalmente una abertura en forma de campana que no entra en contacto con el trabajo. Su propósito es hacer un embudo lubricante en el troquel y prevenir el rayado en la superficie del trabajo y la superficie del troquel. La **aproximación** es donde ocurre el proceso de estirado. Es una abertura en forma de cono con un ángulo (medio ángulo) que fluctúa normalmente de 6° a 20° . El ángulo correcto varía de acuerdo

FIGURA 19.42 Estirado continuo de alambre.



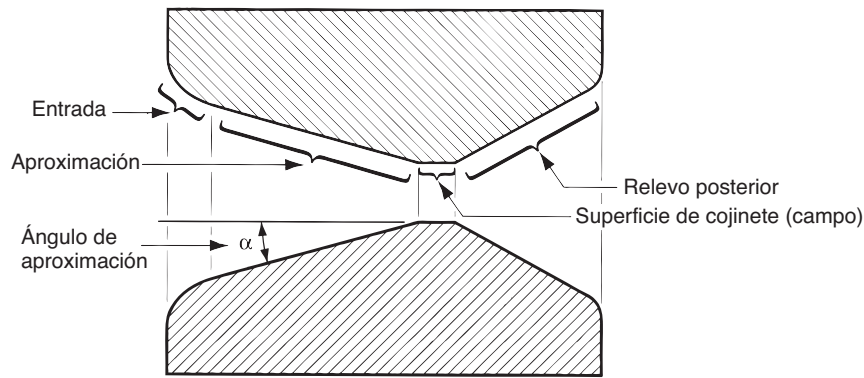


FIGURA 19.43 Troquel de estirado para barras redondas o alambre.

con el material de trabajo. La **superficie del cojinete** o **campo** determina el tamaño final del material estirado. Finalmente, el **relevo posterior** es la zona de salida. Se provee con un relevo hacia atrás con un ángulo de 30° . Los troqueles de estirado se hacen de acero de herramienta o carburo cementado. Los troqueles para alta velocidad en las operaciones de estirado de alambre usan frecuentemente insertos hechos de diamante (sintético o natural) para las superficies de desgaste.

Preparación del trabajo Antes del estirado, el material inicial debe prepararse adecuadamente. Esto involucra tres pasos: 1) recocido, 2) limpieza y 3) afilado. El propósito del recocido es incrementar la ductilidad del material para aceptar la deformación durante el estirado. Como ya se dijo, algunas veces se necesitan pasos de recocido en el estirado continuo. La limpieza del material se requiere para prevenir daños en la superficie de trabajo y en el troquel de estirado. Esto involucra la remoción de los contaminantes de la superficie (por ejemplo, capas de óxido y corrosión) por medio de baños químicos o limpieza con chorro de municiones. En algunos casos se prelubrica la superficie de trabajo después de la limpieza.

El **afilado** implica la reducción del diámetro del extremo inicial del material, de manera que pueda insertarse a través del troquel de estirado para iniciar el proceso; esto se logra generalmente mediante estampado, laminado o torneado. El extremo afilado del material se sujeta a las mordazas de la corredera o a otros dispositivos para iniciar el proceso de estirado.

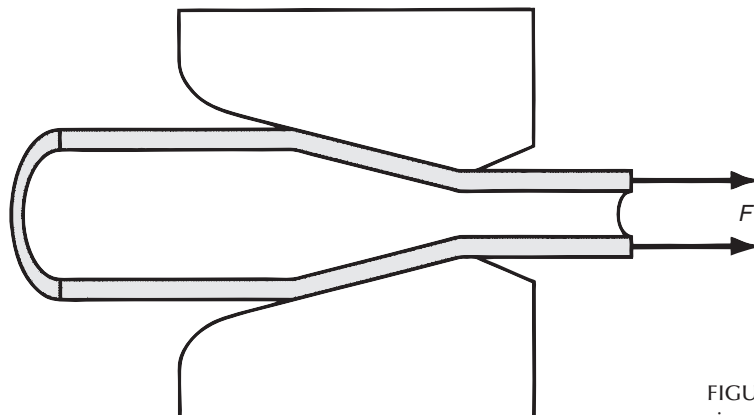


FIGURA 19.44 Estirado de tubos sin mandril (entallado de tubos).

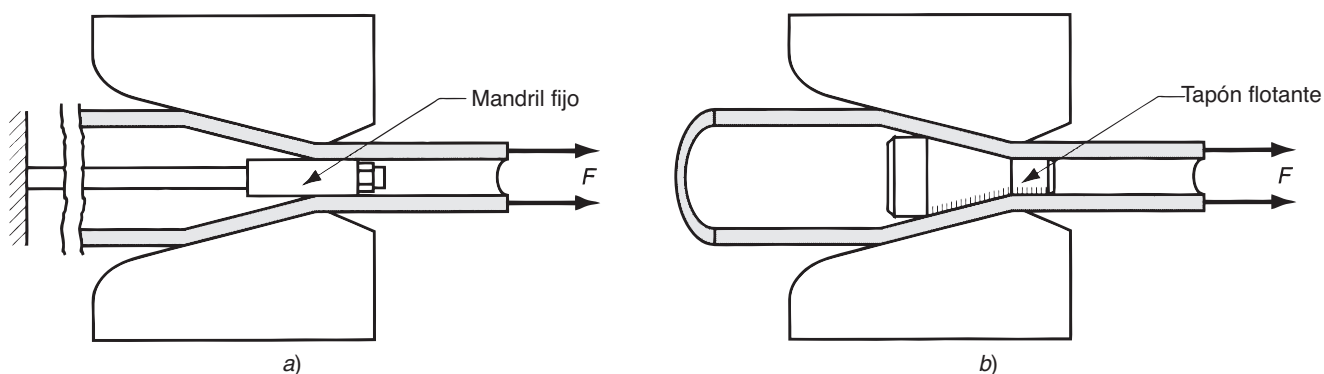


FIGURA 19.45 Estirado de tubos con mandriles: a) mandril fijo y b) tapón flotante.

19.6.3 Estirado de tubos

El proceso de estirado se puede usar para reducir el diámetro o el espesor de la pared de tubos y tuberías sin costura, después que se ha producido el tubo inicial por medio de alguna otra operación, como extrusión. El estirado del tubo se puede llevar a cabo con o sin mandril. El método más simple no usa mandril y se aplica para la reducción del diámetro, como se muestra en la figura 19.44. Algunas veces se usa el término *entallado de tubo* para esta operación.

El problema que surge cuando el tubo se estira sin utilizar un mandril, como se muestra en la figura 19.44, es que carece de control sobre el diámetro interno y sobre el espesor de la pared del tubo. Por esto se usan mandriles de varios tipos, dos de los cuales se ilustran en la figura 19.45. En el inciso a de la figura se usa un *mandril fijo* ajustado a una barra de soporte largo para fijar el diámetro interior y el espesor de la pared del tubo durante la operación. Las limitaciones prácticas sobre la longitud de la barra de soporte en este método restringen la longitud de los tubos que pueden estirarse. El segundo tipo que se muestra en el inciso b) usa un *tapón flotante* cuya forma se diseña de manera que encuentre su posición “natural” en la zona de reducción del troquel. Este método evita las limitaciones sobre la longitud de trabajo que presenta el método del mandril fijo.

REFERENCIAS

- [1] Altan, T., Oh, S.-I. y Gegel, H.L. *Metal Forming: Fundamentals and Applications*. ASM International, Materials Park, Ohio, 1983.
- [2] Avitzur, B. *Metal Forming: Processes and Analysis*. Robert E. Krieger Publishing Company, Huntington, N.Y. 1979.
- [3] Byrer, T. G., et al. (eds). *Forging Handbook*. Forging Industry Association, Cleveland, Ohio; y American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1985.
- [4] Cook, N. H. *Manufacturing Analysis*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Mass., 1966.
- [5] DeGarmo, E. P. Black, J. T. y Kohser, R. A. *Materials and Processes in Manufacturing*, 8a. ed. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1997.
- [6] Groover, M. P. “An Experimental Study of the Work Components and Extrusion Strain in the Cold Forward Extrusion of Steel” *Research Report*. Bethlehem Steel Corporation, 1966.
- [7] Harris, J. N. *Mechanical Working of Metals*. Pergamon Press, Oxford, England, 1983.
- [8] Hosford, W. F. y Cadell, R. M. *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*, 2a. ed. Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J., 1993.
- [9] Jensen, J. E. (ed.). *Forging Industry Handbook*. Forging Industry Association, Cleveland, Ohio, 1970.
- [10] Johnson, W. “The Pressure for the Cold Extrusion of Lubricated Rod Through Square Dies of Moderate Reduction at Slow Speeds” *Journal of the Institute of Metals*. Vol. 85, 1956-1957.
- [11] Kalpakjian, S. *Mechanical Processing of Materials*, D. Van Nostrand Company, Inc., Princeton, N.J., 1967. Capítulo 5.

- [12] Kalpakjian, S. y Schmid, S. R. **Manufacturing Processes for Engineering Materials**, 4a. ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 2003.
- [13] Lange, K. et al. (eds.). **Handbook of Metal Forming**. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1995.
- [14] Laue, K. y Stenger, H. **Extrusion: Processes, Machinery and Tooling**. American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1981.
- [15] Mielnik, E. M. **Metalworking Science and Engineering**. McGraw-Hill, Inc., Nueva York, 1991.
- [16] Roberts, W. L. **Hot Rolling of Steel**. Marcel Dekker, Inc. Nueva York, 1983.
- [17] Roberts, W. L. **Cold Rolling of Steel**. Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1978.
- [18] Schey, J. A. **Introduction to Manufacturing Processes**. 3a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 2000.
- [19] Wick, C., et al. (eds.). **Tool and manufacturing Engineers Handbook**. 4a.ed. Vol. II: Forming, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1984.

PREGUNTAS DE REPASO

- 19.1. ¿Por qué razones comerciales y tecnológicas son importantes los procesos de deformación volumétrica?
- 19.2. Mencione los cuatro procesos básicos de la deformación volumétrica.
- 19.3. ¿Qué es el laminado en el contexto de los procesos de deformación volumétrica?
- 19.4. En el laminado del acero, ¿qué diferencias existen entre una lupia, una plancha y un tocho?
- 19.5. Mencione algunos de los productos fabricados en un molino laminador.
- 19.6. ¿Qué es el draft en una operación de laminado?
- 19.7. ¿Qué es la adherencia en una operación de laminado en caliente?
- 19.8. Identifique algunas de las formas para reducir la fuerza en el laminado plano.
- 19.9. ¿Qué es un laminador de dos rodillos?
- 19.10. ¿Qué es un molino reversible en laminado?
- 19.11. Identifique, además del laminado plano y laminado de perfiles, algunos procesos adicionales de formación volumétrica (masiva) que usan rodillos para efectuar la deformación.
- 19.12. ¿Qué es el forjado?
- 19.13. Una manera de clasificar las operaciones de forjado es por el grado en que el troquel restringe al material de trabajo. Mencione los tres tipos básicos de esta clasificación.
- 19.14. ¿Por qué es deseable la rebaba en el forjado con troquel impresor?
- 19.15. ¿Qué es una operación de recortado en el contexto de la impresión de troquel forjado?
- 19.16. ¿Cuáles son los dos tipos básicos de equipos de forja?
- 19.17. ¿Qué es el forjado isotérmico?
- 19.18. ¿Qué es la extrusión?
- 19.19. Distinga entre extrusión directa y extrusión indirecta.
- 19.20. Mencione algunos productos que se fabrican por extrusión.
- 19.21. ¿Por qué la fricción es un factor determinante en la fuerza del pisón en la extrusión directa y no lo es en la extrusión indirecta?
- 19.22. ¿Qué tienen en común el reventado central y el proceso de perforación de rodillos?
- 19.23. Defina el estirado de alambre y de barra.
- 19.24. A pesar de que la pieza de trabajo en una operación de estirado de alambre está obviamente sujeta a esfuerzos de tensión, ¿de qué forma los esfuerzos de compresión juegan también un papel importante en el proceso?
- 19.25. ¿Por qué en una operación de estirado de alambre, el esfuerzo de estirado nunca debe exceder el esfuerzo de fluencia del metal de trabajo?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 27 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

- 19.1. La pieza de trabajo inicial en el laminado de acero caliente de láminas es uno de los siguientes (una respuesta es correcta): a) barra, b) tocho, c) lupia, d) plancha o e) alambre.
- 19.2. ¿De cuál de los siguientes parámetros depende el máximo draft posible en una operación de laminado? (dos respuestas son correctas): a) coeficiente de fricción entre el rodillo y el trabajo, b) diámetro de los rodillos, c) velocidad de los rodillos, d) espesor del material, e) deformación y f) coeficiente de resistencia del metal de trabajo.

- 19.3. ¿Cuál de los parámetros de esfuerzo o resistencia siguientes se utiliza en el cálculo de la fuerza de laminado? (una respuesta es mejor): *a)* esfuerzo promedio al flujo, *b)* resistencia a la compresión, *c)* esfuerzo al flujo final, *d)* resistencia a la tensión o *e)* resistencia a la fluencia.
- 19.4. ¿Cuál de los siguientes tipos de molinos de rodillos se asocia con rodillos relativamente pequeños en contacto con el trabajo? (dos respuestas mejores) *a)* molino de rodillos en conjunto, *b)* molino laminador continuo, *c)* molino de cuatro rodillos, *d)* molino reversible o *e)* configuración de tres rodillos.
- 19.5. ¿Con cuál de los siguientes procesos de deformación masiva se asocia la producción de tubos y tuberías? (tres respuestas correctas). *a)* extrusión, *b)* punzonado, *c)* laminado de anillos, *d)* forjado con rodillos, *e)* perforación de rodillos, *f)* entallado de tubos o *g)* recalcado.
- 19.6. ¿Cuál de los siguientes parámetros de esfuerzo o resistencia se utiliza en el cálculo de la fuerza máxima en una operación de forjado? (una respuesta mejor): *a)* esfuerzo promedio a la fluencia, *b)* resistencia a la compresión, *c)* esfuerzo a la fluencia final, *d)* resistencia a la tensión o *e)* resistencia a la fluencia.
- 19.7. ¿Cuál de las operaciones siguientes está relacionada estrechamente con el forjado de troquel abierto? (tres mejores respuestas): *a)* forjado por secciones, *b)* forjado sin rebaba, *c)* forjado con troqueles convexos, *d)* forjado con troquel de impresión, *e)* proceso Mannesmann, *f)* forjado de precisión, *g)* recalentado y *h)* recalcado.
- 19.8. La rebaba en el forjado con troquel impresor no tiene ningún propósito y es indeseable porque tiene que recortarse de la pieza después de formada: *a)* verdadero o *b)* falso.
- 19.9. ¿Cuál de las siguientes opciones se clasifica como una operación de forja? (cuatro respuestas correctas). *a)* acuñado, *b)* forjado con troqueles convexos, *c)* extrusión por impacto, *d)* forjado con rodillos, *e)* estampado (suajeado), *f)* laminado de cuerdas, *g)* recortado y *h)* recalcado.
- 19.10. ¿Cuál de los siguientes son nombres alternos de la extrusión indirecta? (dos respuestas correctas): *a)* extrusión hacia atrás, *b)* extrusión directa, *c)* extrusión hacia delante, *d)* extrusión por impacto y *e)* extrusión invertida.
- 19.11. La producción de tubo es posible en extrusión indirecta, pero no en extrusión directa: *a)* verdadero o *b)* falso.
- 19.12. ¿Cuál de los siguientes parámetros de esfuerzo o resistencia se utiliza en el cálculo de la fuerza en una operación de extrusión? (una mejor respuesta): *a)* esfuerzo a la fluencia promedio, *b)* resistencia a la compresión, *c)* resistencia a la fluencia final, *d)* resistencia a la tensión o *e)* resistencia a la fluencia.
- 19.13. ¿En cuál de las operaciones de extrusión siguientes es la fricción un factor en la determinación de la fuerza de extrusión? (una mejor respuesta): *a)* extrusión directa, o *b)* extrusión indirecta.
- 19.14. Teóricamente la reducción máxima posible en una operación de estirado de alambre, bajo la suposición de material perfectamente plástico, sin fricción y sin trabajo redundante es: *a)* cero, *b)* 0.63, *c)* 1.0 o *d)* 2.72.
- 19.15. ¿Cuáles de los siguientes procesos de deformación volumétrica están involucrados en la producción de clavos para madera de construcción? (tres respuestas mejores): *a)* estirado de barras y alambres, *b)* extrusión, *c)* forjado sin rebaba, *d)* formado con troquel de impresión, *e)* laminado y *f)* recalcado.
- 19.16. ¿Con cuál de los cuatro procesos de deformación masiva se asocia la fórmula de Johnson? *a)* estirado de barras y alambres, *b)* extrusión, *c)* forjado y *d)* laminado.

PROBLEMAS

Laminado

- 19.1. Una placa de 42 mm de espesor fabricada de acero al bajo carbono se reduce a 34.0 mm en un paso de laminado. A medida que el espesor se reduce, la placa se engruesa 4%. El esfuerzo de fluencia de la placa de acero es de 174 MPa y la resistencia de tensión es de 290 MPa. La velocidad de entrada de la placa es de 15.0 m/min. El radio del carrete es de 325 mm y la velocidad de rotación es de 49.0 rev/min. Determine *a)* el coeficiente de fricción mínimo requerido que haría esta operación de laminado posible, *b)* la velocidad de salida de la placa y *c)* el deslizamiento hacia delante.
- 19.2. Una plancha de 2.0 in de grueso tiene 10 in de ancho y 12.0 ft de longitud. El espesor se reduce en tres pasos de laminación en caliente. Cada paso reduce la plancha 75% de su grueso anterior. Para este metal y esta reducción se espera un ensanchamiento de 3% en cada paso. Si la velocidad de entrada de la plancha en el primer paso es de 40 ft/min, y la velocidad de los rodillos es la misma para los tres pasos, determine *a)* la longitud y *b)* la velocidad de salida de la plancha después de la reducción final.
- 19.3. Se usa una serie de operaciones de laminado en frío para reducir el espesor de una placa de 50 a 25 mm en un molino reversible de 2 rodillos. El diámetro del rodillo es de 700 mm y el coeficiente de fricción entre los rodillos y el trabajo es de 0.15. La especificación es que el draft sea igual en cada paso. Determine *a)* el número mínimo de pases requerido y *b)* el draft para cada paso.
- 19.4. En el problema 19.3, suponga que está especificada una reducción porcentual igual en cada paso en lugar del draft: *a)* ¿cuál es el número mínimo de pases requerido? *b)* ¿cuál es el draft para cada paso?
- 19.5. Un molino laminador continuo en caliente tiene dos bastidores. El grueso de la placa inicial es de 25 mm y el ancho es de 300 mm. El espesor final será de 13 mm y el radio de cada bastidor de 250 mm. La velocidad de rotación del primer

bastidor es de 20 rev/min. En cada bastidor se producirán drafts iguales de 6 mm. La placa es lo suficientemente ancha en relación con su espesor para que no ocurra un incremento en la anchura. Bajo la suposición de que el deslizamiento hacia delante es igual en cada bastidor, determine *a*) la velocidad v_r en cada bastidor y *b*) el deslizamiento hacia delante s , *c*) determine también la velocidad de salida en cada bastidor de rodillos si la velocidad de entrada al primer bastidor es de 26 m/min.

- 19.6. Un molino de laminación en caliente tiene ocho bastidores. Las dimensiones de la plancha inicial son: espesor de 3.0 in, ancho de 15.0 in y longitud de 10.0 ft. El espesor final será de 0.3 in, el diámetro del rodillo en cada bastidor de 36 in y la velocidad de rotación en el bastidor número 1 de 30 rev/min. Se ha observado que la velocidad de la plancha que entra al bastidor número 1 es de 240 ft/min. Suponga que no ocurre ensanchamiento de la plancha durante la secuencia de laminado. La reducción porcentual del espesor es igual en cada bastidor y se supone que el deslizamiento hacia delante será igual en cada bastidor. Determine *a*) la reducción porcentual en cada bastidor, *b*) la velocidad de rotación de los rodillos en los bastidores del dos al ocho, *c*) el deslizamiento hacia delante, *d*) ¿cuál es el draft en los bastidores uno y ocho y *e*) ¿cuál es la longitud y velocidad de salida de la tira final que sale del bastidor ocho?
- 19.7. Una placa de 250 mm de ancho y 25 mm de espesor se reduce en un solo paso en un molino de dos rodillos a un espesor de 20 mm. El rodillo tiene un radio de 50 mm y su velocidad es de 30 m/min. El material de trabajo tiene un coeficiente de resistencia de 240 MPa y un exponente de endurecimiento por deformación de 0.2. Determine *a*) la fuerza de laminación, *b*) el momento de torsión de laminación y *c*) la potencia requerida para realizar esta operación.
- 19.8. Resuelva el problema 19.7 utilizando un radio de rodillo de 250 mm.
- 19.9. Resuelva el problema 19.7 suponiendo un molino de rodillos en conjunto cuyos rodillos de trabajo tienen un radio de

50 mm. Compare los resultados con los dos problemas anteriores y note el importante efecto del radio de los rodillos sobre la fuerza, el momento de torsión y la potencia.

- 19.10. Una plancha de 4.50 in de grueso que tiene 9 in de ancho y 24 in de largo se reducirá en un solo paso en un molino de dos rodillos a un espesor de 3.87 in. El rodillo gira a una velocidad de 5.50 rev/min y tiene un radio de 17.0 in. El material de trabajo tiene un coeficiente de resistencia igual a 30 000 lb/in² y un exponente de endurecimiento por deformación de 0.15. Determine *a*) la fuerza del laminado, *b*) el momento de torsión del laminado y *c*) la potencia requerida para realizar esta operación.
- 19.11. Una operación de laminado de un solo paso reduce una placa de 20 mm de grueso a 18 mm. La placa inicial tiene un ancho de 200 mm. El radio del rodillo es de 250 mm y la velocidad de rotación es de 12 rev/min. El material de trabajo tiene un coeficiente de resistencia de 600 MPa y un exponente de endurecimiento por deformación de 0.22. Determine *a*) la fuerza de laminación, *b*) el momento de torsión de laminación y *c*) la potencia requerida para esta operación.
- 19.12. Un molino de laminación en caliente tiene rodillos cuyo diámetro es de 24 in. Puede ejercer una fuerza máxima de 40 000 libras. El molino tiene una potencia máxima de 100 hp. Se desea reducir una placa de 1.5 in de grueso al draft máximo posible en un paso. La placa inicial tiene 10 in de ancho. El material caliente tiene un coeficiente de resistencia de 20 000 lb/in² y un exponente de endurecimiento por deformación de 0. Determine *a*) el draft máximo posible, *b*) la deformación real asociada y *c*) la velocidad máxima de los rodillos para esta operación.
- 19.13. Resuelva el problema 19.12, excepto porque la operación es laminado en caliente encima de la temperatura de cristalización y el exponente de endurecimiento por deformación es de 0.18. Suponga que el coeficiente de resistencia permanece en un valor de 20 000 lb/in².

Forjado

- 19.14. Una pieza cilíndrica es recalca en un troquel abierto. El diámetro inicial es de 45 mm y la altura inicial es de 40 mm. La altura después del forjado es de 25 mm. El coeficiente de fricción en la interfaz troquel-trabajo es de 0.20. El material de trabajo tiene una curva de fluencia definida por un coeficiente de resistencia de 600 MPa y un exponente de endurecimiento por deformación de 0.12. Determine la fuerza instantánea en la operación: *a*) en el momento en que se alcanza el punto de fluencia (fluencia a la deformación de 0.002), *b*) si $h = 35$ mm y *c*) si $h = 25$ mm.
- 19.15. Una pieza cilíndrica se recalca en frío en un troquel abierto con $D = 2.5$ in y $h = 2.5$ in y una altura final de 1.5 in. El coeficiente de fricción en la interfaz troquel-trabajo es de 0.10. El material de trabajo tiene una curva de fluencia definida por $K = 40\,000$ lb/in² y $n = 0.15$. Determine la fuerza instantánea en la operación: *a*) cuando se alcanza el punto de fluencia (fluencia a la deformación de 0.002), *b*) $h = 2.3$ in, *c*) $h = 1.9$ in y *d*) $h = 1.5$ in.
- 19.16. Una pieza de trabajo tiene un diámetro de 2.5 in y una altura de 4.0 in. Se recalca a una altura de 2.75 in. El coeficiente de fricción en la interfaz troquel-trabajo = 0.10. El material

de trabajo tiene una curva de fluencia con un coeficiente de resistencia es de 25 000 lb/in² y un exponente de endurecimiento por deformación de 0.22. Construya una gráfica de fuerza contra altura del trabajo.

- 19.17. Se ejecuta una operación de encabezamiento en frío para producir la cabeza de un clavo de acero. El coeficiente de resistencia del acero es 600 MPa y el exponente de endurecimiento por deformación es de 0.22. El coeficiente de fricción en la interfaz troquel-trabajo = 0.14. El alambre del cual se hace el clavo es de 5.00 mm de diámetro. La cabeza tiene un diámetro de 9.5 mm y un espesor de 1.6 mm. La longitud final del clavo es de 120 mm. *a*) ¿qué longitud de alambre se debe proyectar fuera del troquel para proveer el volumen suficiente de material para esta operación de recalca?, *b*) calcule la fuerza mínima que debe aplicar el punzón para formar la cabeza en esta operación de troquel abierto.
- 19.18. Consiga un clavo común grande de cabeza (cabeza plana). Mida el diámetro de la cabeza y su espesor así como el diámetro del rabo del clavo, *a*) ¿qué longitud de material debe proyectarse fuera del troquel para proveer el suficiente material

para producir el clavo?, *b*) usando los valores apropiados para el coeficiente de resistencia y el exponente de endurecimiento por deformación del metal con el que se produce el clavo (tabla 3.4), calcule la fuerza máxima en la operación de encabezado para formar la cabeza.

- 19.19. Una operación de recalcado en caliente se ejecuta en un troquel abierto. El tamaño inicial de la pieza es $D_o = 25$ mm y $h_o = 50$ mm. La pieza se recalca a un diámetro = 50 mm. A esta elevada temperatura, el metal de trabajo fluye a 85 MPa ($n = 0$). El coeficiente de fricción en la interfaz trabajo-troquel es de 0.40. Determine *a*) la altura final de la pieza, *b*) la fuerza máxima en la operación.
- 19.20. Una prensa hidráulica de forja es capaz de ejercer una fuerza máxima de 1 000 000 N. Una pieza cilíndrica se recalca en frío. La pieza inicial tiene un diámetro de 30 mm y una altura de 30 mm. La curva de fluencia del metal se define por $K = 400$ MPa y $n = 0.2$. Determine la reducción máxima en altura a la que puede ser comprimida la pieza con la prensa, si el coeficiente de fricción es de 0.1.

Extrusión

- 19.23. Un tocho cilíndrico de 100 mm de longitud y 50 mm de diámetro se reduce por extrusión indirecta (inversa) a 20 mm de diámetro. El ángulo del troquel es de 90° . En la ecuación de Johnson $a = 0.8$ y $b = 1.4$ y la curva de fluencia para el material de trabajo tiene un coeficiente de resistencia de 800 MPa y un exponente de endurecimiento por deformación de 0.13. Determine *a*) la relación de extrusión, *b*) la deformación real (deformación homogénea), *c*) la deformación de extrusión, *d*) la presión del pisón y *e*) la fuerza del pisón.
- 19.24. Un tocho cilíndrico de 3 in de largo y 1.5 in de diámetro se reduce por extrusión indirecta a un diámetro de 0.375 in. El ángulo del troquel es de 90° . Si la ecuación de Johnson tiene $a = 0.8$ y $b = 1.5$ y la curva de fluencia para el material de trabajo es $K = 75\,000$ lb/in² y $n = 0.25$, determine: *a*) la relación de extrusión, *b*) la deformación real (deformación homogénea), *c*) la deformación por extrusión, *d*) la presión del pisón, *e*) la fuerza del pisón y *f*) la potencia si la velocidad del pisón es de 20 in/min.
- 19.25. Un tocho tiene de longitud 75 mm y un diámetro de 35 mm se extruye directamente a un diámetro de 20 mm. El troquel de extrusión tiene un ángulo de 75° . Para el metal de trabajo, $K = 600$ MPa y $n = 0.25$. En la ecuación de esfuerzo por extrusión de Johnson $a = 0.8$ y $b = 1.4$, determine *a*) la relación de extrusión, *b*) la deformación real (deformación homogénea), *c*) la deformación de extrusión y *d*) la presión del pisón a $L = 70, 40$ y 10 mm.
- 19.26. Un tocho de 2 in de longitud y con un diámetro de 1.25 in se extruye directamente a un diámetro de 0.50 in. El ángulo de extrusión del troquel es de 90° . Para el metal de trabajo, $K = 45\,000$ lb/in² y $n = 0.20$. En la ecuación de deformación por extrusión de Johnson $a = 0.8$ y $b = 1.5$, determine *a*) la relación de extrusión, *b*) la deformación real (deformación homogénea), *c*) la deformación por extrusión y *d*) la presión del pisón a $L = 2.0, 1.5, 0.5$ y cero in.
- 19.21. Se diseña una pieza para forjarse en caliente en un troquel impresor. El área proyectada de la pieza, incluida la rebaba, es de 16 in². Después del cortado, la pieza tendrá un área proyectada de 10 in². La configuración geométrica de la pieza es compleja. El material fluye a 10 000 lb/in² al calentarse y no tiende a endurecerse por deformación. A temperatura ambiente, el material fluye a 25 000 lb/in². Determine la fuerza máxima requerida para ejecutar la operación de forjado.
- 19.22. Una biela se diseña para forjado en caliente en un troquel impresor. El área proyectada de la pieza es de 6 500 mm². El diseño del troquel ocasionará la formación de rebaba durante el forjado, así que el área, incluida la rebaba, será de 9 000 mm². La forma de la pieza es compleja. Al calentarse el material de trabajo fluye a 75 MPa y no tiende a endurecerse por deformación. Determine la fuerza máxima requerida para ejecutar la operación.
- 19.27. Una operación de extrusión directa se ejecuta sobre un tocho cilíndrico con un diámetro inicial de 2.0 in y una longitud inicial de 4.0 in. El ángulo del troquel es de 60° y el diámetro del orificio es de 0.50 in. En la ecuación de Johnson $a = 0.8$ y $b = 1.5$. La operación se lleva a cabo en caliente y el metal caliente fluye a 13 000 lb/in² y no se endurece a la deformación cuando se calienta. *a*) ¿Cuál es la relación de extrusión? *b*) Determine la posición del pisón cuando el metal se comprime dentro del cono del troquel y empieza a extruir a través de la abertura del troquel, *c*) ¿cuál es la presión del pisón correspondiente a esta posición?, *d*) Asimismo, determine la longitud de la pieza final si el pisón detiene su movimiento hacia delante al inicio del cono del troquel.
- 19.28. Un proceso de extrusión indirecta empieza con un tocho de aluminio de 2.0 in de diámetro y 3.0 in de largo. La sección transversal final después de la extrusión es un cuadrado de 1.0 in por lado. El ángulo del troquel es de 90° . La operación se realiza en frío y el coeficiente de resistencia del metal es $K = 26\,000$ lb/in² y el coeficiente de endurecimiento por deformación $n = 0.20$. En la ecuación de deformación por extrusión de Johnson, $a = 0.8$ y $b = 1.2$. *a*) Calcule la relación de extrusión, la deformación real y la deformación por extrusión, *b*) ¿cuál es el factor de forma del producto?, *c*) si el tope que se deja en el recipiente al final de la carrera es de 0.5 in de grueso, ¿cuál es la longitud de la sección extruida?, *d*) determine la presión del pisón en el proceso.
- 19.29. Se extruye directamente un perfil estructural en forma de L a partir de un tocho de aluminio en el cual $L_o = 250$ mm y $D_o = 88$ mm. Las dimensiones de la sección transversal se dan en la figura P19.29. El ángulo del troquel es de 90° . Determine *a*) la relación de extrusión, *b*) el factor de forma, *c*) la longitud del perfil extruido si el tope remanente en el recipiente al final de la carrera del pisón es de 25 mm.

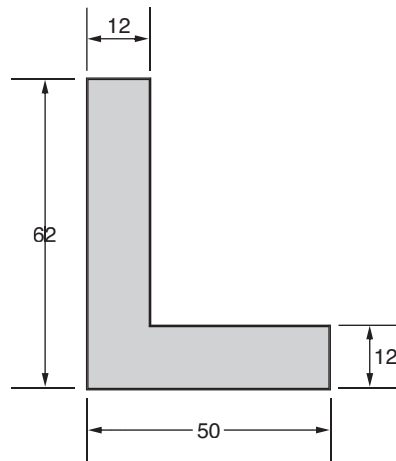


FIGURA P19.29 Pieza para el problema 19.29 (dimensiones en mm).

- 19.30. Los parámetros de la curva de fluencia para la aleación de aluminio del problema 21.29 son $K = 240$ MPa y $n = 0.16$. Si el ángulo del troquel en esta operación es de 90° y la correspondiente ecuación de deformación de Johnson tiene las constantes $a = 0.8$ y $b = 1.5$, calcule la fuerza máxima requerida para impulsar el pistón hacia el principio de la extrusión.
- 19.31. Una pieza en forma de copa se extruye hacia atrás a partir de un pedazo de aluminio que tiene 50 mm de diámetro. Las dimensiones finales de la copa son: DE = 50 mm, DI = 40

mm, altura = 100 mm y espesor de la base = 5 mm. Determine *a*) la relación de extrusión, *b*) el factor de forma, *c*) la altura del pedazo inicial requerido para lograr las dimensiones finales, *d*) si el metal tiene como parámetros de la curva de fluencia $K = 400$ MPa y $n = 0.25$, y las constantes de la ecuación de deformación por extrusión de Johnson son $a = 0.8$ y $b = 1.5$, determine la fuerza de extrusión.

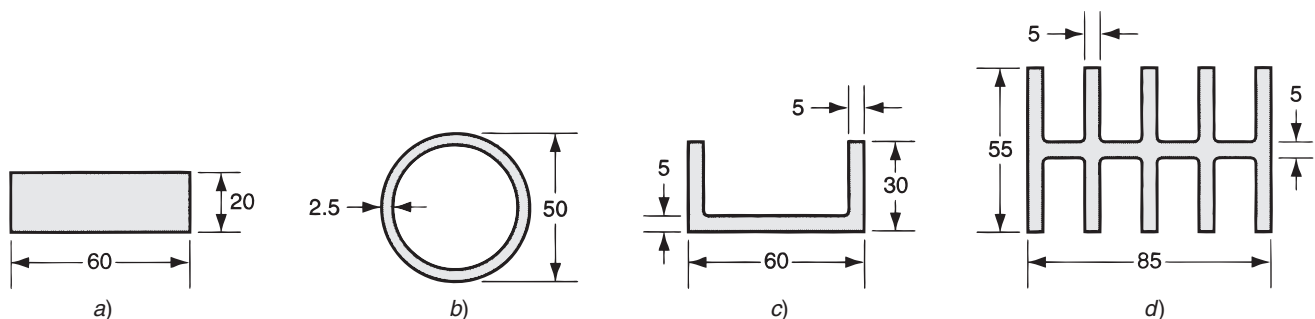
- 19.32. Determine el factor de forma para cada una de las formas del orificio de extrusión que se ilustran en la figura P19.32.

Estirado

- 19.33. Se estira un alambre con un diámetro inicial de 2.5 mm. Se estira por medio de un troquel con una abertura de 2.1 mm. El ángulo de entrada del troquel es de 18° . El coeficiente de fricción en la interfaz trabajo-troquel es de 0.08. El metal de trabajo tiene un coeficiente de resistencia de 450 MPa y un exponente de deformación por endurecimiento de 0.26. El estirado se lleva a cabo a temperatura ambiente. Determine *a*) el área de reducción, *b*) el esfuerzo de estirado y *c*) la fuerza de estirado requerida para la operación.

- 19.34. Un material en barra con un diámetro inicial de 0.5 in se estira mediante un troquel con un ángulo de entrada de 13° . El diámetro final de la barra es de 0.375 in. El metal tiene un coeficiente de resistencia de 40 000 lb/in² y un exponente de deformación por endurecimiento de 0.20. El coeficiente de fricción en la interfaz trabajo-troquel es de 0.1. Determine *a*) la reducción del área, *b*) la fuerza de estirado para la operación y *c*) los caballos de potencia para realizar la operación si la velocidad de salida es de 2 ft/s.

FIGURA P19.32 Formas de la sección transversal para el problema 19.32 (las dimensiones están dadas en milímetros); *a*) barra rectangular, *b*) tubo, *c*) canal y *d*) aletas de enfriamiento.



- 19.35. Un material en barra con un diámetro inicial de 90 mm se estira con un draft de 15 mm. El troquel de estirado tiene un ángulo de entrada de 18° y su coeficiente de fricción en la interfaz trabajo-troquel es de 18° . El metal se comporta como un material plástico perfecto con un esfuerzo a la fluencia de 105 MPa. Determine *a*) la reducción del área, *b*) el esfuerzo de estirado, *c*) la fuerza de estirado requerida para la operación y *d*) la potencia para realizar la operación si la velocidad de salida es de 1.0 m/min.
- 19.36. Un alambre cuyo diámetro inicial es de 0.125 in se estira a través de dos troqueles, produciendo cada troquel una re-

ducción de área de 0.20. El metal inicial tiene un coeficiente de resistencia de 40 000 lb/in² y un exponente de endurecimiento por deformación de 0.15. Cada troquel tiene un ángulo de entrada de 12° y el coeficiente de fricción en la interfaz trabajo-troquel se estima que tiene un valor de 0.10. Los motores que impulsan los cabestrantes a la salida del troquel pueden entregar 1.50 hp a 90% de eficiencia. Determine la velocidad máxima posible del alambre al salir del segundo troquel.

20

TRABAJADO METÁLICO DE LÁMINAS

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

- 20.1 Operaciones de corte
 - 20.1.1 Cizallado, punzonado y perforado
 - 20.1.2 Análisis de ingeniería del corte de láminas metálicas
 - 20.1.3 Otras operaciones de corte de láminas metálicas
- 20.2 Operaciones de doblado
 - 20.2.1 Doblado en V y doblado de bordes
 - 20.2.2 Análisis de ingeniería del doblado
 - 20.2.3 Otras operaciones de doblado y operaciones relacionadas con el formado.
- 20.3 Embutido
 - 20.3.1 Mecánica del embutido
 - 20.3.2 Análisis de ingeniería del embutido
 - 20.3.3 Otras operaciones de embutido
 - 20.3.4 Defectos del embutido
- 20.4 Otras operaciones de formado de láminas metálicas
 - 20.4.1 Operaciones realizadas con herramientas metálicas
 - 20.4.2 Procesos de formado con caucho
- 20.5 Troqueles y prensas para procesos con láminas metálicas
 - 20.5.1 Troqueles
 - 20.5.2 Prensas
- 20.6 Operaciones con láminas metálicas no realizadas en prensas
 - 20.6.1 Formado por estirado
 - 20.6.2 Doblado y formado con rodillos
 - 20.6.3 Rechazado
 - 20.6.4 Formado por alta velocidad de energía
- 20.7 Doblado de material tubular

El trabajo metálico de láminas incluye operaciones de corte y formado realizadas sobre láminas delgadas de metal. Los espesores del material típicos están entre 0.4 mm (1/64 de in) y 6 mm (1/4 de in). Cuando el espesor excede de 6 mm se le llama placa en lugar de lámina. El material de lámina o placa que se usa en el trabajo metálico de láminas se produce por laminado (sección 19.1).

La importancia comercial del trabajo con láminas es significativa. Considere el número de productos industriales y de consumo que incluyen piezas de lámina metálica: carrocerías de automóviles y camiones, aeroplanos, carros de ferrocarril y locomotoras, equipo de construcción y agrícola, utensilios pequeños y grandes, muebles y equipo de oficina, etcétera. Aunque estos ejemplos son obvios debido a que tienen lámina en su exterior, muchos componentes internos de estos productos se hacen también de láminas o placas. Las piezas de lámina de metal se caracterizan generalmente por su alta resistencia, buena precisión dimensional, buen acabado superficial y bajo costo relativo. Se pueden diseñar operaciones de producción masiva de lámina para grandes cantidades de componentes que se requieren en muchos de los productos arriba mencionados.

La mayoría de los procesos con láminas metálicas se realiza a temperatura ambiente (trabajo en frío), excepto cuando el material es grueso, frágil o la deformación es significativa. Éstos son los casos usuales de trabajo en caliente debajo de la temperatura de cristalización más que trabajo en caliente por encima de dicha temperatura.

Las tres grandes categorías de los procesos de láminas metálicas son: 1) corte, 2) doblado y 3) embutido. El corte se usa para separar láminas grandes en piezas menores, para cortar un perímetro o hacer agujeros en una pieza. El doblado y el embutido se usan para transformar láminas de metal en piezas de forma especial.

La mayoría de las operaciones con láminas metálicas se ejecutan en máquinas herramienta llamadas **prensas**. Se usa el término **prensa de estampado** para distinguir estas prensas de las prensas de forjado y extrusión. Las herramientas que se usan para realizar el trabajo en láminas se llaman **punzón y troquel**; también se usa el término **troquel estampado**. Los productos hechos de lámina se llaman **troquelados** o **estampados**. Para facilitar la producción en masa, las láminas de metal se introducen en las prensas frecuentemente en forma de tiras o rollos. En la sección 20.5 se describen varios tipos de herramientas de troquel y punzón, así como prensas de estampado. En las secciones finales del capítulo se describen varias operaciones que no utilizan las herramientas convencionales de punzón y troquel, muchas de las cuales no se realizan en prensas de estampado.

20.1 OPERACIONES DE CORTE

El corte de lámina se realiza por una acción de cizalla entre dos bordes afilados de corte. La acción de cizalla se describe en los cuatro pasos esquematizados en la figura 20.1, donde el borde superior de corte (el punzón) se mueve hacia abajo sobrepasando el borde estacionario inferior de corte (el troquel). Cuando el punzón empieza a empujar el trabajo, ocurre una **deformación plástica** en las superficies de la lámina; conforme éste se mueve hacia abajo, ocurre la **penetración**, en la cual comprime la lámina y corta el metal. Esta zona de penetración es generalmente una tercera parte del espesor de la lámina. A medida que el punzón continúa su viaje dentro del trabajo, se inicia la **fractura** en éste entre los dos bordes de corte. Si el espacio entre el punzón y el troquel es correcto, las dos líneas de fractura se encuentran y el resultado es una separación limpia de trabajo en dos piezas.

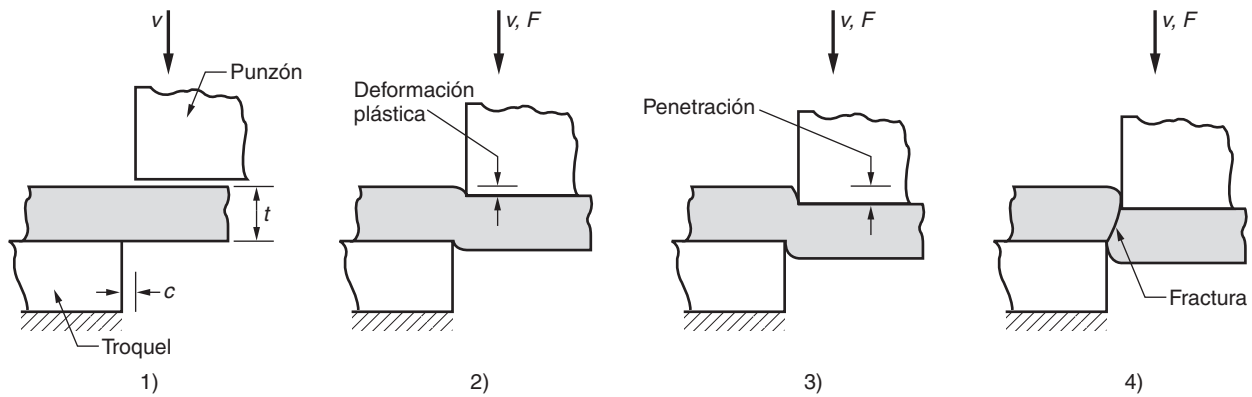


FIGURA 20.1 Cizallado o corte de una lámina metálica entre dos bordes cortantes: 1) inmediatamente antes de que el punzón entre en contacto con el material, 2) el punzón comienza a oprimir el trabajo causando deformación plástica, 3) el punzón comprime y penetra en el trabajo formando una superficie lisa de corte y 4) se inicia la fractura entre los dos bordes de corte opuestos que separan la lámina. Los símbolos v y F indican movimiento y fuerza aplicada, respectivamente, t = espesor del material, c = espacio.

Los bordes cizallados de la lámina tienen formas características que se muestran en la figura 20.2. Encima de la superficie de corte hay una región que se llama **redondeado**. Éste corresponde a la depresión hecha por el punzón en el trabajo antes de empezar el corte. Aquí es donde empieza la deformación plástica del trabajo: justo abajo del redondeado hay una región relativamente lisa llamado **bruñido**. Ésta resulta de la penetración del punzón en el material antes de empezar la fractura. Debajo del bruñido está la **zona de fractura**, una superficie relativamente tosca del borde de corte donde el movimiento continuo del punzón hacia abajo causa la fractura del metal. Por último, al fondo del borde está la **rebaba**, un filo causado por la elongación del metal durante la separación final de las dos piezas.

20.1.1 Cizallado, punzonado y perforado

Hay tres operaciones principales en el trabajo de prensa que cortan el metal por el mecanismo de cizalla que se acaba de describir: el cizallado, el punzonado y el perforado.

El **cizallado** es la operación de corte de una lámina de metal a lo largo de una línea recta entre dos bordes de corte, como se muestra en la figura 20.3. El cizallado se usa típicamente para reducir grandes láminas a secciones más pequeñas para operaciones posteriores de prensado. Se ejecuta en una máquina llamada **cizalla de potencia** o **cizalla recta**. La cuchilla superior de la cizalla de potencia está frecuentemente sesgada, como se muestra en la figura 20.3b, para reducir la fuerza requerida de corte.

El **punzonado** implica el corte de una lámina de metal a lo largo de una línea cerrada en un solo paso para separar la pieza del material circundante, como se muestra en la figura 20.4a). La pieza que se corta es el producto deseado en la operación y se designa como la **parte o pieza deseada**. El **perforado** es muy similar al punzonado, excepto porque la pieza que se corta se desecha y se llama **pedacería**. El material remanente es la pieza deseada. La distinción se ilustra en la figura 20.4b).

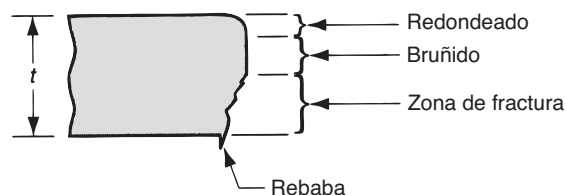
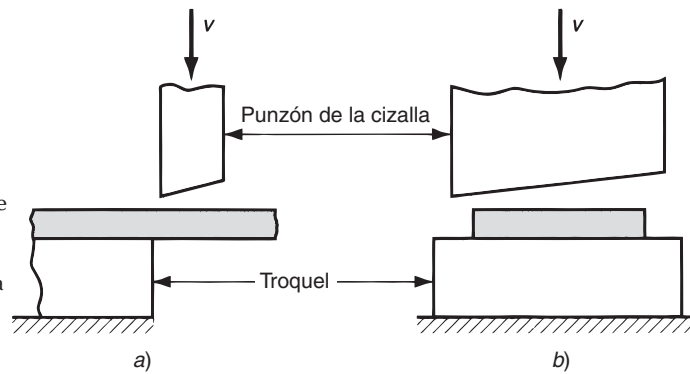


FIGURA 20.2 Bordes cizallados característicos del material de trabajo.

FIGURA 20.3 Operación de cizallado: a) vista lateral de la operación, b) vista frontal de la cizalla equipada con una cuchilla superior sesgada. El símbolo v indica movimiento.



20.1.2 Análisis de ingeniería del corte de láminas metálicas

Los parámetros importantes en el corte de láminas metálicas son el espacio entre el punzón y el troquel, el espesor del material, el tipo de metal y su resistencia, y la longitud del corte. A continuación se examinan algunos aspectos relacionados.

Espacio En una operación, el **espacio** c es la distancia entre el punzón y el troquel, tal como se muestra en la figura 20.1a). Los espacios típicos en el prensado convencional fluctúan entre 4 y 8% del espesor de la lámina metálica t . El efecto de los espacios inapropiados se ilustra en la figura 20.5. Si el espacio es demasiado pequeño, las líneas de fractura tienden a pasar una sobre otra, causando un doble bruñido y requiriendo mayor fuerza de corte. Si éste es demasiado grande, los bordes de corte pellizcan el metal y da por resultado una rebaba excesiva. En operaciones especiales que requieren bordes muy rectos, como en el rasurado y el perforado (sección 20.1.3), el espacio es solamente 1% del espesor del material.

El espacio correcto depende del tipo de lámina y su espesor. El que se recomienda se puede calcular mediante la fórmula siguiente:

$$C = A_c t \quad (20.1)$$

donde c = espacio, mm (in); A_c = tolerancia del espacio; y t = espesor del material, mm (in). La tolerancia se determina de acuerdo con el tipo de material. Los materiales se clasifican por conveniencia en tres grupos dados en la tabla 20.1, con un valor de tolerancia asociado a cada grupo.

Los valores calculados del espacio se pueden aplicar al punzonado convencional y a las operaciones de perforado de agujeros para determinar los tamaños del punzón y del troquel adecuados. Es evidente que la abertura del troquel debe ser siempre más grande que el tamaño del punzón. La adición del valor del espacio al tamaño del troquel o su resta del

FIGURA 20.4 a) Punzonado y b) perforado.

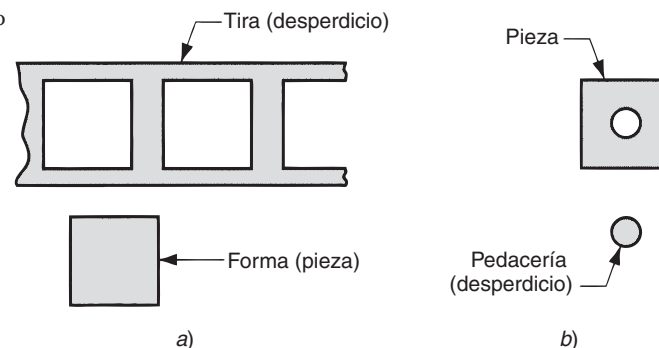
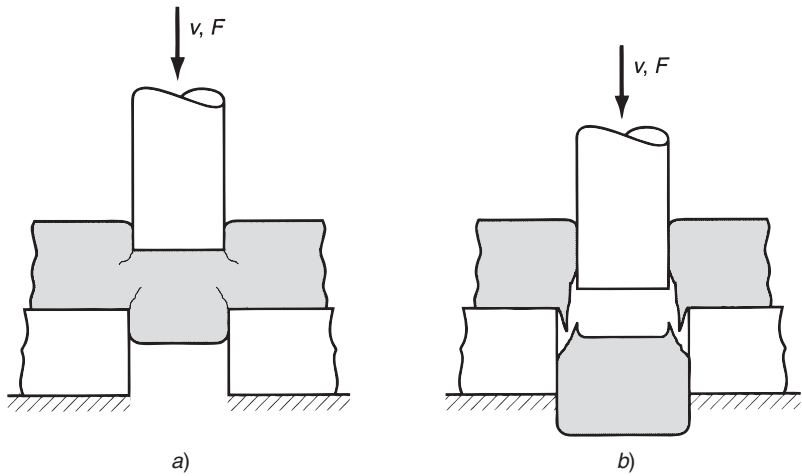


FIGURA 20.5 Efecto del espacio: a) uno demasiado pequeño ocasiona una fractura poco menos que óptima y fuerzas excesivas, b) uno demasiado grande ocasiona rebaba más grande. Los símbolos v y F indican movimiento y fuerza aplicada, respectivamente.



tamaño del punzón depende de que la pieza que se corta sea un disco o pedacería, como se ilustra en la figura 20.6, para una pieza circular. Debido a la forma del borde cizallado, la dimensión exterior de la pieza que se corta de la lámina será más grande que el tamaño del agujero; por tanto, el tamaño del punzón y del troquel para una forma o pieza redonda de diámetro D_b se determina como sigue:

$$\text{Diámetro del punzón de corte de formas} = D_b - 2c \tag{20.2a}$$

$$\text{Diámetro del troquel de corte de formas} = D_b \tag{20.2b}$$

Los tamaños del troquel y del punzón para un agujero redondo de diámetro D_h se determinan como sigue:

$$\text{Diámetro del punzón para corte de agujeros} = D_h \tag{20.3a}$$

$$\text{Diámetro del troquel para corte de agujeros} = D_h + 2c \tag{20.3b}$$

Para que las formas o la pedacería caigan a través del troquel, la abertura de éste debe tener un **espacio angular** entre 0.25° y 1.5° de cada lado. El espacio angular se muestra en la figura 20.7.

Fuerzas de corte Es importante estimar la fuerza de corte porque ésta determina el tamaño (tonelaje) de la prensa necesaria. La fuerza de corte F en el trabajo de láminas puede determinarse por:

$$F = StL \tag{20.4}$$

donde S = resistencia al corte de la lámina, MPa (lb/in²); t = espesor del material, mm (in) y L = longitud del borde de corte, mm (in). En el punzonado, perforado, rasurado y operaciones similares, L es la longitud del perímetro de la forma o agujero que se corta. En la determinación de L se puede anular el efecto menor del espacio.

TABLA 20.1 Valor de las tolerancias para los tres grupos de láminas metálicas.

Grupo metálico	A_c
Aleaciones de aluminio 1100S y 5052S, todos los temple	0.045
Aleaciones de aluminio 2024ST y 6061ST; latón, todos los temple; acero suave laminado en frío; acero inoxidable frío	0.060
Acero laminado en frío, dureza media; acero inoxidable, dureza media y alta	0.075

Recopilado de [2].

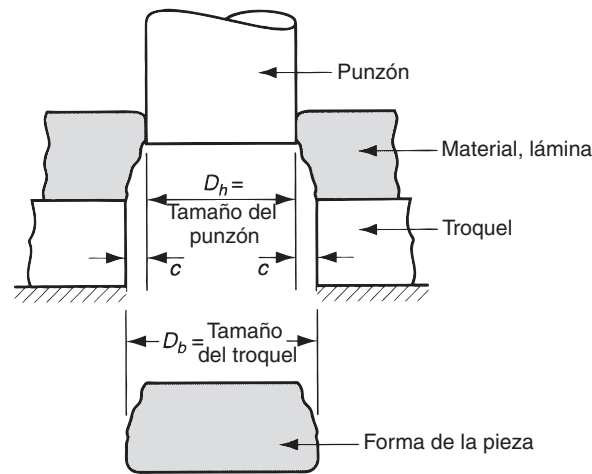


FIGURA 20.6 El tamaño del troquel determina el tamaño de la forma D_b ; el tamaño del punzón determina el tamaño del agujero D_h ; c = Espacio.

Si se desconoce la resistencia al corte, se puede estimar la fuerza de corte mediante el uso de la resistencia a la tensión, de la siguiente manera:

$$F = 0.7 TS L$$

donde TS = resistencia última a la tensión, MPa (lb/in²).

En las ecuaciones anteriores para estimar la fuerza de corte, se supone que el corte entero se hace al mismo tiempo a todo lo largo L del borde de corte. En este caso la fuerza de corte será un máximo. Es posible reducir la fuerza máxima usando un borde de corte sesgado en el punzón o en el troquel, como se muestra en la figura 20.3b). El ángulo (llamado **ángulo de corte**) distribuye el corte en el tiempo y reduce la fuerza que se experimenta a cada momento. De cualquier manera, la energía total requerida en la operación es la misma, ya sea que se concentre en un breve momento o se distribuya sobre un periodo más largo.

EJEMPLO 20.1 Espacio en el punzonado y fuerza

Se corta un disco de 150 mm de diámetro de una tira de acero de 3.2 mm, laminado en frío medio endurecido, cuya resistencia al corte es de 310 MPa. Determine: a) los diámetros apropiados del punzón y del troquel y b) la fuerza del punzonado.

Solución: a) La tolerancia del espacio para acero laminado en frío de dureza media es $A_c = 0.075$. Por consiguiente, el espacio es:

$$c = 0.075(3.2 \text{ mm}) = \mathbf{0.24 \text{ mm}}$$

El disco tendrá un diámetro de 150 mm y el tamaño del troquel determina el tamaño de la forma; por tanto,

$$\text{Diámetro de la abertura del troquel} = \mathbf{150.00 \text{ mm}}$$

$$\text{Diámetro del punzón} = 150 - 2(0.24) = \mathbf{149.52 \text{ mm}}$$

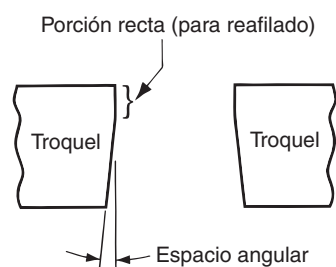


FIGURA 20.7 Espacio angular.

b) Para determinar la fuerza de punzonado, se supone que el perímetro entero de la forma se corta en una sola operación. La longitud del borde de corte es:

$$L = \pi D_b = 150\pi = 471.2 \text{ mm}$$

y la fuerza es:

$$F = 310(471.2)(3.2) = 467\,469 \text{ N} \text{ (Esto es aproximadamente igual a 53 tons)}$$

20.1.3 Otras operaciones de corte de láminas metálicas

Además del cizallado, punzonado y perforado, hay algunas otras operaciones de corte en el prensado. El mecanismo de corte en cada caso involucra las mismas operaciones de corte analizadas previamente.

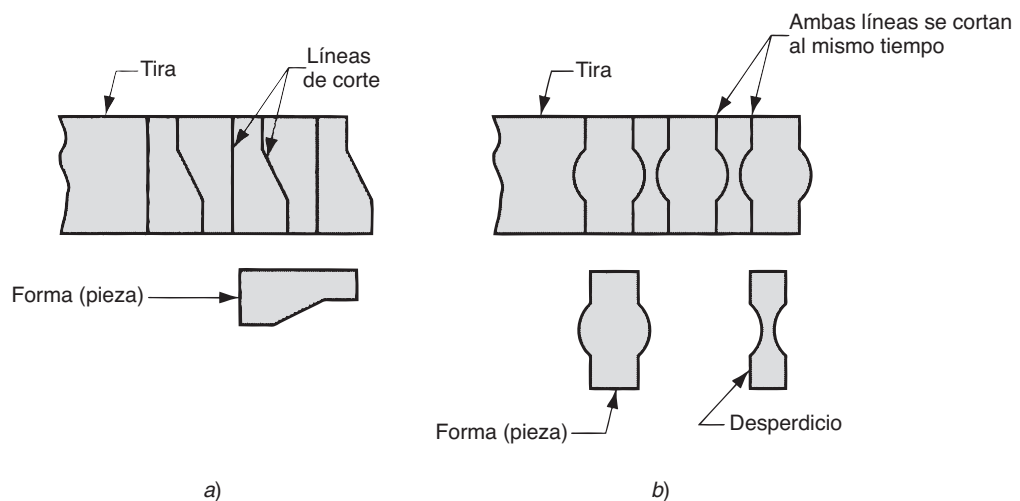
Corte en trozos y partición El **corte** en trozos es una operación de corte en el que las piezas se separan de una tira de lámina metálica cortando los troqueles opuestos de la pieza en secuencia, como se muestra en la figura 20.8a). Cada corte produce una nueva pieza. Las características que distinguen la operación de corte en trozos del corte convencional son: 1) los bordes de corte no son necesariamente rectos, y 2) las piezas se pueden empalmar en la tira de tal manera que se evite el desperdicio.

La **partición** involucra el corte de una tira de lámina de metal por un punzón con dos bordes de corte que coinciden con los lados opuestos de la pieza, como se muestra en la figura 20.8b). Esto puede requerirse cuando los contornos de la pieza tienen forma irregular que impiden su empalme perfecto en la tira. La partición es menos eficiente que el corte en trozos debido a que produce algún material de desperdicio.

Ranurado, perforado múltiple y muescado El término **ranurado** se usa algunas veces para la operación de punzonado en la cual se corta un agujero rectangular o alargado, como se muestra en la figura 20.9a). El **perforado** múltiple involucra la perforación simultánea de varios agujeros en una lámina de metal, como se muestra en la figura 20.9b). El patrón de agujeros tiene generalmente propósitos decorativos o para permitir el paso de luz, gases o fluidos.

Para obtener el contorno deseado de una forma, se cortan frecuentemente porciones de lámina por muescado o semimuescado. El **muescado** es el corte de una porción del metal en un lado de la lámina o tira. El **semimuescado** recorta una porción del metal del

FIGURA 20.8 a) Corte en trozos y b) partición.



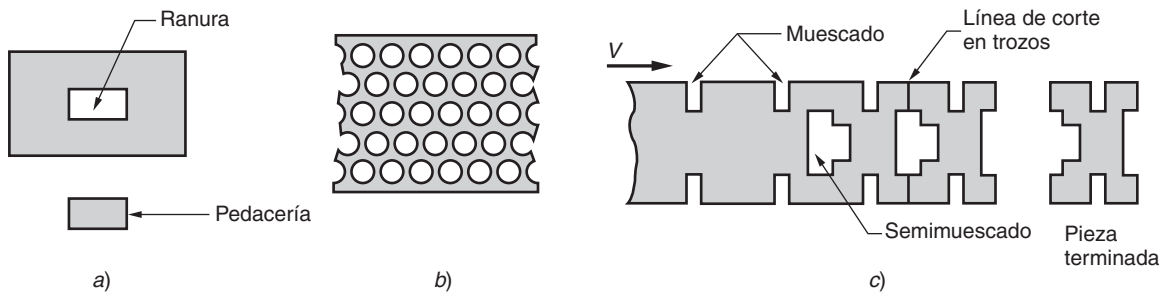


FIGURA 20.9 a) Ranurado, b) perforado múltiple, c) muescado y semimuescado. El símbolo v indica movimiento de la tira.

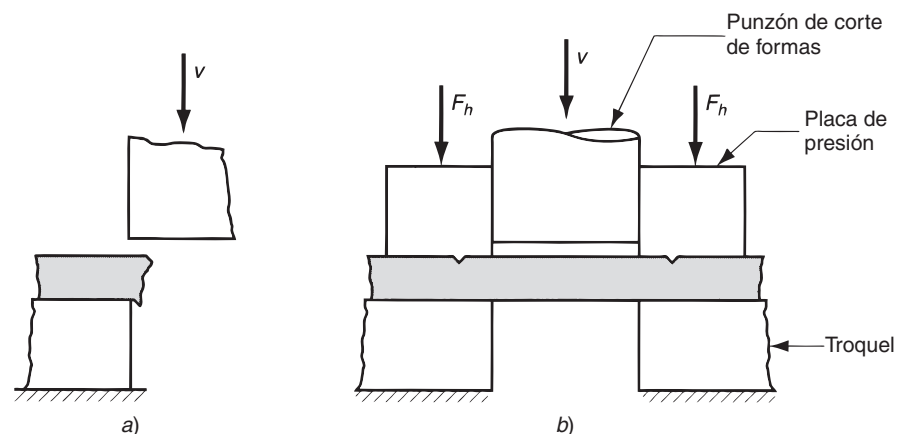
interior de la lámina. Estas operaciones se describen en la figura 20.9c). Al lector le parecerá que el semimuescado es lo mismo que la operación de perforado o ranurado. La diferencia es que el metal removido por el semimuescado crea parte del contorno de la pieza, mientras que el perforado y el ranurado genera agujeros en la forma o pieza.

Recorte, rasurado y punzonado fino El **recorte** es una operación de corte que se realiza en una pieza ya formada para remover el exceso de metal y fijar su tamaño. El término tiene aquí el mismo significado que en forjado (sección 19.4). Un ejemplo típico en el trabajo de láminas es el recorte de la porción superior de una copa hecha por embutido profundo para fijar la dimensión deseada.

El **rasurado** es una operación de corte realizada con un espacio muy pequeño destinada a obtener dimensiones precisas y bordes lisos y rectos, tal como se muestra en la figura 20.10a). El rasurado es una operación secundaria típica o de acabado que se aplica sobre piezas que han sido cortadas previamente.

El **punzonado fino** es una operación de cizallado que se usa para cortar piezas con tolerancias muy estrechas y obtener bordes rectos y lisos en un solo paso. La disposición típica para esta operación se ilustra en la figura 20.10b). Al principio del ciclo, una placa de presión con salientes en forma de V aplica una fuerza de sujeción F_h contra la lámina adyacente al punzón, a fin de comprimir el metal y prevenir la distorsión. El punzón desciende entonces con una velocidad más baja de lo normal y con espacios más reducidos para producir las dimensiones y los bordes de corte deseados. El proceso se reserva usualmente para espesores relativamente pequeños del material.

FIGURA 20.10 a) Rasurado y b) Punzonado fino. Los símbolos v = velocidad del punzón y F_h = fuerza de sujeción de la forma.



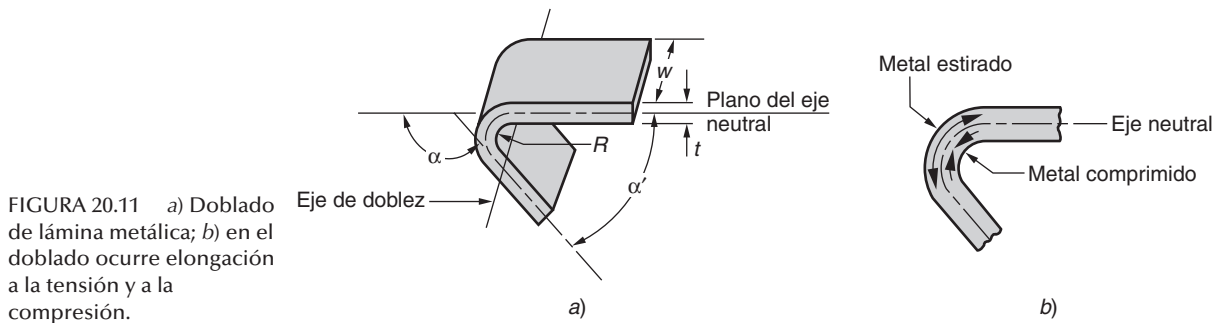


FIGURA 20.11 a) Doblado de lámina metálica; b) en el doblado ocurre elongación a la tensión y a la compresión.

20.2 OPERACIONES DE DOBLADO

En el trabajo de láminas metálicas, el **doblado** se define como la deformación del metal alrededor de un eje recto, como se muestra en la figura 20.11. Durante la operación de doblado, el metal dentro del plano neutral se comprime, mientras que el metal por fuera del plano neutral se estira. Estas condiciones de deformación se pueden ver en la figura 20.11b). El metal se deforma plásticamente, así que el doblez toma una forma permanente al remover los esfuerzos que lo causaron. El doblado produce poco o ningún cambio en el espesor de la lámina metálica.

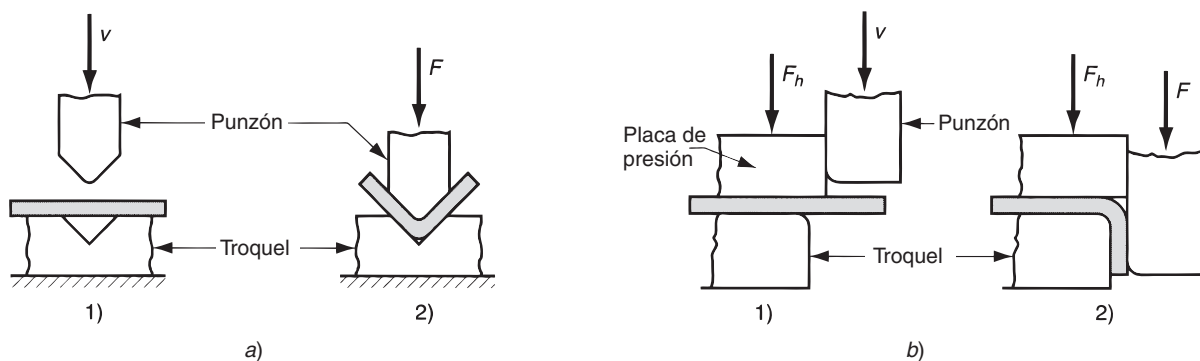
20.2.1 Doblado en V y doblado de bordes

Las operaciones de doblado se realizan usando como herramienta de trabajo diversos tipos de punzones y troqueles. Los dos métodos de doblado más comunes y sus herramientas asociadas son el doblado en V, ejecutado con un troquel en V; y el doblado de bordes, ejecutado con un troquel deslizante. Estos métodos se ilustran en la figura 20.12.

En el **doblado en V**, la lámina de metal se dobla entre un punzón y un troquel en forma de V. Los ángulos incluidos, que fluctúan desde los muy obtusos hasta los muy agudos, se pueden hacer con troqueles en forma de V. El doblado en V se usa por lo general para operaciones de baja producción y se realiza frecuentemente en una prensa de cortina (sección 20.5.2); los correspondientes troqueles en V son relativamente simples y de bajo costo.

El **doblado de bordes** involucra una carga voladiza sobre la lámina de metal. Se usa una placa de presión que aplica una fuerza de sujeción F_h para sostener la base de la pieza contra el troquel, mientras el punzón fuerza la pieza volada para doblarla sobre el borde de un troquel. En un arreglo que se ilustra en la figura 20.12b), el doblado se limita a ángu-

FIGURA 20.12 Dos métodos comunes de doblado: a) doblado en V y b) doblado de bordes; 1) antes y 2) después del doblado. Los símbolos v = movimiento, F = fuerza de doblez aplicada, F_h = fuerza de sujeción.



los de 90° o menores. Se puede diseñar troqueles deslizantes más complicados para ángulos mayores de 90°. Debido a la placa de presión, los troqueles deslizantes son más complicados y más costosos que los troqueles en V y se usan generalmente para trabajos de alta producción.

20.2.2 Análisis de la ingeniería del doblado

Algunos términos importantes del doblado se identifican en la figura 20.11. El metal, cuyo espesor es igual a t , se dobla a través de un ángulo, llamado ángulo de doblado α . El resultado es una lámina de metal con un ángulo incluido α' , tal que $\alpha + \alpha' = 180^\circ$. El radio del doblez R se especifica normalmente en la parte interna de la pieza, en lugar de sobre el eje neutral, y se determina por el radio de la herramienta que se usa para ejecutar la operación. El doblado se hace sobre el ancho de la pieza de trabajo w .

Tolerancia de doblado Si el radio del doblado es pequeño respecto al espesor del material, el metal tiende a estirarse durante el doblado. Es importante poder estimar la magnitud del estirado que ocurre, de manera que la longitud de la pieza final pueda coincidir con la dimensión especificada. El problema es determinar la longitud del eje neutral antes del doblado, para tomar en cuenta el estirado de la sección doblada final. Esta longitud se llama **tolerancia de doblado** y se puede estimar como sigue:

$$A_b = 2\pi \frac{\alpha}{360} (R + K_{ba}t) \quad (20.6)$$

donde A_b = tolerancia de doblado, mm (in); α = ángulo de doblado en grados; R = radio de doblado, mm (in); t = espesor del material, mm (in); y K_{ba} es un factor para estimar el estirado. Los siguientes valores de diseño se recomiendan para K_{ba} [2]: si $R < 2t$, $K_{ba} = 0.33$; y si $R \geq 2t$, $K_{ba} = 0.50$. Estos valores de K_{ba} predicen que el estiramiento ocurre solamente si el radio de doblado es más pequeño en relación con el espesor de la lámina.

Recuperación elástica Cuando la presión de doblado se retira al terminar la operación de deformación, la energía elástica permanece en la pieza doblada haciendo que ésta recobre parcialmente su forma original. Esta recuperación se conoce como **recuperación elástica** y se define como el incremento del ángulo comprendido por la pieza doblada en relación con el ángulo comprendido por la herramienta formadora después de que ésta se retira. Esto se ilustra en la figura 20.13 y se expresa como:

$$SB = \frac{\alpha' - \alpha'_i}{\alpha'_i} \quad (20.7)$$

FIGURA 20.13 La recuperación elástica en el doblado se muestra como una disminución en el ángulo de doblado y un incremento del radio de doblado: 1) durante la operación, el trabajo es forzado a tomar el radio R_t y el ángulo incluido α'_b ; ambos están determinados por la herramienta de doblado (punzón de doblado en V); 2) una vez que se retira el punzón, el material regresa al radio R y al ángulo incluido α' . El símbolo F = fuerza de doblado aplicada.

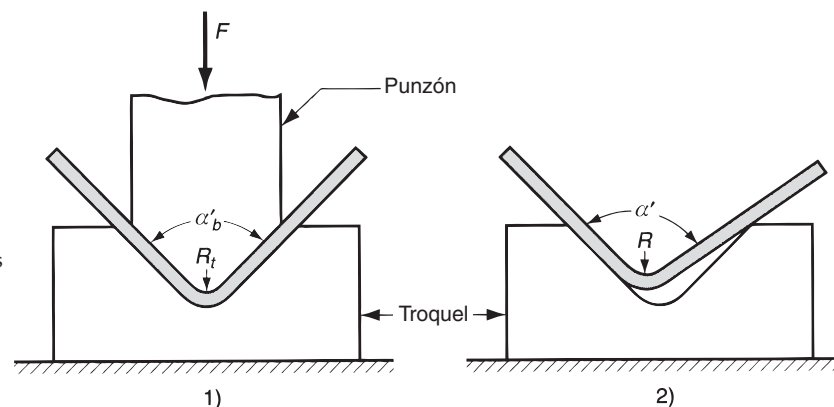
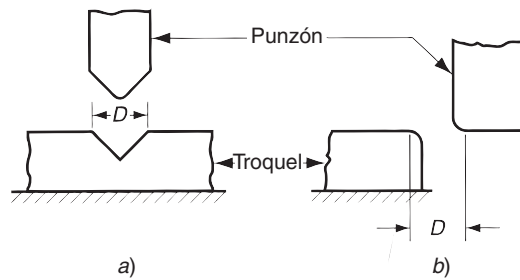


FIGURA 20.14 Dimensión de la abertura del troquel D : a) troquel en V, y b) troquel deslizante.



donde SB = recuperación elástica; α' = ángulo comprendido por la lámina de metal, en grados; y α'_t = ángulo comprendido por la herramienta de doblado en grados. Aunque no tan obvio, ocurre un incremento en el radio de doblado debido a la recuperación elástica. La magnitud de la recuperación elástica se incrementa con el módulo de elasticidad E y la resistencia de la fluencia Y del metal de trabajo.

Se puede lograr una compensación para la recuperación elástica por varios métodos. Dos métodos comunes son el sobredoblado y el fondeado. En el **sobredoblado**, el ángulo del punzón y su radio se fabrican ligeramente menores que el ángulo especificado en la pieza final, de manera que la lámina regrese al valor deseado. El **fondeado** involucra comprimir la pieza al final de la carrera, deformándola plásticamente en la región de doblado.

Fuerza de doblado La fuerza que se requiere para realizar el doblado depende de la forma del punzón y del troquel, así como de la resistencia, espesor y ancho de la lámina de metal que se dobla. La fuerza máxima de doblado se puede estimar por medio de la siguiente ecuación:

$$F = \frac{K_{bf} TS w t^2}{D} \quad (20.8)$$

donde F = fuerza de doblado, N (lb); TS = resistencia a la tensión del metal en lámina, MPa (lb/in²); w = ancho de la pieza en la dirección del eje de doblez, mm (in); t = espesor del material o la pieza, mm (in); y D = dimensión del troquel abierto en mm (in), como se definió en la figura 20.14, mm (in). En mecánica, la ecuación 20.8 se basa en el doblado de una viga simple, y K_{bf} es una constante que considera las diferencias encontradas en un proceso real de doblado. Su valor depende del tipo del doblado; para doblado en V, $K_{bf} = 1.33$, y para doblado de bordes, $K_{bf} = 0.33$.

EJEMPLO 20.2 Doblado de lámina metálica

Se dobla una pieza de lámina de metal como se muestra en la figura 20.15. El metal tiene un módulo de elasticidad = 205 (10³) MPa, resistencia a la fluencia = 275 MPa y resistencia a la tensión = 450 MPa. Determine a) el tamaño inicial de la pieza y b) la fuerza de doblado, si se usa un troquel en V con una dimensión de abertura del troquel = 25 mm.

Solución: a) La pieza inicial = 44.5 mm de ancho. Su longitud = 38 + A_b + 25 (mm). Como se muestra, para un ángulo incluido $\alpha' = 120^\circ$, el ángulo de doblado = 60° . En la ecuación 20.6 el valor de $K_{ba} = 0.33$

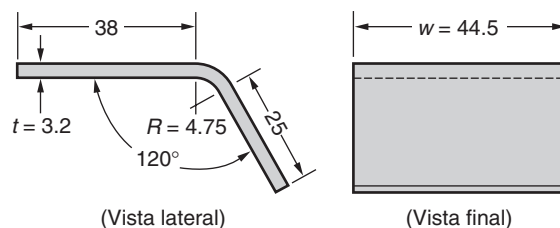
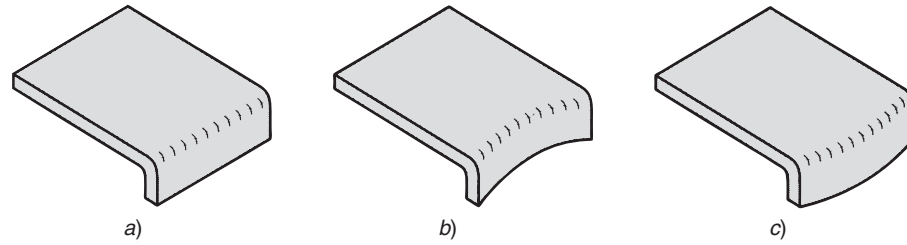


FIGURA 20.15 Pieza de hoja metálica del ejemplo 20.2 (dimensiones en mm).

FIGURA 20.16 Formado de bridas: a) bridado recto, b) bridado estirado y c) bridado contraído.



ya que $R/t = 4.75/3.2 = 1.48$ (menor que 2.0).

$$A_b = 2\pi \frac{60}{360} (4.75 + 0.33 \times 3.2) = 6.8 \text{ mm}$$

La longitud de la pieza es entonces $38 + 6.08 + 25 = 69.08 \text{ mm}$.

b) La fuerza se obtiene de la ecuación 20.8, usando $K_{bf} = 1.33$.

$$F = \frac{1.33(450)(44.5)(3.2)^2}{2.5} = 10\,909 \text{ N}$$

20.2.3 Otras operaciones de doblado y operaciones relacionadas con el formado

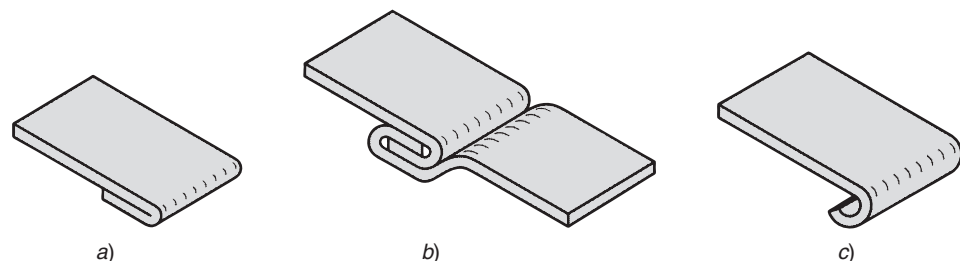
Se dispone de otras operaciones de doblado adicional, además de las de doblado en V y doblado de bordes. Algunas de éstas involucran el doblado sobre ejes curvos en lugar de ejes rectos, o tienen otras características que se diferencian de las operaciones básicas descritas anteriormente.

Formado de bridas, doblez, engargolado y rebordeado El **formado de bridas** es una operación en la cual el filo de la lámina de metal se doble en un ángulo de 90° para formar un borde. Se usa frecuentemente para reforzar o dar rigidez a la pieza de lámina metálica. El borde se puede formar en un doblez sobre un eje recto, como se ilustra en la figura 20.16a), o puede involucrar algunos estiramientos o contracciones del metal, como en los incisos b) y c).

El **doble** involucra el doblado del borde de la lámina sobre sí misma en más de un paso de doblado. Esto se hace frecuentemente para eliminar el borde agudo de la pieza, a fin de incrementar la rigidez y mejorar su apariencia. El **engargolado** o **empate** es una operación relacionada en la cual se ensamblan dos bordes de láminas metálicas. El doblez y el engargolado se ilustran en la figura 20.17a) y b).

En el **rebordeado**, también llamado **formado de molduras**, los bordes de la pieza se producen en forma de rizo o rollo, como se muestra en la figura 20.17c). Tanto esta operación como el doblez se hacen con fines de seguridad, resistencia y estética. Algunos ejemplos de productos en los cuales se usa el rebordeado incluyen bisagras, ollas, sartenes y cajas para relojes de bolsillo. Estos ejemplos demuestran que el rebordeado se puede ejecutar sobre ejes rectos o curvos.

FIGURA 20.17 a) Doble, b) engargolado (empate) y c) rebordeado.



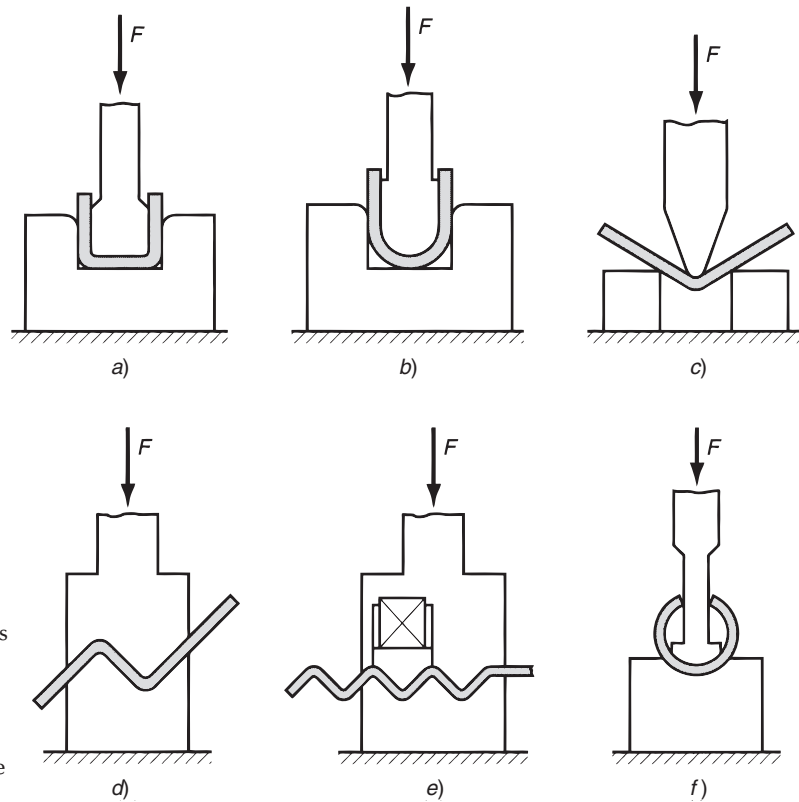


FIGURA 20.18 Operaciones misceláneas de doblado: a) doblado en canal, b) doblado en U, c) doblado al aire, d) doblado escalonado, e) corrugado y f) formado de tubo. F = fuerza aplicada.

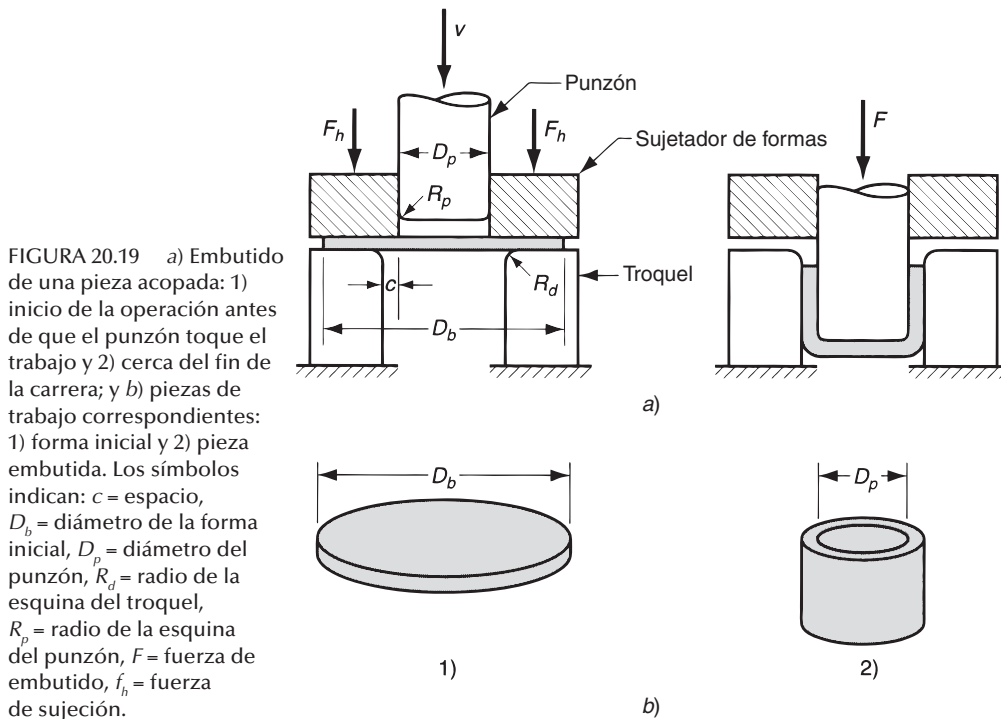
Operaciones misceláneas de doblado En la figura 20.18 se muestran algunas otras operaciones de doblado para ilustrar varias formas en las que se puede doblar una lámina. La mayoría de estas operaciones se realiza en troqueles relativamente simples y similares a los troqueles en V.

20.3 EMBUTIDO

El embutido es una operación de formado de láminas metálicas que se usa para hacer piezas de forma acopada, de caja y otras formas huecas más complejas. Se realiza colocando una lámina de metal sobre la cavidad de un troquel y empujando el metal hacia la cavidad de éste con un punzón, como se muestra en la figura 20.19. La forma debe aplanarse contra el troquel por un sujetador de formas. Las piezas comunes que se hacen por embutido son latas de bebidas, casquillos de municiones, lavabos, utensilios de cocina y piezas para carrocería de automóviles.

20.3.1 Mecánica del embutido

El embutido de piezas acopladas es la operación básica del embutido, con las dimensiones y los parámetros que se muestran en la figura 20.19. Se embute un disco de diámetro D_b dentro de un troquel por medio de un punzón de diámetro D_p . El punzón y el troquel deben tener un radio en las esquinas determinado por R_p y R_d . Si el punzón y el troquel tienen esquinas agudas (R_p y $R_d = 0$), se realizará una operación de perforado de un agujero en lugar de una operación de embutido. Los lados del punzón y del troquel



están separados por un espacio c . Éste es aproximadamente 10% mayor que el espesor del material en embutido:

$$C = 1.1 t \quad (20.9)$$

El punzón aplica una fuerza hacia abajo F para realizar la deformación del metal, y el sujetador de piezas o de formas aplica una fuerza de sujeción hacia abajo F_h , como se muestra en el diagrama.

Conforme el punzón se recorre hacia abajo, hasta su posición final, la pieza de trabajo experimenta una serie compleja de esfuerzos y deformaciones al tomar gradualmente la forma definida por el punzón y la cavidad del troquel. Las etapas en el proceso de deformación se ilustran en la figura 20.20. Cuando el punzón empieza a empujar el trabajo, sujeta al metal a una operación de **doblado**. La lámina es doblada simplemente sobre la esquina del punzón y la esquina del troquel, como se muestra en la figura 20.20(2). El perímetro exterior de la forma se mueve hacia el centro en esta primera etapa pero sólo ligeramente.

A medida que el punzón avanza, ocurre una acción de **enderezado** del metal que fue previamente doblado sobre el radio del troquel, figura 20.20(3). El metal en el fondo de la copa, así como a lo largo del radio del punzón, se ha movido hacia abajo junto con el punzón, pero el metal que se había doblado sobre el radio del troquel debe enderezarse para que pueda jalarsse dentro del espacio y formar la pared del cilindro. En este punto se necesita más metal para remplazar al que ahora forma la pared del cilindro. Este nuevo metal viene del borde exterior de la forma original. El metal en la porción exterior de la forma se jala o **embute** hacia la apertura del troquel para sustituir al metal previamente doblado y enderezado que ahora forma la pared del cilindro. De este tipo de flujo de metal a través de un espacio restringido es de donde toma su nombre el proceso de embutido.

Durante esta etapa del proceso, la fricción y la compresión juegan papeles importantes en la brida de la pieza. Para que el material de la brida se mueva hacia la apertura del troquel, debe superar la **fricción** entre la lámina de metal y las superficies del sujetador y del troquel. Inicialmente se involucra la fricción estática hasta que el metal

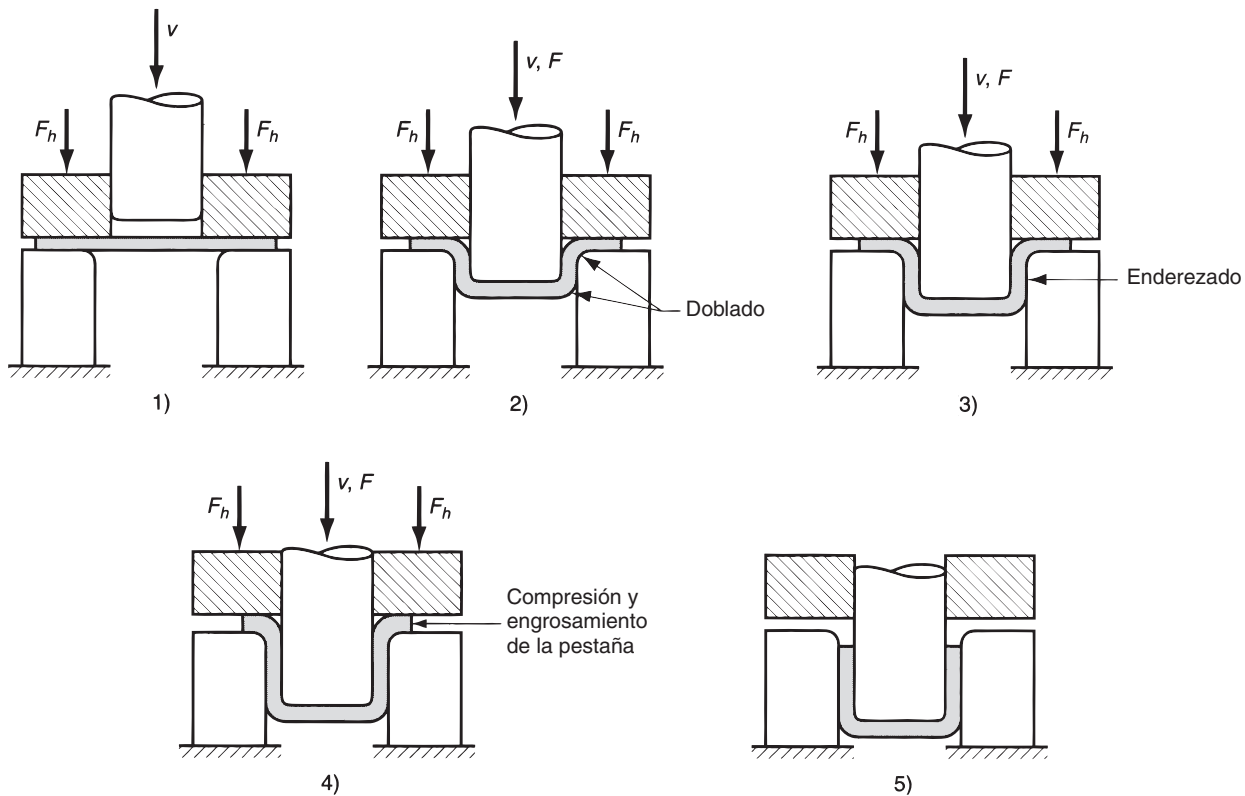


FIGURA 20.20 Etapas en la deformación del material de trabajo en el embutido profundo: 1) el punzón entra en contacto con el trabajo, 2) doblado, 3) enderezado, 4) fricción y compresión, y 5) forma final de copa, que muestra los efectos del adelgazamiento en las paredes de la copa. Los símbolos indican: v = movimiento del punzón, F = fuerza del punzón, F_h = fuerza del sujetador de formas.

empieza a moverse; cuando empieza el flujo de metal, la fricción dinámica gobierna el proceso. La magnitud de la fuerza de sujeción aplicada por el sujetador, así como las condiciones de fricción de las dos interfaces, son factores que determinan el éxito de este aspecto de la operación de embutido. Generalmente se usan lubricantes o compuestos para reducir las fuerzas de fricción durante el embutido. Además de la fricción, ocurre también la **compresión** en las pestañas exteriores de la forma. A medida que el metal de esta porción de la forma se estira hacia el centro, el perímetro exterior se hace menor. Debido a que el volumen del metal permanece constante, el metal se comprime y se hace más grueso al reducirse el perímetro. Esto ocasiona frecuentemente el arrugado de la brida remanente de la pieza o forma, especialmente cuando la lámina es delgada o cuando la fuerza del sujetador es demasiado baja. Esta condición no puede corregirse una vez que ha ocurrido. Los efectos de la fricción y de la compresión se ilustran en la figura 20.20(4).

La fuerza de sujeción aplicada sobre la forma se ve ahora como un factor crítico en el embutido profundo. Si ésta es muy pequeña, ocurre el arrugamiento; si es muy grande, evita que el metal fluya adecuadamente hacia la cavidad del troquel, ocasionando estiramiento y posible desgarramiento de la lámina de metal. La determinación de la fuerza adecuada de sujeción implica un delicado balance entre estos factores opuestos.

El movimiento progresivo del punzón hacia abajo ocasiona la continuación del flujo de metal, causado por el estirado y la compresión que se han descrito previamente. Ocurre además cierto **adelgazamiento** de las paredes del cilindro, como en la figura 20.20(5). A la fuerza que aplica el punzón se opone la del metal, en forma de deformación y fricción durante la operación. Una parte de la deformación involucra estiramiento y adelgazamiento del metal al ser jalado sobre el borde de la abertura del troquel. En una operación exitosa

de embutido puede ocurrir hasta 25% de adelgazamiento, la mayor parte cerca de la base de la copa.

20.3.2 Análisis de ingeniería del embutido

Es importante valorar las limitaciones sobre la magnitud que puede alcanzar el embutido. A menudo algunas medidas simples que pueden calcularse fácilmente para una determinada operación sirven como guía. Además, la fuerza de embutido y la fuerza de sujeción son variables importantes del proceso. Por último, debe determinarse el tamaño de la forma inicial.

Medidas de embutido Una medida de la severidad de una operación de embutido profundo es la **relación de embutido** DR . Ésta se define más fácilmente para una forma cilíndrica como la relación entre el diámetro de la forma inicial D_b y el diámetro del punzón D_p . En forma de ecuación,

$$DR = \frac{D_b}{D_p} \quad (20.10)$$

La relación de embutido proporciona un indicativo, aunque crudo, de la severidad de una determinada operación de embutido. A mayor relación, mayor severidad de la operación. Un límite superior aproximado de la relación de embutido es un valor de 2.0. El valor limitante real para una operación depende del radio de las esquinas en el punzón y el troquel (R_p y R_d), de las condiciones de fricción, de la profundidad de embutido y de las características de la lámina de metal (por ejemplo, ductilidad y grado de direccionalidad de las propiedades de resistencia en el metal).

Otra forma de caracterizar una operación dada de embutido es por la **reducción** r , donde:

$$r = \frac{D_b - D_p}{D_b} \quad (20.11)$$

está vinculada muy estrechamente con la relación de embutido. Consistente con el límite previo de DR ($DR \leq 2.0$), el valor de la reducción r debe ser menor que 0.50.

Una tercera medida en el embutido profundo es la **relación de espesor al diámetro** t/D_b (espesor de la forma inicial t dividido entre el diámetro de la forma D_b), cuyo valor en porcentaje es recomendable que sea mayor que 1%. Conforme decrece t/D_b , aumenta la tendencia al arrugamiento (sección 20.3.4).

En los casos en que el diseño de la pieza embutida exceda los límites de la relación de embutido, la reducción y la relación t/D_b , la forma debe ser embutida en dos o más pasos, algunas veces con recocido entre ellos.

EJEMPLO 20.3 Embutido acopado

Se usa una operación de embutido para formar un vaso cilíndrico con un diámetro interior de 75 mm y una altura de 50 mm. El tamaño de la forma inicial es de 138 mm y el espesor del material es de 2.4 mm. Con base en estos datos, ¿es factible la operación?

Solución: Para analizar la factibilidad, se determina la relación de embutido, la reducción y la relación espesor-diámetro.

$$DR = 138 / 75 = 1.84$$

$$r = (138 - 75) / 138 = 0.4565 = 45.65\%$$

$$t/D_b = 2.4 / 138 = 0.017 = 1.7\%$$

De acuerdo con estas medidas, la operación de embutido es factible. La relación de embutido es menor que 2.0, la reducción es menor de 50%, y la relación espesor-diámetro, t/D_b , es mayor a 1%. Éstos son los lineamientos generales que se usan frecuentemente para indicar la factibilidad técnica.

Fuerzas La *fuerza de embutido* requerida para realizar una operación dada se puede estimar aproximadamente mediante la fórmula:

$$F = \pi D_p t (TS) \left(\frac{D_b}{D_p} - 0.7 \right) \quad (20.12)$$

donde F = fuerza de embutido, N (lb); t = espesor original de la forma, mm (in); TS = resistencia a la tensión, MPa (lb/in²); y D_b y D_p son los diámetros de la forma inicial y del punzón, respectivamente, en mm (in). La constante 0.7 es un factor de corrección para la fricción. La ecuación 20.12 estima la fuerza máxima en la operación. La fuerza de embutido varía a través del movimiento hacia abajo del punzón, alcanzando usualmente su valor máximo a una tercera parte de la longitud de la carrera.

La *fuerza de sujeción* es un factor importante en la operación de embutido. Como una primera aproximación, la presión de sujeción se puede fijar en un valor de 0.015 de la resistencia a la fluencia de la lámina de metal [7]. Este valor se multiplica por la porción del área de la forma inicial que será sostenida por el sujetador. En forma de ecuación,

$$F_h = 0.015 \{ D_b^2 - (D_p + 2.2t + 2R_d)^2 \} \quad (20.13)$$

donde F_h = fuerza de sujeción en embutido, N (lb); Y = resistencia a la fluencia de la lámina de metal, MPa (lb/in²); t = espesor inicial del material, mm (in); R_d = radio de la esquina del troquel, mm (in); los demás términos se definieron antes. La fuerza de sujeción es de manera usual una tercera parte, aproximadamente, de la fuerza o embutido [8].

EJEMPLO 20.4 Fuerzas en el embutido

Para la operación de embutido del ejemplo 20.3, determine *a*) fuerza de embutido y *b*) fuerza de sujeción, dado que la resistencia a la tensión de la lámina de metal (acero al bajo carbono) = 300 MPa y la resistencia a la fluencia = 175 MPa. El radio de la esquina del troquel = 6 mm.

Solución: *a*) La fuerza máxima de embutido está determinada por la ecuación 20.12:

$$F = \pi(75)(2.4)(300) \left(\frac{138}{75} - 0.7 \right) = 193\,396 \text{ N}$$

b) la fuerza de sujeción se estima mediante la ecuación (20.13):

$$F_h = 0.015(175)\pi(138^2 - (75 + 2.2 \times 2.4 + 2 \times 6)^2) = 86.824 \text{ N}$$

Determinación del tamaño de la forma Para lograr una dimensión satisfactoria de una pieza embutida cilíndrica, se necesita el diámetro correcto de la forma inicial. Ésta debe ser lo suficientemente grande para suministrar el metal necesario que complete la pieza. Si hay demasiado material, habrá desperdicio innecesario. Para formas no cilíndricas, existe el mismo problema para estimar el tamaño de la forma inicial, sólo que ésta no será redonda.

A continuación se describe un método razonable para estimar el diámetro de la forma inicial en una operación de embutido profundo en la que se produce una pieza redonda (por ejemplo, vasos cilíndricos y formas más complejas grandes con simetría axial). Como el volumen del producto final es el mismo que el de la pieza metálica inicial, el diámetro de la forma inicial puede calcularse si se establece que el volumen inicial de la forma es

igual al volumen final del producto, y se despeja el diámetro D_b . Para facilitar los cálculos, generalmente se supone que el adelgazamiento de las paredes es nulo.

20.3.3 Otras operaciones de embutido

El estudio se ha enfocado en una operación convencional de embutido acopado que produce una forma cilíndrica simple en un solo paso y usa un sujetador para facilitar el proceso. Se analizan algunas variantes de esta operación básica.

Reembutado Si el cambio de forma que requiere el diseño de la pieza es demasiado severo (la relación de embutido es demasiado alta), el formado completo de la pieza puede requerir más de un paso de embutido. Al segundo paso de embutido y a cualquier otro posterior, si se necesita, se le llama **reembutado**. En la figura 20.21 se ilustra una operación de reembutado.

Cuando el diseño de la pieza requiere una relación de embutido demasiado grande que impida formar la pieza en un solo paso, se puede ejecutar la siguiente sugerencia general para la reducción, que se puede hacer en cada operación de embutido [8]: para el primer embutido, la reducción máxima de la forma inicial debe ser de 40 a 45%; para el segundo embutido (primer reembutado), la reducción máxima debe ser 30%; para el tercer embutido (segundo reembutado), la reducción máxima debe ser 16%.

Una operación relacionada es el **embutido inverso**, en el cual se coloca una pieza embutida hacia abajo en el troquel y una segunda operación de embutido produce una configuración como la que se muestra en la figura 20.22. Aunque puede parecer que el embutido inverso podría producir una deformación más severa que el reembutado, en realidad es más fácil en el metal. La razón es que en el embutido inverso la lámina de metal se dobla en la misma dirección en las esquinas exteriores e interiores del troquel, mientras que en el reembutado el metal se dobla en direcciones opuestas en las dos esquinas. Debido a esta diferencia, el metal experimenta menos endurecimiento por deformación en el embutido inverso y, por tanto, la fuerza del embutido es menor.

Embutido de formas no cilíndricas Muchos productos requieren el embutido de formas no cilíndricas. La variedad de formas embutidas incluyen formas cuadradas, cajas rectangulares (lavabos), copas escalonadas, conos, copas con bases esféricas más que planas y formas curvas irregulares (como ocurre en los paneles de las carrocerías de automóviles). Cada una de estas formas representa un problema técnico único en embutido. Para el lector que se interese, Eary suministra una revisión detallada del embutido para esta clase de formas [1].

FIGURA 20.21 Reembutado de una copa: 1) inicio del reembutado y 2) final de la carrera. Los símbolos indican: v = velocidad del punzón, F = fuerza aplicada por el punzón, F_h = fuerza del sujetador de formas.

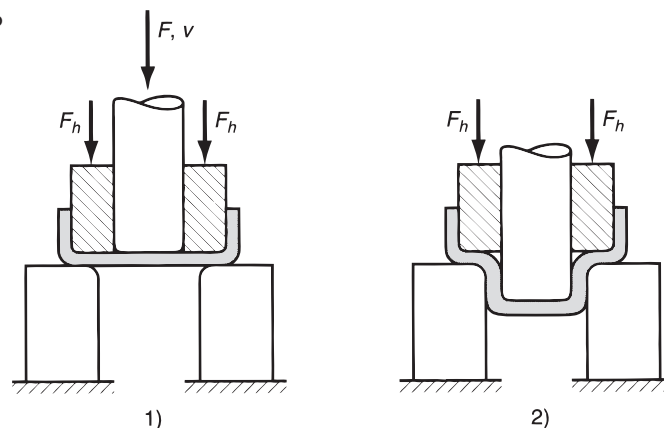
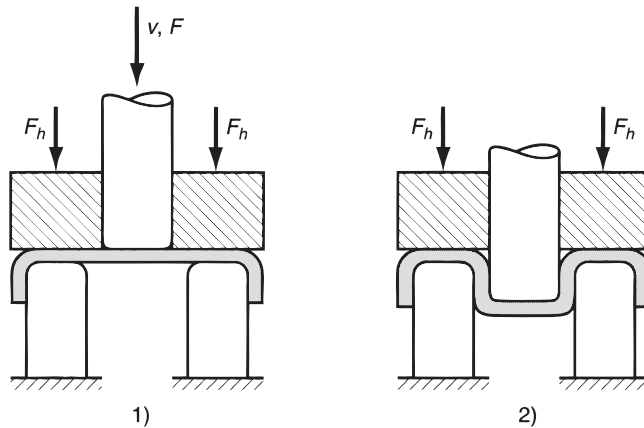


FIGURA 20.22 Embutido inverso: 1) inicio y 2) terminación. Símbolos v = velocidad del punzón, F = fuerza aplicada por el punzón, F_h = fuerza del sujetador de formas.



Embutido sin sujetador Una de las funciones principales del sujetador consiste en prevenir el arrugado de la brida mientras se embute la pieza. La tendencia al arrugamiento se reduce al aumentar la relación entre el espesor y el diámetro de la forma inicial. Si la relación t/D_b es lo suficientemente grande, se puede alcanzar el embutido sin necesidad de un sujetador, como se muestra en la figura 20.23. Puede estimarse la condición limitante para el embutido sin sujetador mediante la siguiente expresión [4]:

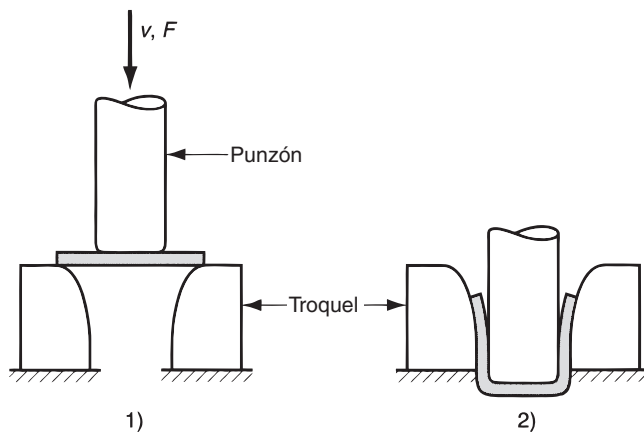
$$D_b - D_p < 5t \quad (20.14)$$

El troquel de embutido debe tener forma de embudo o cono para permitir que el material a embutir se ajuste a la cavidad del troquel. La ventaja del embutido sin un sujetador, cuando éste es posible, es un costo más bajo de las herramientas y el uso de una prensa más simple, porque se evita la necesidad de un control separado de los movimientos del sujetador y del punzón.

20.3.4 Defectos del embutido

El embutido de lámina metálica es una operación más compleja que el corte o el doblado; por tanto, hay más cosas que pueden fallar. Pueden presentarse numerosos defectos en un producto embutido; anteriormente se citaron algunos de ellos. La siguiente es una lista de los defectos que se muestran en la figura 20.24:

FIGURA 20.23 Embutidos sin sujetador: 1) inicio del proceso y 2) fin de la carrera. Los símbolos v y F indican movimiento y fuerza aplicada, respectivamente.



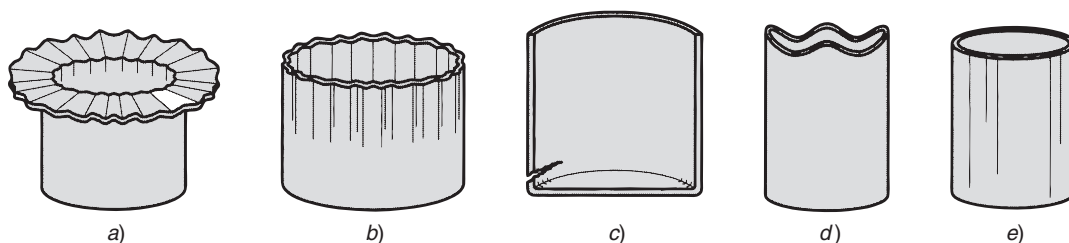


FIGURA 20.24 Defectos comunes en las piezas embutidas a) el arrugamiento puede ocurrir en la pestaña o b) en la pared, c) desgarramiento, d) orejeado y e) rayados superficiales.

- a) **Arrugamiento en la brida o pestaña.** El arrugamiento en una pieza embutida consiste en una serie de pliegues que se forman radialmente en la brida no embutida de la pieza de trabajo, debido al pandeo por compresión.
- b) **Arrugamiento en la pared.** Si la brida arrugada se embute en el cilindro, estos pliegues aparecen en la pared vertical del cilindro.
- c) **Desgarramiento.** Este defecto consiste en una grieta que se abre en la pared vertical, usualmente cerca de la base de la copa embutida, debido a altos esfuerzos a la tensión que causan adelgazamiento y rotura del metal en esta región. Este tipo de falla puede también ocurrir cuando el metal se estira sobre una esquina afilada del troquel.
- d) **Orejeado.** Ésta es la formación de irregularidades (llamadas **orejas**) en el borde superior de la pieza embutida, causada por anisotropía en la lámina de metal. Si el material es perfectamente isotrópico no se forman las orejas.
- e) **Rayados superficiales.** Pueden ocurrir rayaduras en la superficie de la pieza embutida si el punzón y el troquel no son lisos o si la lubricación es insuficiente.

20.4 OTRAS OPERACIONES DE FORMADO DE LÁMINAS METÁLICAS

En las prensas convencionales se realizan, además del doblado y el embutido, otras operaciones de formado. Aquí se clasifican como 1) operaciones realizadas con herramientas metálicas y 2) operaciones ejecutadas con herramientas flexibles de caucho.

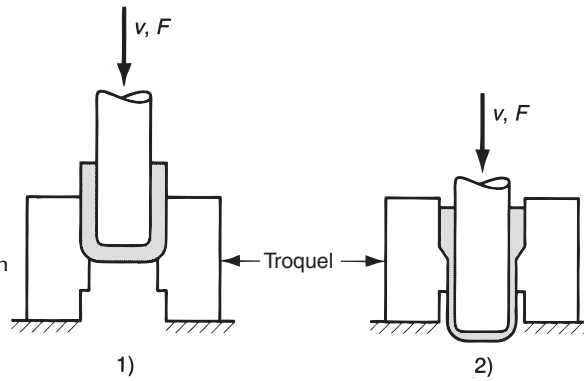
20.4.1 Operaciones realizadas con herramientas metálicas.

Las operaciones realizadas con herramientas metálicas incluyen: 1) planchado, 2) acuañado y estampado, 3) desplegado y 4) torcido.

Planchado En el embutido profundo se comprime la pestaña por una acción de compresión del perímetro de la forma inicial que busca una circunferencia menor conforme es embutida hacia la abertura del troquel. Debido a esta compresión, la lámina de metal cerca del borde exterior de la forma inicial se va engrosando conforme se mueve hacia adentro. Si el espesor de este material es más grande que el espacio entre punzón y el troquel, será comprimido al tamaño del espacio, un proceso conocido como **planchado**.

El planchado se realiza algunas veces como un paso independiente que sigue al embutido. Este caso se ilustra en la figura 20.25. El planchado hace que las paredes de la pieza cilíndrica sean más uniformes en su espesor. La pieza embutida es por tanto más larga y el uso del material es más eficiente. Las latas para bebidas y los casquillos de artillería, artículos de alta producción, incluyen el planchado en sus procesos para lograr economías en el uso de material.

FIGURA 20.25 Planchado para obtener un espesor más uniforme de la pared en una pieza embutida: 1) inicio del proceso y 2) durante el proceso. Note el adelgazamiento y elongación de las paredes. Los símbolos v y F indican movimiento y fuerza aplicada, respectivamente.



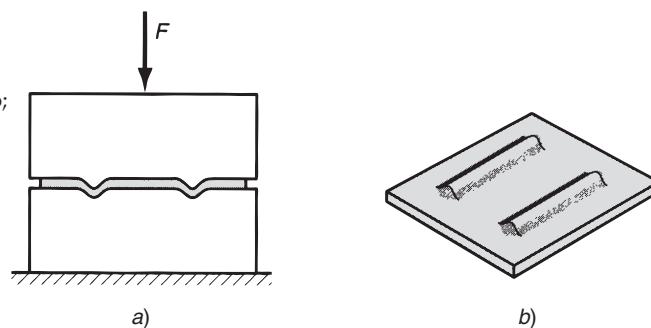
Acuñado y estampado El acuñado es una operación de deformación volumétrica que se analizó en el capítulo anterior; se usa con mucha frecuencia en el trabajo de láminas metálicas para formar indentaciones y secciones levantadas de la pieza. La indentación produce adelgazamiento de la lámina metálica y las elevaciones de las secciones producen engrosamiento del metal.

El **estampado** es una operación de formado que se usa para crear indentaciones en la lámina, como letras o costillas de refuerzo que se describen en la figura 20.26. Se involucran algunos estiramientos y adelgazamientos del metal. Esta operación puede parecer similar al acuñado. Sin embargo, los troqueles de estampado poseen contornos y cavidades que coinciden, el punzón contiene los contornos positivos y el troquel los negativos, mientras que los troqueles de grabado pueden tener cavidades diferentes en las dos mitades del troquel; por este motivo las deformaciones son más significativas que en el estampado.

Desplegado El desplegado es una combinación de corte y doblado, o corte y formado, en un solo paso para separar parcialmente el metal de la lámina. En la figura 20.27 se muestran varios ejemplos. Entre otras aplicaciones, el desplegado se usa para hacer rejillas en las piezas de metal para ventilar el calor del interior de los gabinetes eléctricos.

Torcido En la operación de **torcido**, la lámina se sujeta a una carga de torsión más que a una carga de doblado, causando así una torcedura sobre la longitud de la lámina. Este tipo de operación tiene aplicaciones limitadas; se usa para hacer productos tales como ventiladores y paletas propulsoras. Se puede realizar en una prensa convencional con punzón y troquel que han sido diseñados para formar la pieza en la forma torcida requerida.

FIGURA 20.26 Estampado: a) sección transversal de la configuración del troquel y punzón durante el prensado; b) pieza terminada con bordes estampados.



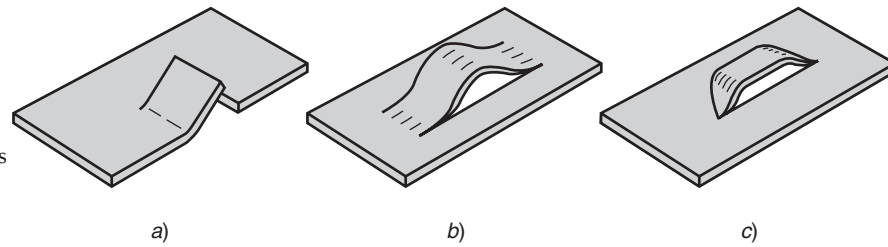


FIGURA 20.27 Varias formas de desplegado: a) corte y doblé; b) y c) dos tipos de corte y formado.

20.4.2 Procesos de formado con caucho

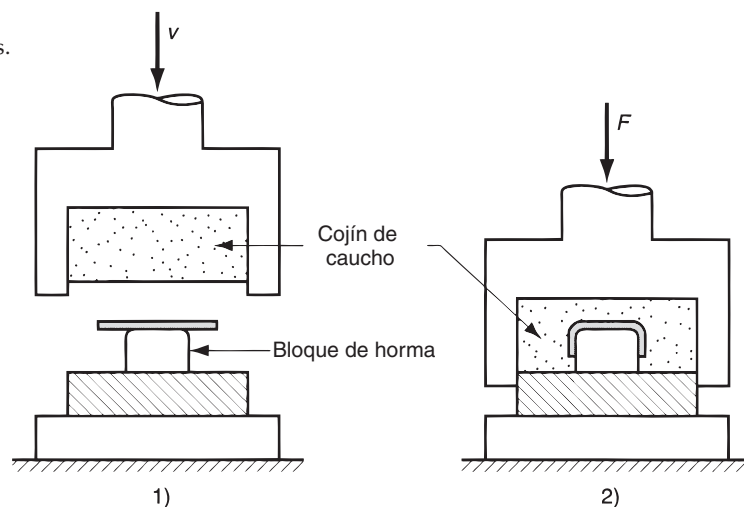
Las dos operaciones analizadas en esta sección se realizan en prensas convencionales, pero las herramientas son inusuales porque usan un elemento flexible (hecho de caucho o material similar) para efectuar la operación de formado. Las operaciones son: 1) el proceso Guerín y 2) el hidroformado.

Proceso Guerín El *proceso Guerín* usa un cojín de caucho grueso (u otro material flexible) para formar la lámina de metal sobre un bloque de forma positiva como se muestra en la figura 20.28. El cojín de caucho está confinado en un recipiente de acero. Al descender el punzón, el caucho rodea gradualmente la lámina, aplicando presión para deformarla y forzarla a tomar la forma del bloque. Este proceso se limita a formas poco profundas relativamente, ya que las presiones generadas por el caucho, de hasta 10 MPa (1 500 lb/in²), no son suficientes para evitar el arrugado de formas más profundas.

La ventaja del proceso Guerín es el relativo bajo costo de las herramientas. El bloque de horma puede ser hecho de madera, plástico u otro material que sea fácil de formar y el cojín de caucho puede usarse con diferentes formas de bloques. Estos factores hacen atractivo el proceso de formado con caucho en cantidades pequeñas de producción como las de la industria aérea, donde se creó el proceso.

Hidroformado El *hidroformado* es similar al proceso Guerín. La diferencia es que se sustituye el cojín grueso de caucho por un diafragma de caucho lleno con un fluido hidráulico, como se ilustra en la figura 20.29. Esto permite aumentar la presión que forma la parte de trabajo, hasta cerca de 100 MPa (15 000 lb/in²), previniendo así el arrugado en piezas profundas. De

FIGURA 20.28 Proceso Guerín: 1) antes y 2) después. Los símbolos v y F indican movimiento y fuerza aplicada, respectivamente.



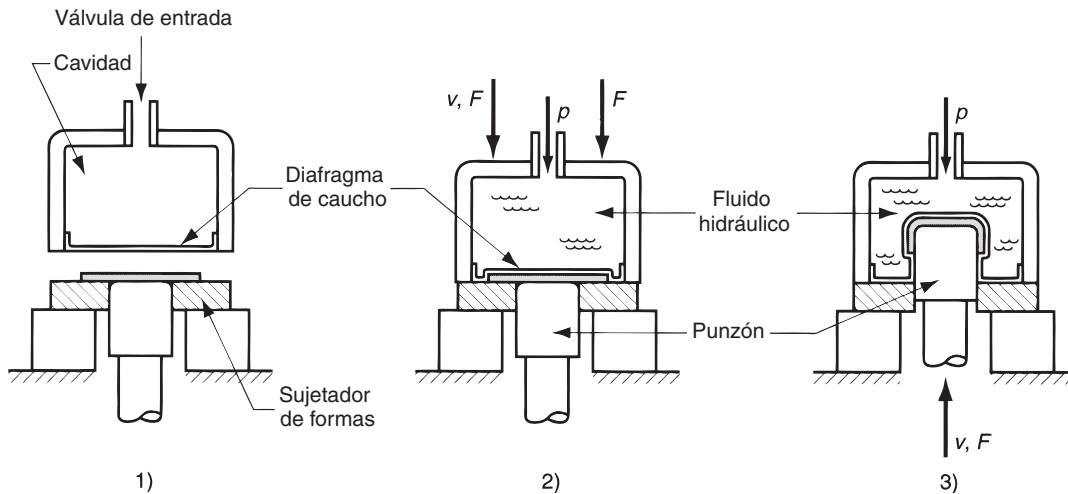


FIGURA 20.29 Proceso de hidroformado 1) inicio, no hay fluido en la cavidad; 2) prensa cerrada, cavidad con fluido a presión; 3) el punzón presiona sobre el trabajo para formar la pieza. Los símbolos indican v = velocidad, F = fuerza aplicada y p = presión hidráulica.

hecho, se puede lograr embutidos más profundos con procesos de hidroformado que con el embutido profundo convencional. Esto se debe a que la presión uniforme del hidroformado fuerza la lámina contra el punzón a todo lo largo, aumentando la fricción y reduciendo los esfuerzos a la tensión que causan el desgarre en la base de la copa embutida.

20.5 TROQUELES Y PRENSAS PARA PROCESOS CON LÁMINAS METÁLICAS

En esta sección se examina el punzón y el troquel, así como el equipo de producción que se usa como herramienta en las operaciones convencionales de procesamiento de láminas metálicas.

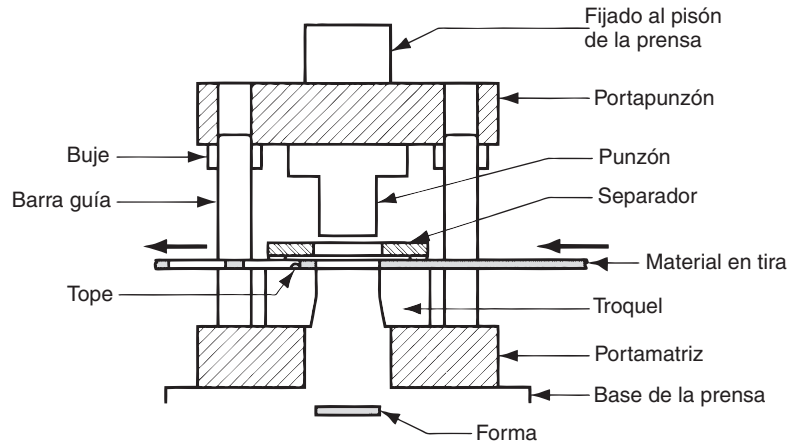
20.5.1 Troqueles

Casi todas las operaciones de trabajo en prensas que se describen antes se ejecutan con punzones y troqueles convencionales. La herramienta aquí referida de manera específica es un **troquel**. Una herramienta diseñada a la medida de la pieza que se produce. Se usa frecuentemente el término **troquel de estampado** (o troquelador) para los troqueles de alta producción.

Componentes de un troquel de estampado En el diagrama de la figura 20.30 se ilustran los componentes de un troquel de estampado que ejecuta una operación simple de corte de formas. Los componentes de trabajo son el punzón y el troquel. El **punzón** y el **troquel** se fijan a las porciones superior e inferior del **conjunto troquelador**, llamados respectivamente el **portapunzón** (o **zapata superior**) y el **portamatriz** (**zapata inferior**). El conjunto incluye también barras guía y bujes para asegurar el alineamiento apropiado entre el punzón y el troquel durante la operación. El portamatriz se fija a la base de la prensa y el portapunzón se fija al pisón. El movimiento del pisón ejecuta la operación de prensado.

Además de estos componentes, un troquel para corte de formas o punzonado debe incluir un medio para evitar que se peguen las láminas al punzón cuando éste regresa hacia arriba, después de la operación. El agujero que se genera en el material es del mismo tamaño que el punzón y tiende a pegarse a éste antes de su retiro. El dispositivo del troquel

FIGURA 20.30
Componentes de un punzón y un troquel para una operación de corte de formas.



que separa la lámina del punzón se llama **separador**, el cual consiste frecuentemente en una simple placa fijada al troquel con un agujero ligeramente más grande que el diámetro del punzón.

Para troqueles que procesan tiras o rollos de lámina metálica, se requiere un dispositivo que detenga el avance de la lámina que se alimenta al troquel entre cada ciclo de prensado. El dispositivo se llama (trate de adivinar) **tope**. Los topes van desde simples pernos localizados en la trayectoria de la tira para bloquear su avance hasta complejos mecanismos sincronizados que se levantan y retraen con cada acción de la prensa. En la citada figura se muestra el tope más simple.

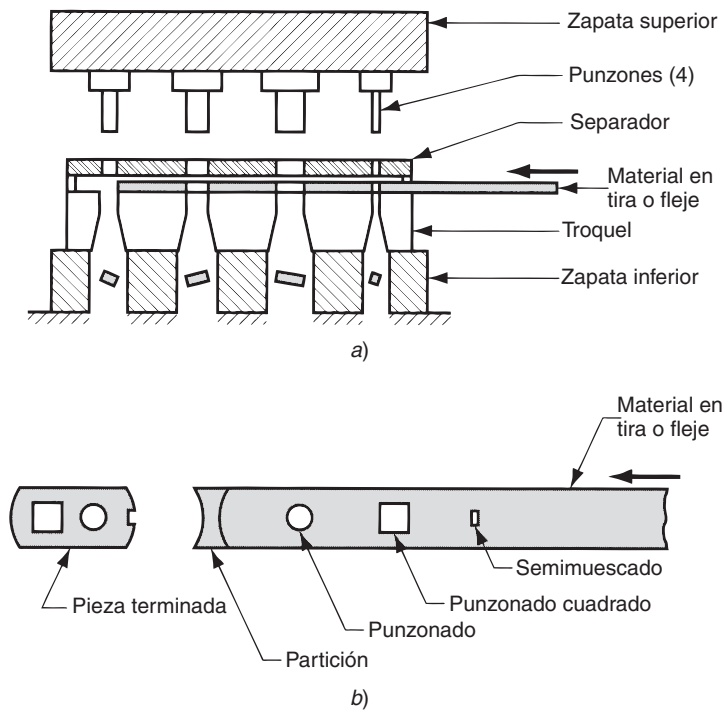
Hay otros componentes de los troqueles para prensado; la descripción precedente sólo proporciona una introducción a la terminología.

Tipos de troqueles de estampado Aparte de las diferencias entre los troqueles de estampado de corte, doblado y embutido, hay otras que se refieren al número de operaciones separadas que se ejecutan en cada acción de la prensa y a cómo se realizan dichas operaciones.

El tipo de troquel considerado aquí ejecuta una sola operación con cada golpe de la prensa y se llama **troquel simple**. Otro troquel que ejecuta operaciones simples es el troquel en V (sección 20.2.1). En el trabajo con prensas hay troqueles más complicados, como troqueles compuestos, combinados y progresivos. Un **troquel compuesto** realiza dos operaciones en una sola estación, tales como corte de formas y punzonado, o corte de formas y embutido [1]. Un **troquel combinado** es menos común: ejecuta dos operaciones en dos diferentes posiciones. Algunos ejemplos de aplicaciones en este troquel incluyen corte de formas para dos diferentes piezas (por ejemplo, derecha e izquierda) o corte de formas y después doblado de la misma pieza [1].

Un **troquel progresivo** ejecuta dos o más operaciones sobre una lámina de metal en dos o más posiciones con cada golpe de prensa. La pieza se fabrica progresivamente. El rollo de lámina se alimenta de una posición a la siguiente y en cada una de estas estaciones se ejecutan las diferentes operaciones (por ejemplo, punzonado, muescado, doblado y perforado). La pieza sale de la última posición completa y separada (cortada) del rollo remanente. El diseño de un troquel progresivo empieza con la disposición de la pieza sobre la tira o rollo y la determinación de las operaciones que se van a ejecutar en cada estación. El resultado de este procedimiento se llama **desarrollo de tira**. En la figura 20.31 se ilustra un troquel progresivo y el desarrollo de tira asociado. Los troqueles progresivos pueden tener una docena o más estaciones. Los troqueles de estampado son más complicados y costosos, pero se justifican económicamente para piezas complejas que requieren operaciones múltiples a altas velocidades de producción.

FIGURA 20.31 a) Troquel progresivo y b) desarrollo asociado de la tira.



20.5.2 Prensas

Las **prensas** que se usan para el trabajo de láminas metálicas son máquinas herramienta que tienen una **cama** estacionaria y un **pisón** (o **corredera**), el cual puede ser accionado hacia la cama y en dirección contraria para ejecutar varias operaciones de corte y formado. En la figura 20.32 se muestra una prensa típica con sus principales componentes. El **armazón** establece las posiciones relativas de la cama y el pisón, el cual es accionado mediante fuerza mecánica o hidráulica. Cuando se monta un troquel en la prensa, el portapunzón se fija al pisón y el portamatriz se fija a la **placa transversal** de la cama de la prensa.

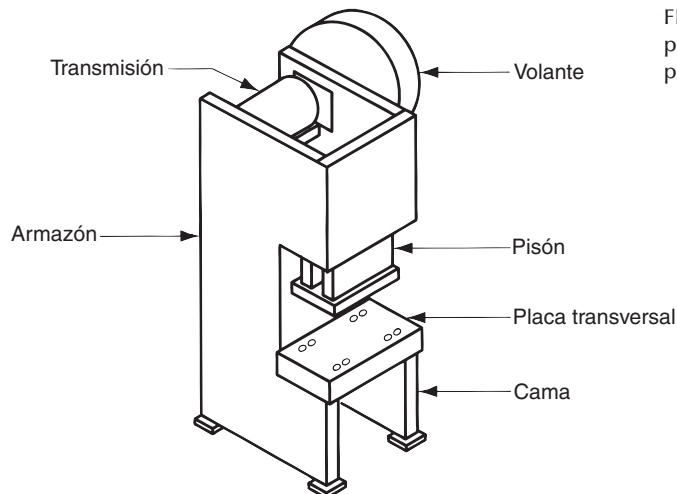


FIGURA 20.32 Componentes de una prensa troqueladora típica accionada por transmisión mecánica.

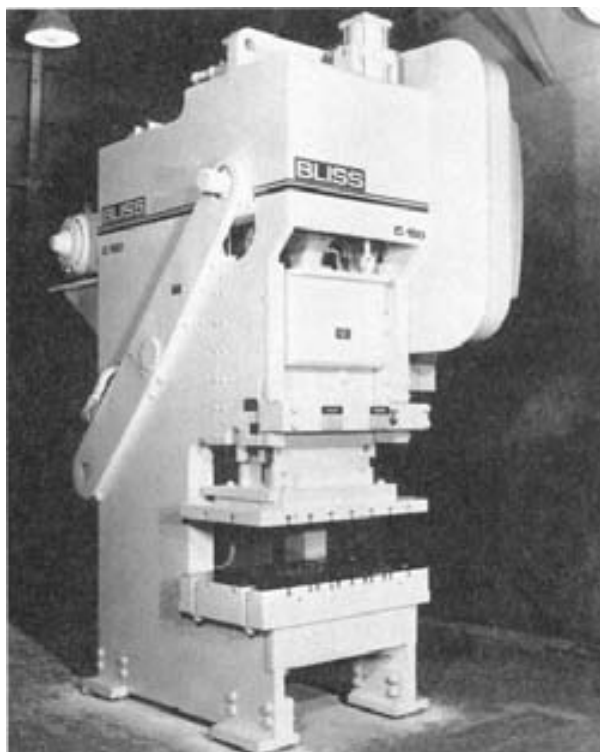
Hay prensas de varias capacidades, sistemas de potencia y tipos de armazón. La capacidad de una prensa es su disposición para manejar la fuerza y energía requerida para realizar las operaciones de troquelado. Ésta se determina por su tamaño físico y por sus sistemas de potencia. El sistema de potencia se refiere a la clase de fuerza que usa, ya sea mecánica o hidráulica, así como al tipo de transmisión empleada para enviar la potencia al pisón. La velocidad de producción es otro aspecto importante de la capacidad. El tipo de armazón de la prensa se refiere a la construcción física de la misma. Hay dos tipos de armazón o estructura de uso común: de escote o de estructura en C y estructura de lados rectos.

Prensas de escote Su estructura tiene la configuración general de la letra C y por ello frecuentemente se conoce como estructura o **armazón en C**. Las prensas de escote proporcionan buen acceso al troquel, y generalmente pueden abrirse por la parte trasera para permitir la eyección conveniente de los troquelados o de la pedacería. Los tipos principales de prensas de escote son: *a)* de escote sólido, *b)* cama ajustable, *c)* inclinable con abertura posterior, *d)* prensa plegadora y *e)* prensa de torreta.

El **escote sólido** (algunas veces llamado simplemente **prensa C**) tiene una construcción de una sola pieza, como se muestra en la figura 20.32. Las prensas con esta estructura son rígidas; no obstante, la forma en C permite un acceso conveniente de los troqueles para alimentar tiras o rollos de material. Dichas prensas están disponibles en una escala de tamaños con capacidades cercanas a 9 000 kN (1 000 toneladas). Los moldes que se muestran en la figura 20.33 tienen una capacidad de 1350 kN (150 tons). Las **prensas con armazón de cama ajustable** son una variante de la estructura en C, en la cual una cama ajustable se añade para acomodar varios tamaños de troqueles. Este ajuste hace que se sacrifique la capacidad del tonelaje. La **prensa inclinable con abertura posterior** tiene una estructura en C ensamblada a la base, de tal manera que el armazón pueda inclinarse hacia atrás en varios ángulos para dejar caer, mediante la fuerza de gravedad, los troquelados por la abertura trasera. Las capacidades de tales prensas fluctúan entre 1 tonelada y alrededor de 2 250 kN (250 toneladas). Pueden operarse a altas velocidades hasta cerca de mil golpes por minuto.

La **prensa plegadora** es una prensa con estructura en C que tiene una cama muy amplia. El modelo en la figura 20.34 tiene un ancho de cama de 9.15 m (30 ft). Esto per-

FIGURA 20.33 Prensa de escote para trabajo de metales en lámina (fotografía por cortesía de E. W. Bliss Company). Capacidad de 1 350 kN (150 toneladas).



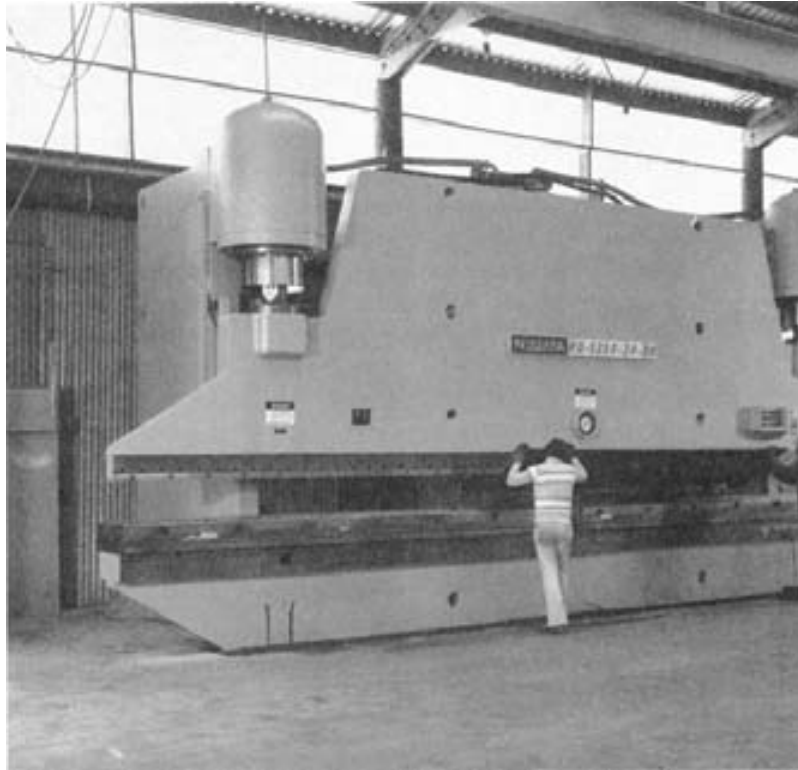


FIGURA 20.34 Prensa plegadora con un ancho de cama de 9.15 m (30 ft) y capacidad de 11 200 kN (1 250 tons); se muestra a dos trabajadores que posicionan una placa para doblar (fotografía por cortesía de Niagara Machine & Tools Works).

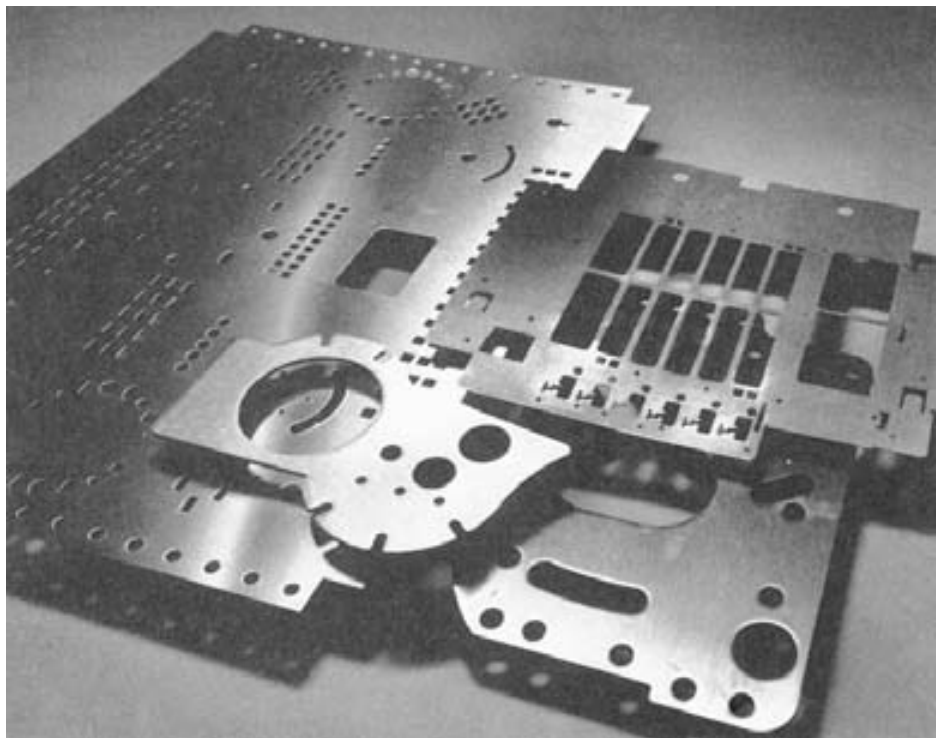


FIGURA 20.35 Varias piezas de lámina producidas en una prensa de torreta; en ellas se muestra la variedad de formas posibles de agujeros (fotografía cortesía de Strippet, Inc.).

mite acomodar en la cama un número de troqueles separados (típicos troqueles en V), de manera que se puedan hacer económicamente pequeñas cantidades de troquelados. Sin embargo, dichas cantidades en algunas ocasiones requieren doblados múltiples a diferentes ángulos, y muchas veces se necesita la operación manual. Para una pieza que requiere una serie de dobleces, el operador mueve la forma inicial a través de los dobleces deseados en secuencia, y la prensa actúa en cada troquel para completar el trabajo necesario.

Mientras las prensas plegadoras se adaptan bien a las operaciones de doblado, las **prensas de torreta** se adaptan a situaciones en las cuales se realizan punzonados, rasurados y muescados, así como a otras operaciones de corte que se muestran en la figura 20.35. Las prensas de torreta tienen un armazón en C, aunque esta construcción no es tan obvia en la figura 20.36. El punzón convencional se remplaza por una torreta que contiene muchos punzones de diferentes tamaños y formas. La torreta trabaja por selección (rotación) de la posición que mantiene el punzón para ejecutar la operación requerida. Además de la torreta del punzón, hay una torreta correspondiente del troquel que pone en posición las aberturas del troquel para cada punzón. Entre el punzón y el troquel está la forma de lámina de metal, sostenida por un sistema posicionador x-y que opera por control numérico computarizado (sección 38.1). La forma se mueve a la posición coordinada que se requiere para cada operación de corte.

Prensas con armazón de lados rectos Para trabajos que requieren alto tonelaje, se necesitan armazones de prensa con una rigidez estructural mayor. Las prensas de lados rectos tienen lados completos que le dan una apariencia de caja, como en la figura 20.37. Esta construcción aumenta la resistencia y rigidez del armazón. Como resultado, en estas prensas se dispone de capacidades hasta de 35 000 kN (4 000 toneladas) para trabajo en lámina. En forja se usan grandes prensas de este tipo de armazón (sección 19.3).

En todas estas prensas de estructura en C y armazón de lados rectos, el tamaño se relaciona estrechamente con la capacidad de tonelaje. Las prensas más grandes se construyen para soportar fuerzas más altas en el trabajo de prensado. El tamaño de las prensas se relaciona también con la velocidad a la que pueden operar. Las prensas más pequeñas tienen generalmente velocidades de producción más altas que las prensas grandes.

FIGURA 20.36 Prensa de torreta de control numérico computarizado (fotografía por cortesía de Strippit, Inc.).

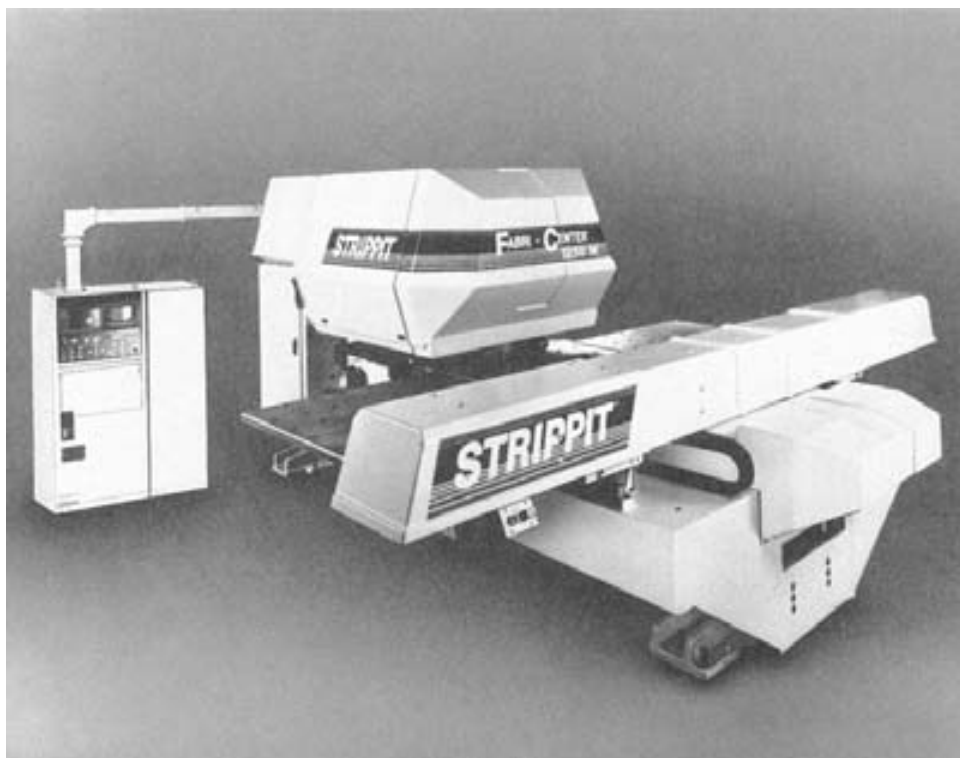


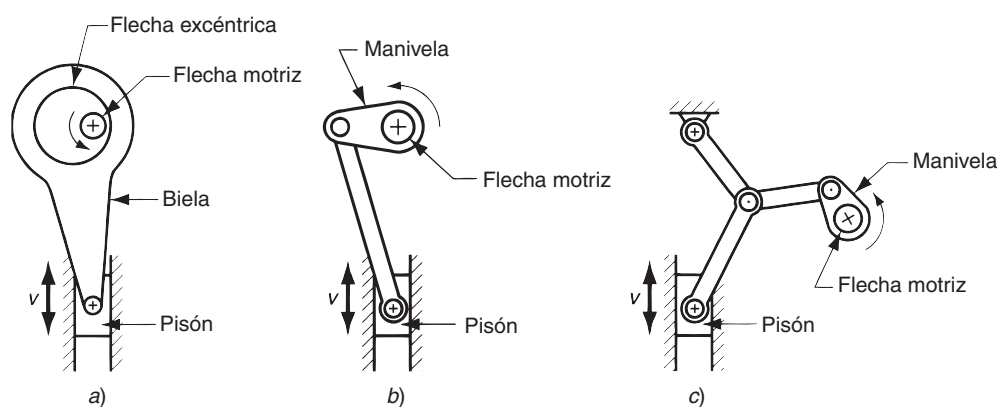
FIGURA 20.37 Prensa con armazón de lados rectos (fotografía por cortesía de Greenerd Press & Machine Company, Inc.).



Potencia y sistemas de transmisión Los sistemas de transmisión de las prensas pueden ser hidráulicos o mecánicos. Las **prensas hidráulicas** usan grandes cilindros y pistones para mover el pisón. Este sistema de potencia suministra típicamente carreras más largas que las de impulsión mecánica y pueden generar la fuerza de tonelaje completo a través de la carrera entera. Sin embargo es más lento. Su aplicación a las láminas de metal se limita normalmente al embutido profundo y a otras operaciones de formado donde sus características son ventajosas. Estas prensas disponen de una o más correderas independientes, llamadas de simple acción (corredera simple), doble acción (dos correderas) y así sucesivamente. Las prensas de doble acción son útiles en operaciones de embutido profundo cuando se requiere un control separado de la fuerza de punzón y la fuerza del sujetador.

En las **prensas mecánicas** se usan varios tipos de mecanismos de transmisión. Estos incluyen excéntrico, eje cigüeñal y de junta de bisagra como se ilustra en la figura 20.38.

FIGURA 20.38 Tipos de transmisión para prensas destinadas al trabajo de metal en lámina: a) excéntrico, b) cigüeñal, y c) de junta de bisagra.



Estos mecanismos convierten el movimiento giratorio del motor en movimiento lineal del pisón. Utilizan un **volante** para almacenar la energía del motor, que usan posteriormente en las operaciones de estampado. Las prensas mecánicas que utilizan este tipo de transmisión alcanzan fuerzas muy altas en el fondo de su carrera y, por tanto, son muy apropiadas para operaciones de forma y punzonado. La junta de bisagra libera fuerzas muy altas cuando está en el fondo y por esa causa se usa frecuentemente en las operaciones de acuñado.

20.6 OPERACIONES CON LÁMINAS METÁLICAS NO REALIZADAS EN PRENSAS

Numerosas operaciones con láminas de metal no se realizan en prensas de troquelado convencional. En esta sección se examinarán varios de estos procesos: 1) formado por estirado, 2) doblado con rodillos y formado, 3) rechazado y 4) procesos de formado de alto nivel de energía.

20.6.1 Formado por estirado

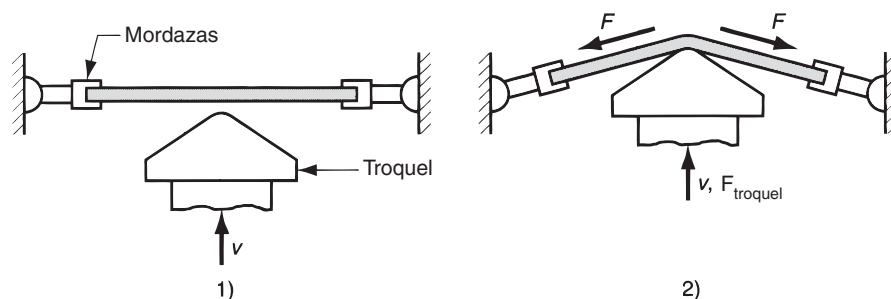
El **formado por estirado** es un proceso de deformación de láminas metálicas en el cual la lámina se restira en forma intencional y dobla simultáneamente a fin de lograr un cambio de forma. El proceso se ilustra en la figura 20.39 para un doblado gradual relativamente simple. La pieza de trabajo se sujeta por una o más mordazas en cada extremo y luego se restira y dobla sobre un troquel positivo que contiene la forma deseada. El metal se somete a esfuerzos de tensión a un nivel por encima de su punto de fluencia. Cuando se libera la carga de tensión, el metal ha sido deformado plásticamente. La combinación de estirado y doblado da por resultado una recuperación elástica relativamente pequeña de la pieza. Una estimación de la fuerza requerida en formado por estirado se puede obtener multiplicando el área de la sección transversal de la lámina en dirección del tirón por el esfuerzo de fluencia del metal. En forma de ecuación,

$$F = L_t Y_f \quad (20.15)$$

donde F = fuerza de estiramiento, N (lb); L = longitud de la lámina en dirección perpendicular al estiramiento, mm (in); t = espesor instantáneo del material, mm (in); y Y_f = esfuerzo de fluencia del metal del trabajo, MPa (lb/in²). La fuerza del troquel F_{troquel} , mostrado en la figura, puede determinarse balanceando los componentes verticales de la fuerza.

Mediante el formado por estirado se pueden lograr contornos más complejos que los mostrados en la figura, pero existen limitaciones sobre la forma de las curvas que se pueden hacer en la lámina. Este método de formado se usa extensivamente en las industrias aérea y aeroespacial para producir económicamente grandes piezas de lámina metálica en las cantidades moderadas típicas de dichas industrias.

FIGURA 20.39 Formado por estirado: 1) inicio del proceso; 2) un troquel formador se presiona sobre el trabajo con una fuerza F_{troquel} , ocasionando el estirado y doblado de la lámina sobre la forma. F = fuerza de estiramiento.



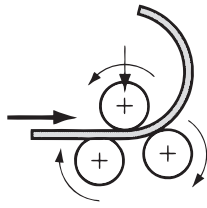


FIGURA 20.40 Doblado con rodillos.

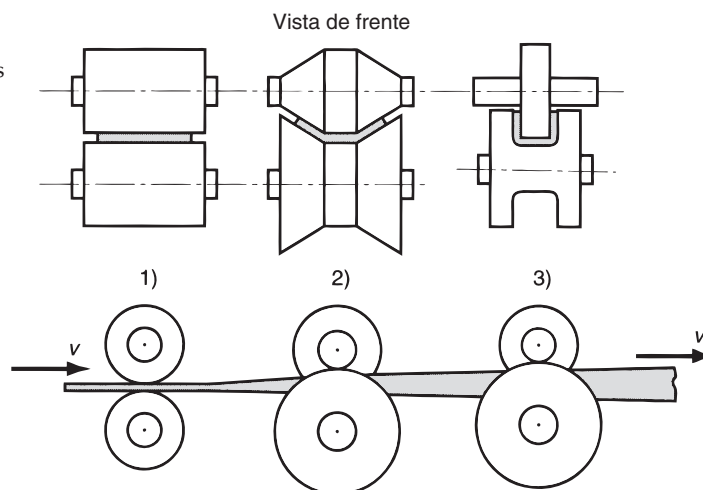
20.6.2 Doblado y formado con rodillos

En las operaciones descritas en esta sección se usan rodillos para formar láminas metálicas. El **doblado con rodillos** es una operación en la cual generalmente se forman piezas grandes de lámina metálica en secciones curvas por medio de rodillos. En la figura 20.40 se muestra un arreglo posible de rodillos. Cuando la lámina pasa entre los rodillos, éstos se colocan uno junto al otro en una configuración que forma el radio de curvatura deseado en el trabajo. Por este método se fabrican componentes para grandes tanques de almacenamiento y recipientes a presión. Mediante esta operación también se pueden doblar perfiles estructurales, rieles de ferrocarril y tubos.

Una operación relacionada es el **enderezado con rodillos** en la cual se enderezan láminas no planas (u otras formas), pasándolas sobre una serie de rodillos. Los rodillos someten al trabajo a una serie de aplanados de los pequeños dobleces en direcciones opuestas; esto provoca que el material se enderece a la salida.

Formado con rodillos, también llamado **formado con rodillos de contorno**, es un proceso continuo de doblado en el cual se usan rodillos opuestos para producir secciones largas de material, formado a partir de cintas o rollos de lámina. Generalmente se requieren varios pares de rodillos para lograr progresivamente el doblado del material en la forma deseada. El proceso se ilustra en la figura 20.41 para una sección en forma de U. Los productos hechos por formado con rodillos incluyen canales, canaletas, secciones laterales de metal (para casas), tuberías, tubos con costura y varias secciones estructurales. Aunque el formado con rodillos tiene la apariencia general de una operación de laminado (las herramientas son verdaderamente similares), la diferencia es que en el formado con rodillos se involucra más el doblado que la compresión del trabajo.

FIGURA 1.1 Formado en rodillos de una sección continua en canal: 1) rodillos rectos, 2) formado parcial y 3) forma final.



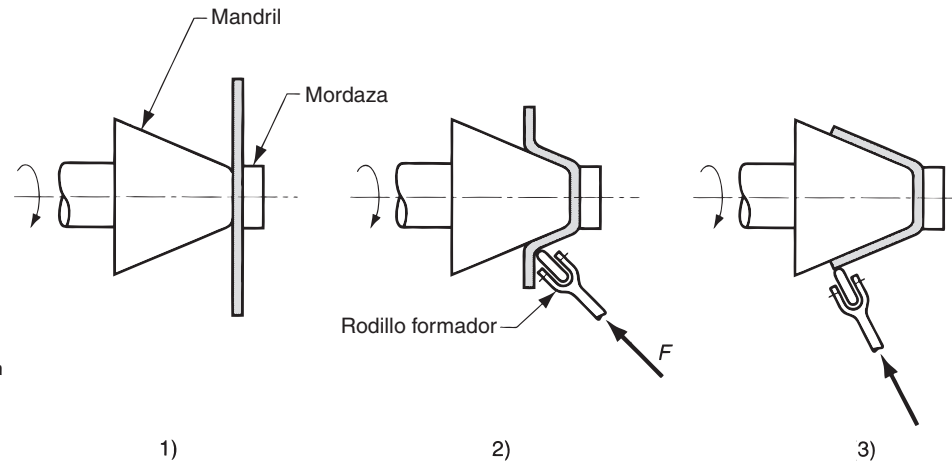


FIGURA 20.42 Rechazado convencional: 1) disposición al iniciar el proceso, 2) durante el rechazado y 3) proceso completo.

20.6.3 Rechazado

El **rechazado** es un proceso de formado de metal en el cual se da forma a una parte de simetría axial sobre un mandril u horma mediante una herramienta redondeada o rodillo. La herramienta o el rodillo aplican una presión muy localizada (en casi un punto de contacto) para deformar el trabajo por medio de movimientos axiales o radiales sobre la superficie de la pieza. Las formas geométricas típicas que se producen por rechazado incluyen copas, conos, hemisferios, tubos y cilindros. Hay tres tipos de operaciones de rechazado: 1) rechazado convencional, 2) rechazado cortante y 3) rechazado de tubos.

Rechazado convencional El rechazado convencional es la operación de rechazado básico. Como se ilustra en la figura 20.42, un disco de lámina se sostiene en el extremo de un mandril rotatorio que tiene la forma interior deseada para la pieza final, mientras la herramienta o rodillo deforma el metal contra el mandril. En algunos casos la forma inicial puede ser diferente a la de un disco plano. Como se indica en la figura, el proceso requiere una serie de pasos para completar el formado de la pieza. La posición de la herramienta la puede controlar un operador usando un punto de apoyo fijo para el apalancamiento necesario, o un método automático como control numérico. Estas alternativas son el **rechazado manual** y el **rechazado de potencia**. El rechazado de potencia tiene la capacidad de aplicar fuerzas más altas a la operación, lo cual representa ciclos más rápidos y mayor capacidad en cuanto al tamaño del trabajo. También se logra un mejor control del proceso que en el rechazado manual.

El rechazado convencional dobla el metal alrededor de un eje circular en movimiento para conformar el metal de acuerdo con la superficie externa de un mandril de simetría axial. El espesor del metal permanece sin cambio (más o menos) respecto al espesor de la forma inicial. El diámetro de la forma debe ser algo más grande que el diámetro de la pieza resultante. El diámetro inicial requerido se puede estimar suponiendo volúmenes constantes, antes y después del rechazado.

La aplicación del rechazado convencional incluye la producción de formas cónicas y curvas en bajas cantidades. Por este proceso se puede hacer piezas con diámetros muy grandes, hasta de 5 m (15 ft), o más. Los métodos alternos de formado de lámina podrían requerir altos costos en los troqueles. La horma de rechazado se puede hacer de madera u otro material suave fácil de formar. Por tanto es una herramienta de bajo costo comparada con el punzón y troquel requeridos para embutido profundo, que podría ser un proceso sustituto para algunas piezas.

Rechazado cortante En el **rechazado cortante** se forma la pieza sobre el mandril por medio de un proceso de deformación cortante en el cual el diámetro exterior permanece

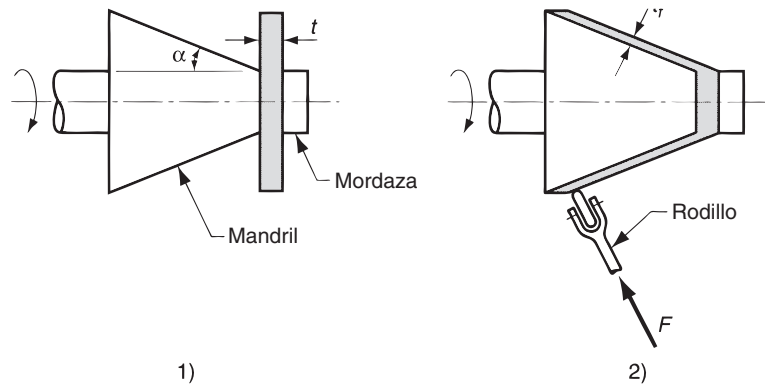


FIGURA 20.43 Rechazado cortante: 1) disposición y 2) proceso terminado.

constante y el espesor de la pared se reduce, como se muestra en la figura 20.43. Esta deformación cortante y el consiguiente adelgazamiento del metal distingue este proceso de la acción de doblado en el rechazado convencional. Se han usado otros nombres para el rechazado cortante, como **torneado de flujo**, **formado por corte** y **forjado rotatorio**. El proceso se ha aplicado en la industria aeroespacial para formar piezas grandes como los conos para la nariz de los cohetes.

Para una forma cónica simple, el espesor resultante de la pared rechazada puede determinarse fácilmente a través de la relación de la ley de los senos:

$$t_f = t \sin \alpha \quad (20.16)$$

donde t_f = espesor final de la pared después de rechazada, t = espesor inicial del disco, y α = ángulo del mandril (en realidad medio ángulo). El adelgazamiento se cuantifica algunas veces por la reducción del rechazado r :

$$r = \frac{t - t_f}{t} \quad (20.17)$$

Existen límites a la cantidad de adelgazamiento que puede soportar el metal en una operación de rechazado con esfuerzo cortante antes de que ocurra la fractura. Esta reducción máxima se correlaciona bien con la reducción de área en la prueba de tensión [7].

Rechazado de tubos El **rechazado de tubos** se usa para reducir el espesor de las paredes y aumentar la longitud de un tubo mediante la aplicación de un rodillo al trabajo sobre un mandril cilíndrico, como se muestra en la figura 20.44. El rechazado de tubos es similar al rechazado cortante salvo que la pieza inicial es un tubo, en lugar de una forma plana. La operación se puede realizar aplicando el rodillo externamente contra el trabajo (usando un mandril cilíndrico en el interior del tubo) o internamente (usando un troquel alrededor del tubo). También es posible formar perfiles en las paredes del cilindro, como se muestra en la figura 20.44c), controlando el recorrido del rodillos al moverse tangencialmente a lo largo de la pared.

La reducción por rechazado para la operación de rechazado de tubos, la cual produce una pared de espesor uniforme, se puede determinar como en el rechazado cortante por la ecuación 20.17.

20.6.4 Formado por alta velocidad de energía

Se han creado varios procesos para el formado de metales usando grandes cantidades de energía aplicada en tiempos muy cortos. Debido a esta característica se llaman **formado por alta velocidad de energía** (HERF, por sus siglas en inglés). Éstos incluyen el formado por explosión, electrohidráulico y electromagnético.

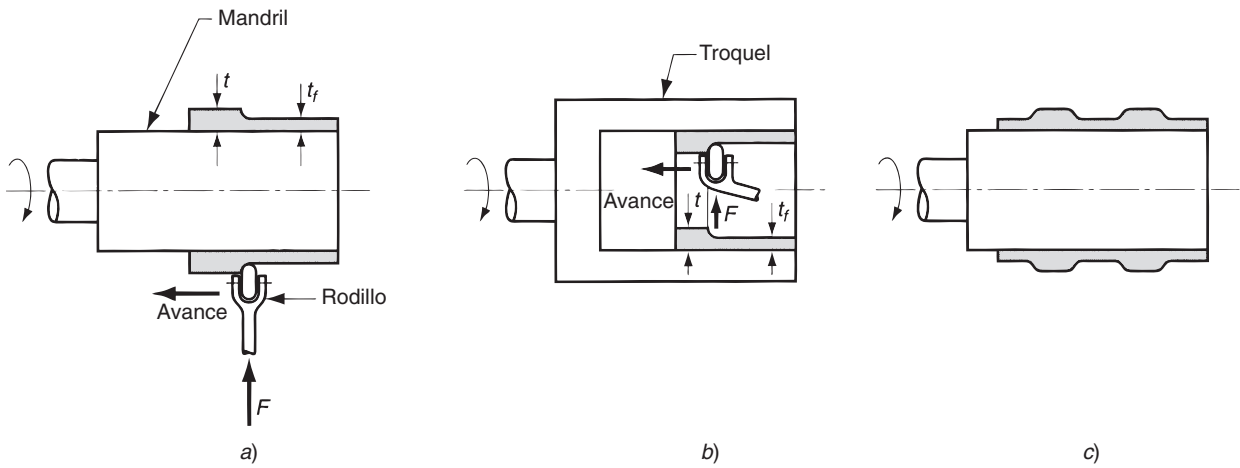
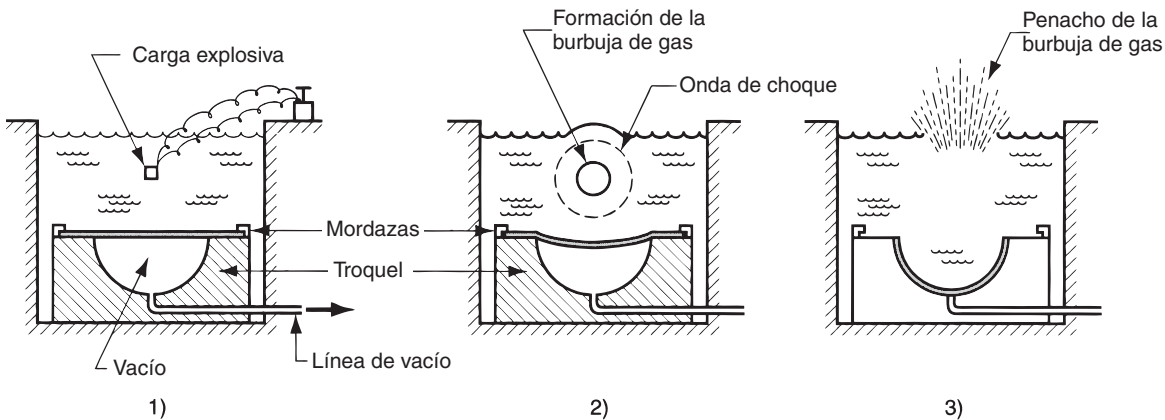


FIGURA 20.44 Rechazo de tubos: a) externo, b) interno y c) perfilado.

Formado por explosión El *formado por explosión* involucra el uso de una carga explosiva para formar una lámina o placa de metal dentro de la cavidad de un troquel. Un método de instrumentar el proceso se ilustra en la figura 20.45. La pieza de trabajo se fija y se sella sobre el troquel, practicando el vacío en la cavidad. El aparato se coloca entonces en un recipiente grande de agua. Se coloca una carga explosiva en el agua a cierta distancia sobre el trabajo. La detonación de la carga produce una onda de choque cuya energía se transmite a través del agua, causando la deformación rápida de la pieza dentro de la cavidad. El tamaño de la carga explosiva y la distancia a la que debe colocarse sobre la pieza es más bien materia de arte y experiencia. El formado con explosivos se reserva para piezas grandes, típicas de la industria aeroespacial.

Formado electrohidráulico El *formado electrohidráulico* es un proceso de alta energía en el cual se genera una onda de choque para deformar el trabajo en la cavidad de un troquel a través de una descarga eléctrica entre dos electrodos sumergidos en un fluido de transmisión (agua). Debido al principio de operación, este proceso se llama también *formado de descarga eléctrica*. La instalación para dicho proceso se ilustra en la figura 20.46. La energía eléctrica se acumula en grandes capacitores y luego se transmite a los electrodos. El formado electrohidráulico es similar al formado por explosión. Las diferencias están en

FIGURA 20.45 Formado por explosión: 1) disposición, 2) detonación del explosivo y 3) la onda de choque forma la pieza y el penacho escapa de la superficie del agua.



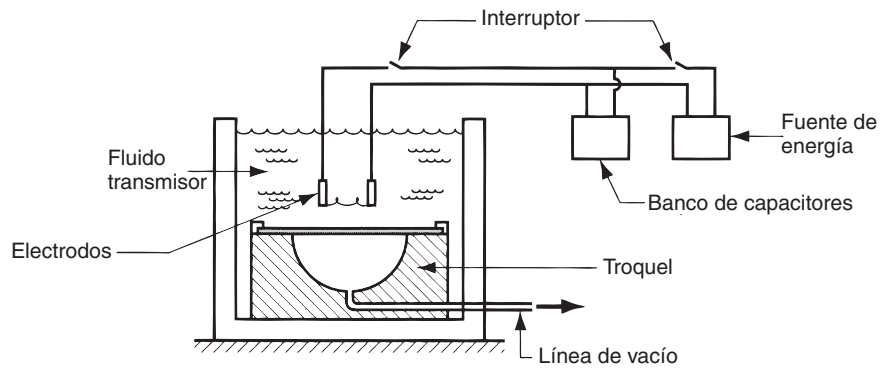


FIGURA 20.46
Disposición del formado electrohidráulico.

la forma de generar la energía y en las menores cantidades de energía que se manejan. Esto limita el formado electrohidráulico a piezas de mucho menor tamaño.

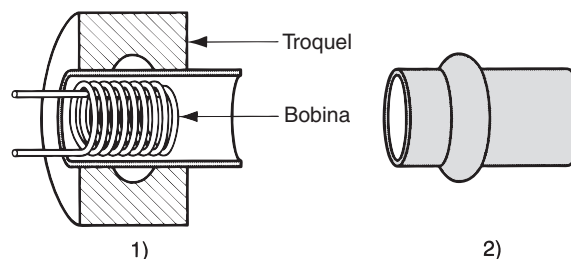
Formado electromagnético El *formado electromagnético*, también llamado *formado de pulso magnético*, es un proceso en el cual la lámina metálica se deforma por la fuerza mecánica de un campo electromagnético inducido en la pieza de trabajo por una bobina electrificada. La bobina está electrificada por un capacitor y genera un campo magnético que origina corrientes parásitas en el trabajo con su propio campo magnético. El campo inducido se opone al campo primario, produciendo una fuerza mecánica que deforma la pieza hacia la cavidad que la rodea. Inventado en la década de 1960, el formado electromagnético es el proceso de formado por alta velocidad de energía más extensamente usado en la actualidad [8]. Se usa para formar piezas tubulares, como se ilustra en la figura 20.47.

20.7 DOBLADO DE MATERIAL TUBULAR

En el capítulo anterior se analizaron varios métodos para producir tubos y tuberías, y el rechazado de tubos se describió en la sección 20.6.3. En esta sección se examina los métodos para el doblado de tubos y otros métodos de formado. El doblado de material tubular es más difícil que el de la lámina porque un tubo tiende a romperse o deformarse cuando se hacen intentos para doblarlo. Se usan mandriles flexibles especiales que se insertan en el tubo antes de doblarlo para que soporten las paredes durante la operación.

Algunos de los términos que se usan en el doblado de tubos se definen en la figura 20.48. El radio del doblado R se define respecto a la línea central del tubo. Cuando el tubo se dobla, la pared interior del doblado se comprime y la pared exterior se tensa. Esta condición de esfuerzos causa adelgazamiento y elongación de la pared externa, y engrosamiento y

FIGURA 20.47 Formado electromagnético:
1) disposición en la cual se inserta una bobina en la pieza tubular rodeada por el troquel, 2) pieza formada.



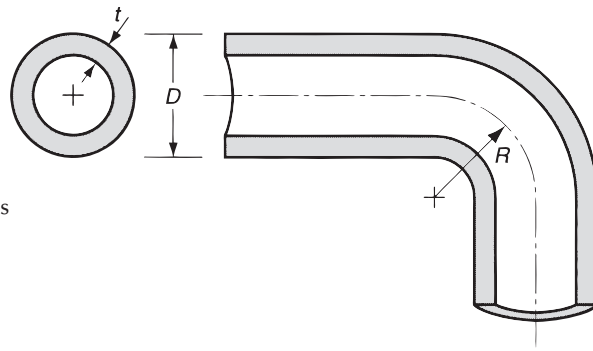
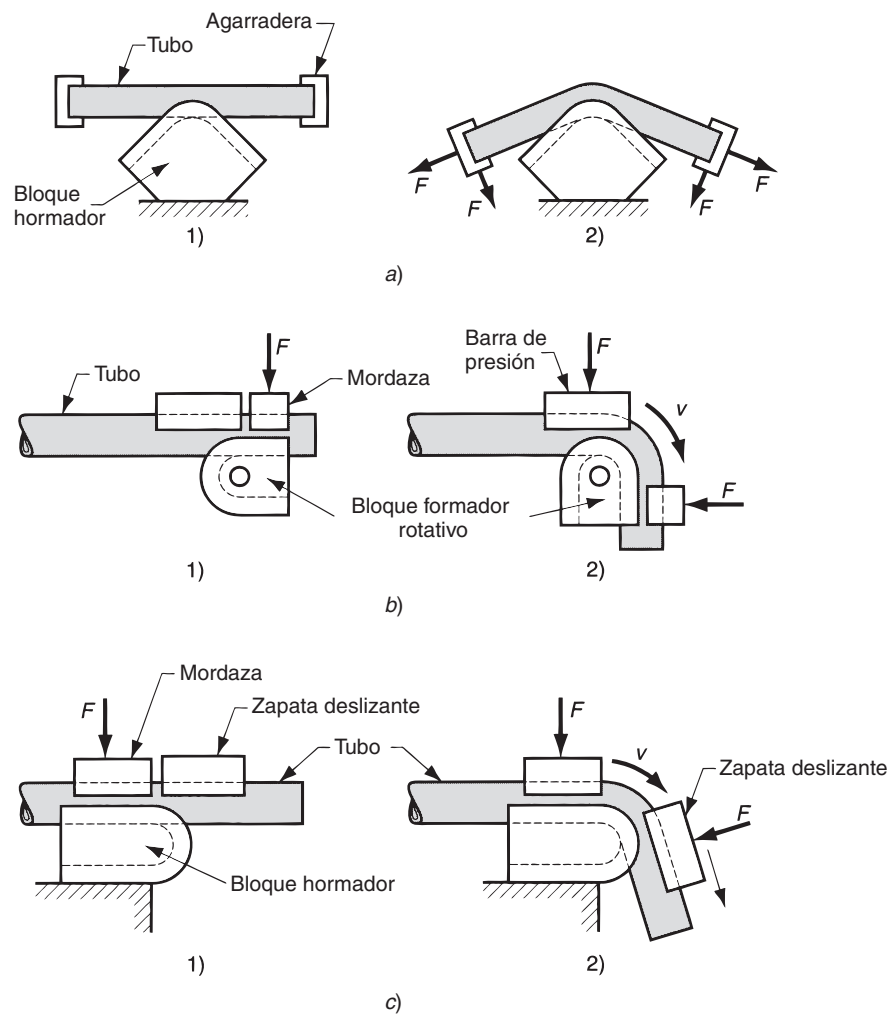


FIGURA 20.48 Dimensiones y términos en el doblado de tubos: D = diámetro exterior del tubo, R = radio de doblado y t = espesor de la pared.

FIGURA 20.49 Métodos de doblado de tubos:
a) doblado por estirado,
b) doblado por arrastre
y c) doblado por compresión.
Para cada método: 1) inicio del proceso, 2) durante el doblado. Los símbolos v y F indican movimiento y fuerza aplicada.



acortado de la pared interna. Como consecuencia hay una tendencia en las paredes interna y externa de ser forzadas hacia el lado opuesto para causar el aplanamiento de la sección transversal del tubo. Debido a esta tendencia de aplanamiento, el radio mínimo del doblado R al cual se puede doblar el tubo es alrededor de 1.5 veces el diámetro D cuando se usa un mandril, y 3.0 veces D cuando no se usa el mandril [8]. El valor exacto depende del factor de pared WF , que es el diámetro dividido entre el espesor de la pared t . Valores más altos de WF aumentan el radio mínimo del doblado; esto es, el doblado de tubos es más difícil para las paredes delgadas. La ductilidad del material de trabajo es también un factor importante en el proceso.

Se usan varios métodos para doblar tubos (y secciones similares), como se ilustra en la figura 20.49. El **doblado por estirado** se realiza tirando y doblando el tubo alrededor de un bloque de horma fija, como se muestra en la figura 20.49a). El **doblado por arrastre** se realiza fijando el tubo contra un bloque formador y arrastrando el tubo a través del doblado por rotación del bloque, como se muestra en b. Se usa una barra de presión para soportar el trabajo al ser doblado. En el **doblado por compresión** se usa una zapata deslizante para envolver el tubo alrededor del contorno de un bloque de forma fija, como se observa en el inciso c. El **doblado con rodillos** (sección 20.6.2) asociado generalmente con el formado de material laminar se usa también para doblar tubos y otras secciones.

REFERENCIAS

- [1] Early, D. F. y Reed, E. A., *Techniques of Pressworking Sheet Metal*, 2a. ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1974.
- [2] Hoffman, E. G., *Fundamentals of Tool Design*, 2a. ed., Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1984.
- [3] Hasford, W. F. y Cadell, R. M., *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*, 2a. ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J., 1993.
- [4] Kalpakjian, S., *Manufacturing Process for Engineering Materials*, 4a. ed., Prentice-Hall/Pearson, Upper Saddle River, N.J. 2003.
- [5] Lange, K., et al. (eds.), *Handbook of metal Forming. Society of Manufacturing Engineers*, Dearborn, Mich., 1995.
- [6] Mielnik, E. M., *Metalworking Science and Engineering*, McGraw-Hill, Inc., Nueva York, 1991.
- [7] Schey, J. A., *Introduction to Manufacturing Processes*, 2a. ed., McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 2000.
- [8] Wick, C., et al. (editores), *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, 4a. ed., vol. II, Forming, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1984.

PREGUNTAS DE REPASO

- 20.1. Identifique los tres tipos básicos de operaciones con láminas metálicas.
- 20.2. En las operaciones de trabajado metálico de láminas, a) ¿cuál es el nombre de las herramientas? y b) ¿cuál es el nombre de la herramienta mecánica utilizada en las operaciones?
- 20.3. En el corte de formas de piezas redondas de lámina metálica, indique cómo debe aplicarse el espacio a los diámetros del punzón y del troquel.
- 20.4. ¿Cuál es la diferencia entre una operación de corte en trozos y una operación de partición?
- 20.5. ¿Cuál es la diferencia entre una operación de muescado y semimuescado?
- 20.6. Describa los dos tipos de operaciones de doblado en placas metálicas: doblado en V y doblado de bordes.
- 20.7. ¿Qué es lo que compensa la tolerancia al doblado?
- 20.8. ¿Qué es la recuperación elástica en el doblado de láminas metálicas?
- 20.9. Defina el embutido en el contexto del trabajado metálico de láminas.
- 20.10. ¿Cuáles son algunas de las medidas simples usadas para valorar la factibilidad de una operación propuesta de embutido acopado?
- 20.11. Distinga entre reembutido y embutido inverso.
- 20.12. ¿Cuáles son algunos de los defectos posibles en el embutido de piezas de lámina?
- 20.13. ¿Qué es una operación de estampado?
- 20.14. ¿Qué es el formado por estirado?
- 20.15. Identifique los componentes principales de un troquel de estampado para el punzonado.